

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ**
**ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

На правах рукописи



Корзун Евгений Леонидович

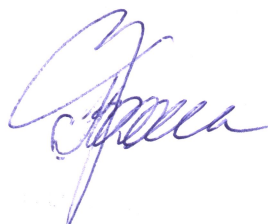
**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ
ПРОИЗВОДСТВА СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ С КОНТРОЛИРУЕМЫМ
СОДЕРЖАНИЕМ АЗОТА И УГЛЕРОДА**

**Специальность 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов
(технические науки)**

Диссертация
на соискание учёной степени
доктора технических наук

Научный консультант
д-р техн. наук, профессор
А.Г. Пономаренко

Научный консультант
д-р техн. наук, профессор
А.А. Троянский



Идентичность всех экземпляров диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:
ученый секретарь
диссертационного совета Д 01.019.03
д-р техн. наук, профессор



 **А.В. Яковченко**

Донецк – 2021 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|--|-----------|
| ВВЕДЕНИЕ | стр. 5 |
| РАЗДЕЛ 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННОЕ СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА И УГЛЕРОДА В СПЛАВАХ НА ЖЕЛЕЗНОЙ И НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВАХ, И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМ ГАЗ-ШЛАК- МЕТАЛЛ | 15 |
| 1.1. Современные требования к чистоте сталей и сплавов на никелевой основе и пути их реализации | 15 |
| 1.2. Анализ поведения азота в процессах выплавки и внепечной обработки | 23 |
| 1.3. Проблемы термодинамического описания растворов кислорода, углерода и азота в расплавах на основе железа и никеля | 33 |
| 1.4. Анализ противоречий при описании кинетики растворения азота в металлическом расплаве..... | 57 |
| Выводы | 60 |
| РАЗДЕЛ 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ | 63 |
| 2.1. Методика проведения экспериментов по влиянию технологических факторов на содержание азота при выплавке стали в ДСП и внепечной обработке на установке ковш-печь | 63 |
| 2.2. Методика проведения экспериментов по выплавке специальных сталей и сплавов на никелевой основе | 75 |
| 2.2.1. Методика проведения экспериментов по электрошлаковому переплаву стали 12X18AG18..... | 79 |
| 2.2.2. Методика проведения работ по электрошлаковому переплаву стали 04X20H6Г11M2AFБ | 83 |

| | |
|---|------------|
| 2.2.3. Методика проведения экспериментов по выплавке и рафинированию сплавов на основе никеля | 83 |
| 2.3. Методика термодинамического моделирования | 89 |
| 2.4. Методика статистического анализа полученных данных..... | 90 |
| Выводы | 91 |
| РАЗДЕЛ 3. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ ГАЗ-ШЛАК-МЕТАЛЛ | 92 |
| 3.1. Уточнение термодинамического описания растворов кислорода и углерода в железе | 92 |
| 3.2. Термодинамическое описание системы Fe-C-O с учётом парциального давления моноатомного углерода и моноатомного кислорода растворов углерода в железе..... | 117 |
| 3.3. Активность компонентов в газовых фазах..... | 133 |
| 3.4. Совершенствование термодинамического описания распределения азота между газовой фазой и расплавом на основе железа | 151 |
| 3.5. Разработка термодинамической модели описания металлических растворов, учитывающей валентные электроны как компонент фазы | 160 |
| 3.6. Термодинамическое описание изменения содержания азота в металле в плавильных процессах | 174 |
| 3.6.1. Оценка соотношения составляющих потока азота при использовании фторидных и металлофторидных шлаков | 181 |
| 3.6.2. Граничные условия выплавки жаропрочных никелевых сплавов для обеспечения низкого содержанием азота | 186 |
| 3.7. Термодинамическое моделирование условий достижения предельно низких концентраций углерода при вакуум-кислородном обезуглероживании никелевых сплавов | 193 |
| Выводы | 198 |
| РАЗДЕЛ 4. РАЗВИТИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПОЛУЧЕНИЯ РЕГЛАМЕНТИРОВАННОГО СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ..... | 202 |

| | |
|---|------------|
| 4.1. Разработка технологий, обеспечивающих удаление и стабилизацию содержания азота в ванне дуговой сталеплавильной печи и сталеразливочном ковше..... | 202 |
| 4.2. Разработка промышленных технологий производства слитков сталей, легированных азотом..... | 222 |
| Выводы..... | 256 |
| РАЗДЕЛ 5. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЁМОВ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ЗА СЧЁТ УПРАВЛЯЕМОГО СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА, УГЛЕРОДА И КАРБОНИТРИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ..... | 259 |
| 5.1 Освоение технологии выплавки низкоуглеродистого коррозионностойкого никелевого сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ)..... | 261 |
| 5.2 Исследование поведения азота при вакуумном дуговом переплаве жаропрочного никелевого сплава ВЖ 159..... | 267 |
| 5.3 Управление качеством сплава Inconel 718 при реализации комплексной технологии триплекс – процесса: ВИП-ЭШП-ВДП..... | 271 |
| Выводы..... | 291 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ..... | 293 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ..... | 299 |
| Приложение А. Статистический анализ результатов моделирования фазового равновесия стали 08Х18Н5Г12АБ (ННЗБ)..... | 353 |
| Приложение Б. Статистический анализ результатов моделирования фазового равновесия стали 12Х18АГ18..... | 371 |
| Приложение В. Статистический анализ результатов моделирования фазового равновесия стали 04Х20Н6Г11М2АФБ..... | 378 |
| Приложение Г. Документы, подтверждающие использование материалов научных исследований по результатам диссертационной работы..... | 424 |
| Приложение Д. Экономическая эффективность разработок..... | 431 |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Тенденции развития мировой экономики в начале двадцать первого века выдвинули на передний план три наиболее актуальные для металлургической технологии задачи: выполнение жестких требований к качеству стали и сплавов, особенно по содержанию цветных металлов, газов и неметаллических включений; создание комплексных технологий, гарантирующих установленный уровень качества и снижающих влияние человеческого фактора в процессе реализации технологий на практике; повышение гарантированного срока службы металлургической продукции, особенно в изделиях ответственного назначения (добывающий комплекс, энергетическое машиностроение, двигателестроение, военная техника и т.п.).

Для снижения негативного влияния человеческих ошибок в принятии решений активно используют автоматизированные системы. Прогресс современных средств вычислительной техники открыл новые возможности для построения высокоэффективных систем управления сталеплавильными процессами. Однако, реализация их уже на стадии математической формулировки задач часто встречается с проблемами, связанными со спецификой математического аппарата теории металлургических процессов. Так, основным инструментом при создании алгоритма термодинамических расчётов по-прежнему остаётся закон действующих масс (ЗДМ) и запись соответствующих химических реакций, что обуславливает несоответствие реальным системам, так как ЗДМ справедлив для газовых фаз и даёт погрешности для конденсированных фаз – металла и шлака. Вторым важным аспектом адекватности применения ЗДМ для успешной алгоритмизации металлургической технологии является степень точности констант равновесия химических реакций.

При описании поведения компонентов фаз металлургической системы в современных АСУ используют различные модели. Однако, при изменении факторов производства (что характерно для металлургии) такие системы, как правило, теряют устойчивость, характеризуются значительными отклонениями

прогноза от реальных событий и не обеспечивают стабильности производства металла с гарантированно низким содержанием примесей.

Одной из наиболее сложных задач в рафинировании сталей и, особенно, никелевых сплавов является деазотация. Отчасти это связано с отсутствием обобщенного термодинамического описания управления концентрацией азота в расплавах металлов и существенного влияния человеческого фактора.

Актуальной проблемой настоящего времени также является организация производства коррозионностойких сплавов на никелевой основе для тепловой и атомной энергетики, предусматривающего получение низких содержаний азота, углерода и неметаллических включений в готовом металле.

Таким образом, проблема получения сталей и сплавов на никелевой основе с низкими содержаниями азота и углерода, а также легированных сталей с гарантированными показателями качества, в том числе и сталей легированных азотом, весьма актуальна и может быть разрешена путём создания устойчивых комплексных технологий, систем управления сталеплавильными агрегатами и агрегатами внепечной обработки на базе новых подходов к описанию металлургических процессов и установленных соответствующих зависимостей.

Степень разработанности темы. В существующих сталеплавильных процессах содержание азота в металле изменяется волнообразно: в первичном сталеплавильном агрегате – кислородном конвертере (далее КК) или дуговой сталеплавильной печи (далее ДСП) – оно в первые три четверти времени процесса выплавки снижается, а в оставшуюся одну четверть – повышается; при выпуске из сталеплавильного агрегата, во время внепечной обработки стали на установке ковш – печь (далее У КП) оно повышается, а при вакуумировании стали – снижается; при разливке вне зависимости от способа оно повышается. Рафинирование металла в переплавных процессах не обеспечивает однозначно положительного эффекта в достижении деазотации. Аналогичной по сложности является задача получения сталей, легированных азотом. Их производство связано с нестабильностью концентрации азота в готовом металле, что приводит к увеличению затрат на производство. При этом использование традиционного подхода к объяснению

причин "выпадов" качества серийной продукции за пределы нормативных требований по содержанию азота, основанного на законе Сивертса, зачастую не даёт объяснений фактических отклонений. Важной и актуальной задачей является разработка научного обоснования и технологических приёмов получения гарантированно низкого содержания азота в жаропрочных и коррозионностойких сплавах на основе никеля. Наиболее важный вклад в изучение процессов растворения азота в металлическом расплаве и деазотации жидкого металла внесли А. Сивертс, Н.П. Чижевский, Дж. Чипман, Д. Мэрфи, М.М. Карнаухов, А.Н. Морозов, В.П. Федотов, А.М. Самарин, В. Кашьяп, Н. Парли, Ю. Касамацу, С. Матоба, Р. Пелке, Дж. Эллиотт, Э. Шюрман, Н. Кунце С. Маэкава, Я. Накагава, В.В. Яковлев, С.И. Филиппов, М. Отани, К. Санбонги, Т. Вада, Х. Вада, М. Уда, Т. Фува, Ш. Бан-я, М. Иноуэ, А.Г. Пономаренко, С.В. Безобразов, В.И. Хяккинен, А.Г. Свяжин, А.Я. Стомахин, Е. Сивка, Р. Фруэн, В.И. Лакомский, Ю.М. Помарин, Г.М. Григоренко, Л.Г. Ригина, М.В. Костина, Ч. Цзян, М. Шпайдель, Я. Рийпи, Дж. Киджак, С. Ли-Юань и др.

Общие процессы обезуглероживания сталей и никелевых сплавов достаточно полно изучены как в лабораторных условиях, так и в промышленных при атмосферном и пониженном давлениях газовой фазы в плавильных агрегатах, что отражено в работах Г. Шенка, Ш. Маршалла, Дж. Чипмана, А. Риста, Л.Я. Глускина, Е.Т. Туркдогана, С.И. Филиппова, Л.С. Даркена, Р.В. Гурри, Т. Фувы, А.М. Самарина, А.Ю. Полякова, В.В. Аверина, Д.Ф. Эллиотта, Р.Дж. Фруэна, Г. Кньюппеля, В.Т. Бурцева, Б.В. Линчевского, С. Матобы, Э. Шюрмана, Н.Х. Эль-Каддаха, Д. Робертсона, Ю. Омори, К. Санбонги, Н. Мацумото, В.И. Лакомского, Л.М. Новика, Д. Янке, Н.М. Чуйко, С.И. Хитрика, Ал.Г. Шалимова, В.А. Дашевского, В.К. Григоровича, В. Плушкеля, Ю. Сюя, З. Чена, Г. Чжана и др. Однако, несмотря на многогранность и широкий охват исследований углеродного восстановления рудных материалов и кислородного рафинирования расплавов, получение низких содержаний углерода в некоторых легированных сталях и сплавах на основе никеля по-прежнему являются актуальной задачей как в теоретическом плане (обоснование пределов и скорости

этого процесса в различных агрегатах), так и в практическом плане (задание параметров процесса, обеспечивающих наибольшую эффективность в конкретных производственных условиях). Для увеличения срока службы ответственных узлов энергетического оборудования и агрегатов специального назначения необходимы сплавы на основе никеля с содержанием углерода ниже 50 ppm (а для отдельных случаев – ниже 30 ppm). Существующие производства таких сплавов не всегда гарантируют стабильно низкое содержание углерода.

Цель и задачи исследования. Цель работы – установить закономерности изменения содержания азота и углерода в металле в плавильных процессах и усовершенствовать технологии производства сталей и сплавов на никелевой основе с регламентированным содержанием азота и низким содержанием углерода в сплавах на никелевой основе.

Для достижения поставленной цели определены следующие задачи:

1. Разработать метод описания термодинамического равновесия системы металл – газ, основанный на едином подходе к выбору компонентов фаз и их стандартного состояния.

2. Усовершенствовать термодинамическое описание равновесия в системе железо – углерод – кислород, компонентов в металлургических газовых системах. Уточнить закономерности поведения азота в системах металл – газ и металл – шлак – газ и закономерности изменения концентрации азота в течение выплавки стали и её внепечной обработки.

3. Разработать термодинамическую модель металлических растворов, учитывающую влияние окислительного потенциала фазы на характеристики компонентов раствора.

4. Экспериментально исследовать возможности достижения низкого содержания азота в стали, получаемой в технологической цепи производства ДСП – УКП, низкого содержания азота в сплавах на основе никеля, получаемых в технологических цепочках вакуумная индукционная печь – вакуумная дуговая печь, вакуумная индукционная печь – электрошлаковая печь – вакуумная дуговая печь.

5. Экспериментально исследовать и обосновать возможности обеспечения гарантированного содержания азота в легированной азотом стали в технологической цепи производства ДСП – УКП – камерный вакууматор – разливка в слитки – электрошлаковая печь.

6. Экспериментально исследовать и обосновать технологические приемы достижения низкого содержания углерода в сплавах на основе никеля, получаемых в вакуумной индукционной печи.

Объект исследования. Технологические процессы производства сталей и сплавов на никелевой основе в электрометаллургических плавильных агрегатах.

Предмет исследования. Закономерности управления содержанием азота в сталях и никелевых сплавах, технологии производства сталей с гарантированным содержанием азота, технологии производства сплавов на никелевой основе с минимальным содержанием углерода и азота в готовом металле.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые установлено влияние парциальных давлений моноатомных углерода P_C и кислорода P_O над расплавом железа на растворимость углерода в нем и количественно определена взаимосвязь указанных характеристик системы "расплав железа – газовая фаза", которая выражается уравнением $x_{[C]} = \exp(77124/T - 7,096) \cdot P_C \cdot P_O^{1/2}$ (1823÷2023К).

2. Получило дальнейшее развитие термодинамическое описание раствора кислорода в жидком железе: уточненные уравнения изменения энергии Гиббса реакции растворения кислорода в жидком железе и зависимости активности кислорода в нём имеют вид $\Delta G = -118473 + 24,6 \cdot T$, Дж/моль, $a_{[O]} = x_{[O]} \cdot \exp(10,77 - 44535/T)$.

3. Получило дальнейшее развитие термодинамическое описание раствора углерода в жидком железе в результате уточнения уравнения изменения энергии Гиббса реакции растворения конденсированного углерода в жидком железе: $\Delta G = 262594 - 143,695 \cdot T$, Дж/моль.

4. Получило дальнейшее развитие термодинамическое описание раскислительной способности углерода в тройной системе Fe-C-O. Установлено, что для обеспечения непрерывности снижения активности кислорода, растворённого в железе, при уменьшении общего давления в системе необходимо поддерживать восстановительный характер газовой фазы, а для соответствующего снижения активности углерода – окислительный характер газовой фазы.

5. Получило дальнейшее развитие термодинамическое описание металлургических газовых фаз, содержащих азот. Установлено, что наименьшей активностью азот обладает в газовой смеси с инертными газами, а примеси восстановительных (водород, оксид углерода (II)) и окислительного (кислород) компонентов в газовой смеси приводят к росту активности азота.

6. Впервые установлены зависимости коэффициента межфазного распределения азота в системе железо – азотсодержащая газовая фаза при атмосферном давлении от концентрации азота $x_{[N]}$, его активности $a_{[N]}$ в газе и температуры T : $L_N=296 \cdot x_{[N]}+2236 \cdot a_{[N]}+1161717/T-282$ для систем Fe-N-Ar(He) при температуре $T=1853-2273$ К и любых соотношениях исходных компонентов в газе; $L_N=242 \cdot x_{[N]}+419781 \cdot a_{[N]}+1631212/T-784$ для систем Fe-NH₃-Ar(He) при температуре $T=1963-2123$ К и содержании аммиака в исходной газовой смеси от 0 до 40% об.

7. Впервые установлена эмпирическая зависимость содержания азота в сплаве на никелевой основе ВЖ 159 после вакуумного дугового переплава $[N]^{VAR}$ (% масс.) от концентраций (% масс.) ниобия $[Nb]^*$, бора $[B]^*$ и азота $[N]^*$ в металле расходуемого электрода: $[N]^{VAR}=0,0106 \cdot [Nb]^*+3,4578 \cdot [B]^*+0,5206 \cdot [N]^*-0,0347$.

Теоретическая значимость работы.

1. Установлено влияние окисленности системы металл – газ, определенной через парциальное давление атомарного кислорода, на равновесную концентрацию углерода в расплаве железа.

2. Получил дальнейшее развитие метод описания термодинамического равновесия металлургической системы металл – шлак – газ, основанный на

принципе равенства активностей компонентов в фазах системы, при этом компонентами всех фаз считаются химические элементы.

3. Получило дальнейшее развитие термодинамическое описание металлической фазы с использованием модели растворов, учитывающей совокупность валентных электронов химических элементов как отдельный компонент фазы, адекватно отображающей жидкие растворы систем Fe–O, Fe–N, Fe–Cr–N.

4. Установлена определяющая роль градиента окисленности шлака в системе металл – шлак – газ на поведение азота при выплавке и внепечной обработке вне зависимости от основного компонента шлака, имеющего отрицательную степень окисления, кислорода или фтора.

5. Получило дальнейшее развитие представление о взаимосвязи температур ликвидус, солидус, солидус с учётом неравновесного процесса затвердевания, растворимости азота на примере легированных азотом сталей 08X18H5Г12АБ, 12X18АГ18, 04X20H6Г11М2АФБ. Получены соответствующие эмпирические зависимости, пригодные для любого химического состава этих сталей в рамках нормативных требований к ним.

Практическая значимость работы.

1. Усовершенствована технология электрометаллургического производства высокоуглеродистой стали для изготовления катанки с дальнейшей переработкой в корд, позволяющая получить содержание азота в заготовке не более 80 ppm без применения вакууматора.

2. Разработаны и внедрены технологические приёмы, позволяющие устранить повышение концентрации азота на заключительном этапе окислительного периода выплавки полупродукта в дуговой сталеплавильной печи.

3. Уточнённые в работе термодинамические зависимости поведения кислорода и углерода в расплавах на основе железа использованы в разработке современных систем автоматизированного проектирования и управления технологическими процессами выплавки и внепечной обработки стали.

4. Усовершенствована технология производства азотсодержащих коррозионностойких немагнитных сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11М2АФБ с содержанием азота, близким к пределу его растворимости при атмосферном давлении.

5. Усовершенствована технология триплекс-процесса производства жаропрочного сплава на никелевой основе Inconel 718 с гарантированно низким содержанием азота (не выше 65 ppm).

6. Разработана и реализована технология двухстадийного вакуумного индукционного процесса производства коррозионностойкого сплава на никелевой основе ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) с гарантированно низкими концентрациями углерода (не выше 50 ppm) и азота (не выше 50 ppm).

Методология и методы исследования.

При проведении исследований использованы основные положения современной теории сталеплавильных процессов, стандартные методы планирования экспериментов и методики исследования химического состава сталей и сплавов на никелевой основе, методы математической статистики при обработке результатов, лабораторные исследования, опытно-промышленные плавки на действующих дуговых сталеплавильных, вакуумных индукционных, электрошлаковых и вакуумных дуговых печах. Обработка результатов экспериментов проведена с помощью программного обеспечения Microsoft Excel, OriginPro, Statistica.

Положения, выносимые на защиту.

1. Развитие научных основ термодинамического описания поведения углерода и азота в жидких растворах на основе железа, влияние окисленности системы, характеризующейся парциальным давлением атомарного кислорода над расплавом, на растворимость углерода в металле, превалирование механизма удаления азота из металла при перемешивании жидкоподвижного шлака в окислительной азотсодержащей атмосфере над механизмом поглощения азота из газовой фазы.

2. Разработка технологических приемов как элементов комплексной технологии выплавки, внепечной обработки и рафинирующих переплавов, позволяющих получать стали с гарантированным требуемым содержанием азота и сплавы на основе никеля с низким содержанием азота и углерода.

Степень достоверности и апробация результатов.

Результаты, представленные в диссертационной работе, получены на основе экспериментов, проведенных с использованием современного научного оборудования и апробированных аналитических методов. Достоверность полученных результатов обеспечена применением комплекса взаимодополняющих экспериментальных и аналитических методик и подтверждена их воспроизводимостью.

Основные положения диссертации были доложены и обсуждены на международных конференциях: XI Международная конференция "Современные проблемы электрометаллургии стали" (г. Челябинск, 25–27 сентября 2001 г.); XI Международная научно-техническая конференция "Теория и практика сталеплавильных процессов" (г. Днепропетровск, 24–26 мая 2005 г.), 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012 (ICS 2012), (Dresden, 1-3 Oct. 2012), XV Международная научная конференция "Современные проблемы электрометаллургии стали" (г. Челябинск, 24–27 сентября 2013 г.), III Международная научно-практическая конференция "Современные технологии в машиностроении и литейном производстве" (г. Чебоксары, 4–6 декабря 2017 г.), Седьмая Международная научная конференция "Химическая термодинамика и кинетика" (Великий Новгород, 29 мая – 2 июня 2017 г.), V Международная научно-техническая конференция "Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики" (г. Москва, 2–5 октября 2018 г.), IX Евразийская научно-практическая конференция "Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2018" (г. Москва, 24–26 апреля 2018 г.), XV Международный конгресс сталеплавильщиков (г. Москва, 15–19 октября 2018 г.), Международная научная конференция "Физико-химические основы металлургических процессов", имени академика А.М. Самарина. (г. Москва. 25–28 ноября 2019 г.); научно-технических

конференциях: Седьмой конгресс сталеплавильщиков (г. Магнитогорск, 15–17 октября 2002 г.), научно-техническая конференция "Информационные технологии в металлургии и машиностроении – ИТММ'2010" (г. Днепропетровск, 30 марта – 2 апреля 2010 г.), XIII Российская конференция "Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов" (г. Екатеринбург, 12–16 сентября 2011 г.), XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки) (г. Нижний Новгород, 22–23 мая 2018 г.); научных семинарах: научно-практический семинар по вычислительной термодинамике и кинетике (г. Москва, 11 ноября 2019 г.).

РАЗДЕЛ 1

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ЗАДАННОЕ СОДЕРЖАНИЕ АЗОТА И УГЛЕРОДА В СПЛАВАХ НА ЖЕЛЕЗНОЙ И НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВАХ, И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РАЗВИТИЯ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СИСТЕМ ГАЗ-ШЛАК-МЕТАЛЛ

1.1. Современные требования к чистоте сталей и сплавов на никелевой основе и пути их реализации

Эволюция техносферы напрямую связана с прогрессом в материалах, используемых для создания техники и, поскольку стали совместно с другими металлами являются в настоящее время и будут таковыми в ближайшее будущее основными конструкционными материалами, требования к сталям и сплавам имеет устойчивую тенденцию к ужесточению. Так, например, в таблице 1.1 приведены сведения по критическим параметрам химического состава и загрязнённости неметаллическими включениями по данным [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Возможности достижения таких концентраций различными технологиями в действующих металлургических агрегатах довольно ограниченные, особенно в случае выбора в качестве первичного сталеплавильного агрегата дуговой электропечи (по данным [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17] см. табл.1.2).

Низкое содержание углерода в современных условиях достигается за счет применения конвертерного способа производства с комбинированной продувкой с последующей вакуумной обработкой стали в циркуляционном вакууматоре [18]. Гарантированное низкое содержание кислорода получить в готовой стали значительно труднее, чем низкое содержание углерода. Технически процесс снижения общей концентрации кислорода в металле связан с двумя подпроцессами: снижением содержания раствора кислорода в металле и удалением из металла неметаллических включений, содержащих кислород [7, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25].

Таблица 1.1. Нормативные требования по содержанию некоторых примесей в различных сталях и сплавах и требования к их загрязнённости неметаллическими включениями

| Металлический продукт | Углерод, ррт | Фосфор, ррт | Сера, ррт | Азот, ррт | Общий кислород, ррт | Водород, ррт | Максимальный размер НВ, мкм |
|---|--------------|-------------|-----------|-------------|---------------------|--------------|-------------------------------------|
| IF сталь [1, 2] | ≤30 | | | ≤40 | ≤40 | | |
| | ≤10 | | | ≤50 | | | |
| Лист для автомобильной промышленности и глубокой вытяжки [1, 2] | ≤30 | | | ≤30 | ≤20 | | 100 |
| Тонкостенные сосуды, изготавливаемые методом штамповки [1, 2] | ≤30 | | | ≤30 | ≤20 | | 20 |
| Прутки из легированной стали [1, 2] | | | | ≤10 ÷ 20 | ≤10 | ≤2 | |
| Трубы для магистральных трубопроводов [1, 2] | | | ≤30 | ≤35 | ≤30 | ≤1,5 | 100 |
| | | ≤120 | ≤10 | ≤40 | | | |
| Лист для непрерывного отжига [1, 2] | | | | ≤20 | | | |
| Подшипники [1, 2] | | | | | ≤10 | | ≤15 |
| Корд [1, 2] | | | | ≤40 | ≤15 | ≤2 | ≤10 |
| Электротехническая сталь [1, 2] | | | | ≤30 | | | |
| Толстолистовая сталь [1, 2] | | | | ≤30 ÷ 40 | ≤20 | ≤2 | Отдельное НВ 13; Кластеры НВ 200 |
| Низкоуглеродистая проволока [1, 2] | | | | ≤60 | ≤30 | | 20 |
| Высокопрочные стали для аэрокосмической техники [3] | ≤50 | | | ≤30 | ≤40 | | |
| Жаропрочные деформируемые сплавы на никелевой основе [4] | | | | ≤23 | ≤10 | | |
| Жаропрочные литые сплавы на никелевой основе [4, 5] | ≤50 | | | ≤5 | ≤5 | | |
| Коррозионностойкие сплавы на никелевой основе [6] | ≤50 | | | | | | |

Таблица 1.2. Характерные уровни содержания азота в низкоуглеродистой стали

| Наименование процесса | Содержание азота, % масс. | Источник данных |
|--|-------------------------------|---------------------|
| Бессемеровский | 0,0120 ÷ 0,0170 | [7] |
| Томасовский | 0,0170 ÷ 0,0180 | [7] |
| Кислый мартеновский | 0,0010 ÷ 0,0015 | [8] |
| Основной мартеновский скрап-рудный | 0,0020 ÷ 0,0035 | [7] |
| Кислородно-конвертерный | 0,0005 ÷ 0,0040 | [9, 10, 11, 12, 13] |
| Электросталеплавильный с полным циклом периодов плавки | 0,0060 ÷ 0,0120 | [14] |
| Электросталеплавильный в сверхмощной печи из скрапа с операциями окончательного рафинирования и легирования в агрегате ковш-печь; шихта – 100% скрап | 0,0070 ÷ 0,0120 | [12, 15] |
| Электросталеплавильный в сверхмощной печи с операциями окончательного рафинирования и легирования в агрегате ковш-печь; шихта – 100% DRI (2,4% углерода) | ≤0,0025 | [2] |
| Электросталеплавильный в сверхмощной печи с операциями окончательного рафинирования и легирования в агрегате ковш-печь; шихта – 100% DRI (2,7% углерода) | ≤0,0015 | [2] |
| Внепечная обработка стали на установке ковш-печь с последующей разливкой на МНЛЗ | Увеличение на 0,0020 ÷ 0,0040 | [13, 17] |

Помимо уменьшения неметаллических оксидных включений и контроля их распределения по размерам, морфологии и состава, производство чистых сталей и сплавы на никелевой основе требует контроля содержания серы, фосфора, водорода, азота и даже углерода (табл. 1.1) и минимизации остаточных примесных элементов, таких как As, Sn, Sb, Se, Cu, Zn, Pb, Cd, Te и Bi [1, 2, 3, 4, 5, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25]. Эти требования различаются в зависимости от марки стали и ее конечного использования, как показано в таблице 1.1. Таким образом, чистая сталь для одного применения часто неприемлема для другого [26]. Успех в организации технологии, направленной на снижение общего содержания кислорода в стали, и последующий за этим рост служебных свойств стали можно иллюстрировать

примером производства шарикоподшипниковой стали с содержанием кислорода на уровне $8 \div 10$ ppm [27, 28].

В отличие от низкоуглеродистых сталей для легированных сталей и сплавов на основе никеля существует технологические проблемы получения низких значений содержания углерода и кислорода, которые не находят однозначного теоретического объяснения путей достижения поставленной цели [3, 4, 5, 6, 29, 30].

Увеличенное содержание азота в металле, выплавленном в дуговых печах связывают с поступлением азота в зонах контакта электрических дуг с ванной [16]. Каждая последующая технологическая операция с жидким металлом, начиная от выпуска из первичного сталеплавильного агрегата (вне зависимости конвертер или дуговая печь) и вплоть до его кристаллизации, либо не меняет содержание азота, либо изменяет его большую сторону [17], увеличение составляет от 0,002 до 0,004% масс. Применение вакуумной обработки в различных агрегатах имеют различную эффективность снижения уровня азота в жидком металле (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Эффективность деазотации низкоуглеродистой стали в различных вакуумных агрегатах

| Наименование агрегата для вакуумирования | Начальное содержание азота, % масс. | Конечное содержание азота, % масс. | Время обработки, мин. | Эффективность деазотации, % | Источник данных |
|--|-------------------------------------|------------------------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------|
| VD/VOD | 0,006 | 0,004÷0,008 | 52÷80 | 25÷-25 | [31] |
| DH | 0,010÷0,012 | 0,004÷0,005 | 20÷35 | 50÷67 | [32] |
| RH | 0,009÷0,011 | 0,0019÷0,0065 | 30÷40 | 35÷79 | [33] |

Немаловажным фактором обеспечения стабильности технологии является переживаемый в настоящее время повсеместный переход на автоматизированное управление технологическими процессами. Основанием всякой АСУ, как известно, является математическая модель управляемого объекта, удовлетворяющая определённым требованиям точности, общности и простоты. Модель процессов выплавки и внепечной обработки жидкого металла, в общем случае, должна представлять собой математическое описание совокупности взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих в многокомпонентной гетерогенной

системе металл – шлак – газ. Детерминированной основой такой модели, обеспечивающим её универсальность, должны служить общие законы термодинамики и кинетики металлургических процессов, опирающиеся на надёжные базы соответствующих констант, такие, например, как ИВТАНТЕРМО, Thermo-Calc, Fact-Sage, JMatPro. В большинстве существующих металлургических АСУ ТП исходным пунктом всех математических построений в химической термодинамике и кинетике является написание стехиометрических реакций и выражений для соответствующих констант закона действующих масс (ЗДМ), – скорости или равновесия. Однако, при практической реализации такого подхода в моделировании высокотемпературных систем, именно константы реакций оказываются «ахиллесовой пятой» математической модели.

Скорости собственно химического акта реакций при температурах сталеварения, по имеющимся оценкам столь велики, что вряд ли они могут оказывать заметное влияние на общий ход процесса. С большой долей уверенности можно говорить, что скорость процессов в металлургических расплавах определяется лишь доставкой реагентов, в основном конвективной диффузией.

Необходимой точности прогноза химического состава фаз удаётся достигать лишь путём систематической коррекции констант.

Модель, способная вести технологический процесс в автоматическом режиме, должна удовлетворять весьма жёстким требованиям. В частности, погрешность прогноза текущего состава металла, не должна превышать $\pm 20\%$ отн., (это приблизительно соответствует «вилке» марочного состава сталей простейшего сортамента). Вместе с тем, разброс численных значений констант для одной и той же реакции, рекомендуемых различными авторами [19, 34, 35, 36, 37], часто различаются по порядку величины, а их температурные коэффициенты расходятся даже по знаку.

Наиболее сильно отличаются значения констант активных элементов, в частности, раскислителей [34, 35]. Например, для реакции раскисления железа алюминием:



Приняв за стандартное состояние 1% раствор, константу равновесия реакции (1.1) записывают в виде

$$K = [\% Al]^2 \cdot f_{[Al]}^2 \cdot [\% O]^3 \cdot f_{[O]}^3, \quad (1.2)$$

где K - константа равновесия; $[\% Al]$, $[\% O]$ - концентрации алюминия и кислорода в железе, % масс.; $f_{[Al]}$, $f_{[O]}$ - коэффициенты активности алюминия и кислорода соответственно.

Принимая во внимание небольшие концентрации алюминия и кислорода в расплаве железа, часто их коэффициенты активности считают постоянными величинами - $f_{[Al]}, f_{[O]} \Big|_{T=const} = const$. В этом случае их значения переносят в левую часть уравнения константы равновесия (1.2), получая уравнение константы в виде

$$K' = [\% Al] \cdot [\% O] \quad (1.3)$$

где K' - константа растворимости.

Представив сведения по численным значениям констант равновесия реакции (1.1) в хронологическом порядке (рис. 1.1), видно, что амплитуда значений констант растворимости обоих видов составляет более трёх порядков. Что даёт разбег прогнозной концентрации алюминия при одинаковом содержании кислорода в расплаве более чем в 50 раз.

Аналогичная картина характерна и для значений констант равновесия реакций взаимодействия других компонентов металлического расплава (кремнием, марганцем, углеродом) с растворенным кислородом, хотя и с меньшей амплитудой разбега значений (рис. 1.2 – 1.4)

Для гомогенных газовых реакций и низкотемпературных растворов молекулярных веществ (существующих до $\sim 1000K$) законы стехиометрии, а, следовательно, и закон действующих масс, могут выполняться с высокой точностью. Высокотемпературный конденсат (металл, шлак и др.) всегда в той или иной мере нестехиометричен, поэтому применение ЗДМ может служить одной из причин указанных отклонений.

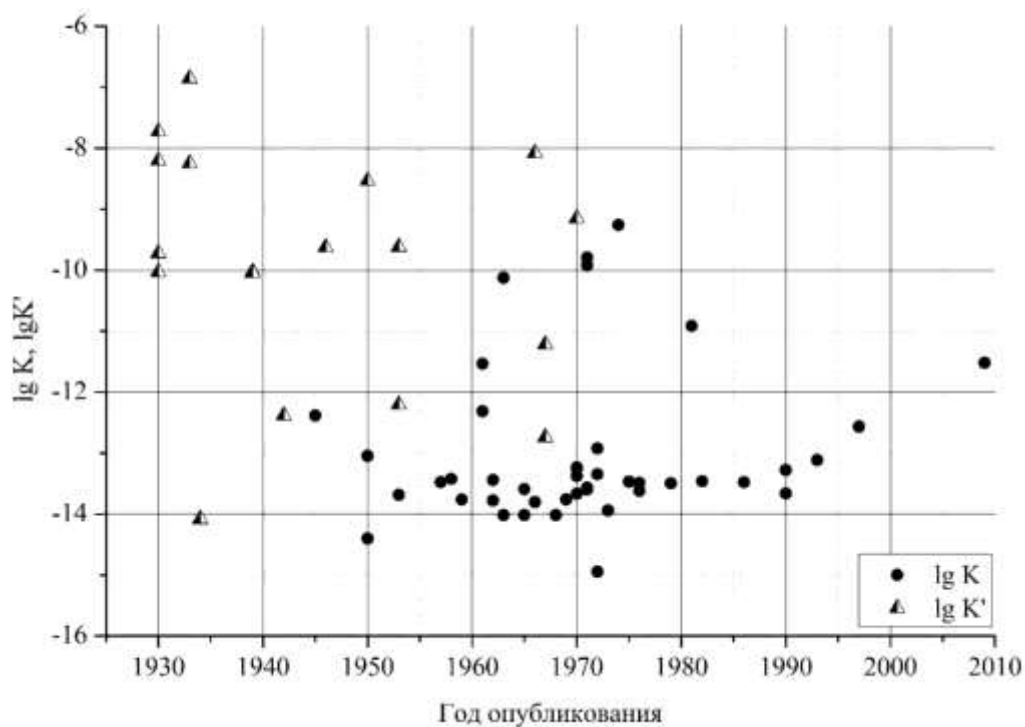


Рисунок 1.1. Значения константы равновесия реакции раскисления железа алюминием при $T=1873\text{K}$ по данным работ [19, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58]

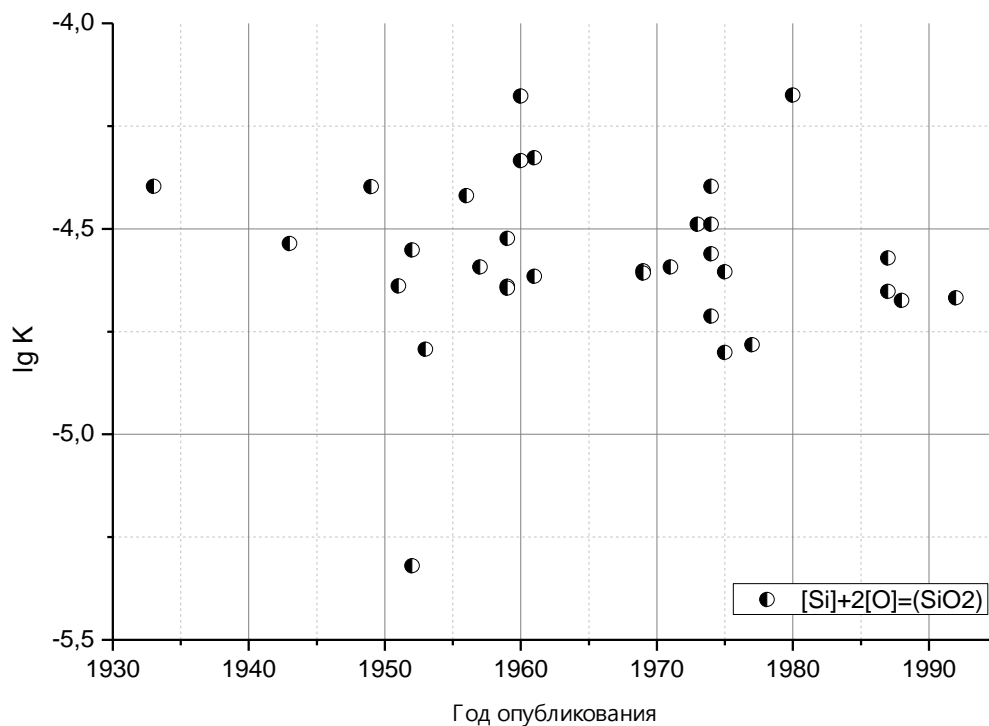


Рисунок 1.2. Значения константы равновесия реакции раскисления железа кремнием при $T=1873\text{K}$ по данным работ [19, 33, 34, 35, 47, 54, 55, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75]

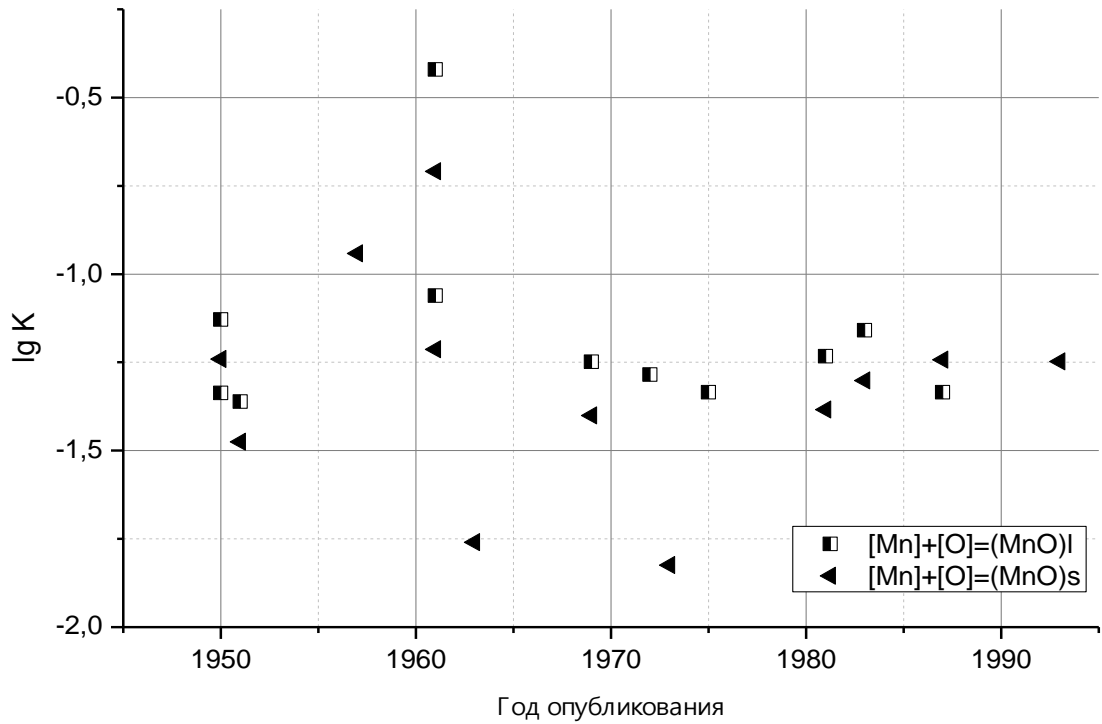


Рисунок 1.3. Значения константы равновесия реакции раскисления железа марганцем при $T=1873\text{K}$ по данным работ [19, 33, 34, 35, 47, 54, 57, 73, 74, 76, 77, 78, 79, 80]

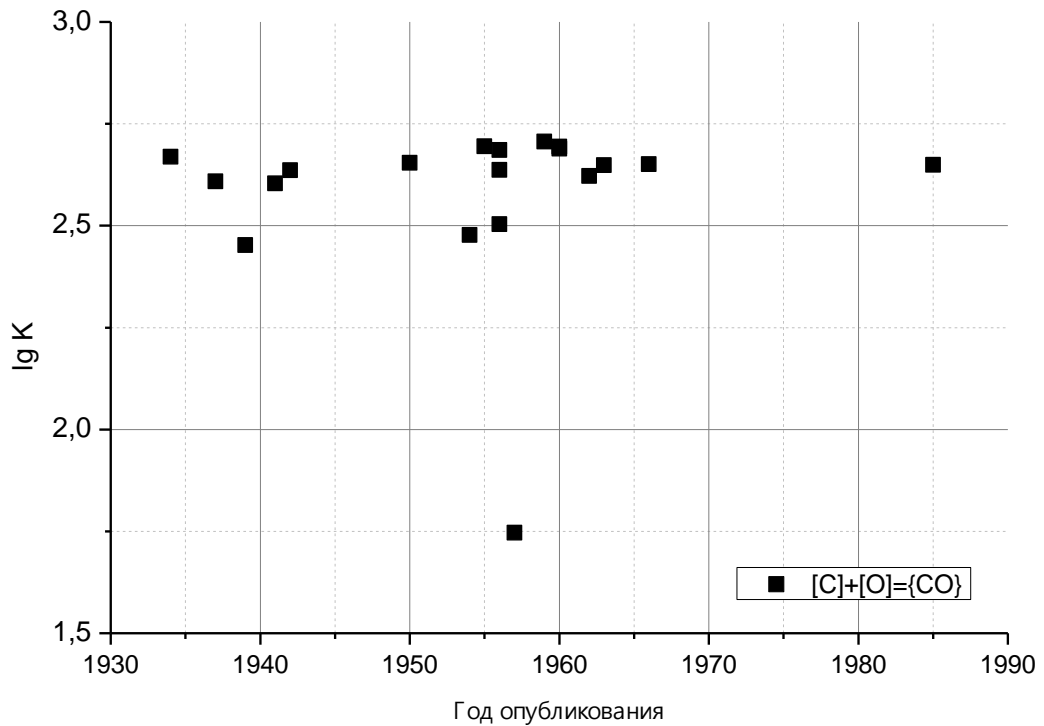


Рисунок 1.4. Значения константы равновесия взаимодействия углерода и кислорода, растворённых в железе, при $T=1873\text{K}$ и условии образования CO по данным работ [19, 33, 34, 47, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95]

Практически все приведенные выше значения констант реакций раскисления жидких растворов на основе железа опираются на сведения о растворе кислорода в жидком железе, и, в таком случае, эти сведения нуждаются в пересмотре с целью уточнения.

1.2. Анализ поведения азота в процессах выплавки и внепечной обработки

Ещё в начале прошлого века впервые начали отслеживать влияние производственных факторов сталеплавильного процесса на содержание азота в готовом металле [96, 97]. За прошедшее время накоплен достаточно большой объём данных по этому вопросу [1, 2, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 15, 17, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175]. Базируясь на обширной информации, осуществляются попытки математического описания поведения азота в сталеплавильных процессах [168, 171, 176, 177, 178, 179, 180]. Анализ литературных данных показал, что на содержание азота в жидком металле оказывают, в первую очередь, следующие факторы: состав стали; температура металла; тип используемого агрегата и вид технологии, длительность проведения процесса, наличие прямого контакта жидкого металла с атмосферой агрегата и его длительность.

Каждый из процессов производства стали можно охарактеризовать присущими ему средними содержаниями азота в стали (табл. 1.4).

Анализируя данные, приведенные в табл. 1.4, следует отметить следующие моменты:

- фактические концентрации азота в стали всегда ниже равновесных с газовой фазой;
- основным фактором, влияющим на содержание азота в стали при выплавке в кислородном конвертере является степень чистоты кислородного дутья, при

чистоте кислорода выше 99,8% возможно достижение концентраций азота на уровне $0,0006 \div 0,0017\%$ масс. [10];

Таблица 1.4. Характерное содержание азота в стали в зависимости от процесса её выплавки

| Наименование процесса | Характеристика стали | Содержание азота в стали, % |
|--|--|---|
| Бессемеровский | низкоуглеродистая | 0,0120 ÷ 0,0170 [7] |
| | углеродистая | 0,0100 ÷ 0,0120 [7] |
| Томасовский | низкоуглеродистая кипящая | 0,0170 ÷ 0,0180 [7] |
| Кислый мартеновский | среднеуглеродистая С=0,28% | 0,0050 ÷ 0,0065 [8] |
| | весь сортамент | 0,0010 ÷ 0,0015 [7] |
| Основной мартеновский скрап – рудный | низкоуглеродистая кипящая | 0,0020 ÷ 0,0035 [7] |
| | углеродистая | 0,0030 ÷ 0,0050 [14] |
| | легированная | 0,0035 ÷ 0,0060 [14] |
| Основной мартеновский скрап - процесс | среднеуглеродистая спокойная | 0,0030 ÷ 0,0065 [7] |
| | углеродистая | 0,0050 ÷ 0,0090 [14] |
| | легированная | 0,0100 ÷ 0,0110 [14] |
| Кислородно – конвертерный (при чистоте кислорода не ниже 99%) | низкоуглеродистая кипящая | 0,0025 ÷ 0,0035 [7] |
| | низкоуглеродистая спокойная (раскисленная Si и Al) | 0,0030 ÷ 0,0050 [7] 0,0025 ÷ 0,0040 [9, 14] |
| | низколегированная | 0,0050 ÷ 0,0070 [7] |
| Электросталеплавильный с полным циклом периодов плавки | рядовой сортамент | 0,0060 ÷ 0,0110 [14] 0,0060 ÷ 0,0120 [21] 0,0050 ÷ 0,0100 [127] |
| | легированные стали | 0,0200 ÷ 0,0250 [127] |
| Электросталеплавильный кислый с полным циклом периодов плавки | среднеуглеродистая литейная | 0,0050 ÷ 0,0090 [124] |
| Электросталеплавильный в сверхмощной печи с операциями окончательного рафинирования и легирования в ковше - печи | рядовой сортамент | 0,0070 [125] 0,0080 ÷ 0,0120 [15] |
| Электросталеплавильный в сверхмощной печи с применением в качестве шихты окатышей с операциями окончательного рафинирования и легирования в ковше – печи | рядовой сортамент | ≤0,004 [125, 144, 146] |

- при работе конвертеров с комбинированной продувкой и использованием азота в качестве перемешивающего газа или конвертеров с верхним дутьём с чистотой кислорода ниже 99,5% происходит увеличение содержания азота в жидком металле в последней четверти длительности плавки до уровня 40ppm [114, 176];
- сталь, выплавленная в дуговых печах, отличается повышенным содержанием азота по отношению к кислородно – конвертерной и мартеновской стали; в металле, произведенном в ДСП сверхвысокой удельной мощности, содержание азота в среднем на 0,001 % масс. выше, чем в обычных ДСП;
- применение в ДСП в качестве шихты металлизированного сырья позволяет получать содержание азота в стали на выпуске из агрегата на уровне кислородно-конвертерной и мартеновской стали.

С целью снижения среднего содержания азота в стали, выплавляемой в дуговых печах, применяются следующие технологические приемы:

- специальный подбор шихтовых материалов с низким содержанием азота [15, 125, 140, 144, 146, 181, 182];
- продувка инертным газом через днище печи во время выплавки в ДСП [146];
- увеличение количества окисляемого углерода за время выплавки в печи [15, 183];
- применение внепечной обработки стали, в том числе:
 - обработка инертным или восстановительным газом на установке ковш – печь [184-186],
 - вакуумирование стали различными способами [15, 103, 108, 121, 123, 125, 128, 132, 133, 136, 165, 174, 175, 179, 184, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193];
- защита стали от взаимодействия с атмосферой во время разливки стали [14, 194].

Практически все работы, связанные с оптимизацией шихты дуговой сталеплавильной печи с целью получения стали с низким содержанием азота [15, 125, 144, 146], направлены на подбор шихтовых материалов с низким содержанием азота и, в конечном итоге, сводятся к следующим рекомендациям:

- полная замена металлического лома с содержанием азота от 0,002 до 0,008% [125] на металлизированные окатыши [125, 144, 146] позволяет получать содержание азота в стали на выпуске из печи менее чем 0,004%,
- частичная замена металлического лома с концентрацией азота от 0,003% до 0,01% твердым чугуном, содержащим 0,002 – 0,003% азота [15];
- частичная замена металлического лома в шихте (до 39%) горячебрикетированным железом (ГБЖ) позволяет снизить содержание азота в стали на выпуске из печи на 0,001 – 0,002 % [146], аналогичное снижение содержания азота в стали при замене части лома ГБЖ отмечено и авторами работы [148];
- выплавка стали из DRI или инъекция порошкообразного DRI при выплавке на металлоломе позволяет достигать концентраций азота в металле на выпуске из печи ниже 40ppm [2, 159]
- замена углеродсодержащих материалов с высокой концентрацией азота: загружаемого с шихтой антрацита и кокса 0,5 – 1,1 % азота, вдуваемого порошка кокса 0,4 – 1,7 % азота, используемого для науглероживания кокса 0,15 % азота, на низкоазотистый кокс с содержанием азота 0,03 – 0,1 % позволяет по мнению авторов работы [15] уменьшить содержание азота в стали на выпуске на 0,0013 %;
- применение в качестве науглероживателя лигнитового коксика, содержащего повышенные количества летучих компонентов, что обеспечивает более активное перемешивание металла при науглероживании и содержание азота в готовой стали не выше 0,0035 % [182].

Максимальное снижение конечного содержания азота в электростали при подборе шихтовых материалов с низким содержанием азота по результатам обзора [123] составляет 3 ppm.

В исследовании [195], показано, что содержание азота в исходных материалах практически не влияет на конечное содержание азота даже в высокохромистых расплавах, где растворимость азота на два порядка выше, чем в сплавах на основе железа. При выплавке феррохрома в открытой дуговой ферросплавной печи для

получения высоких концентраций азота в готовом металле в шихту вводили азотированный феррохром ФХН600А со средним содержанием азота 8 % (25 % от массы завалки). При этом расчет был на получение в металле после расплавления содержания азота соответствующему пределу насыщения ~ 3 %. Однако, после расплавления шихты и выдержки под слоем шлака, азот сравнительно быстро выбрасывался в атмосферу до остаточных концентраций 0,001 %, что на три порядка ниже равновесной.

Из проведенного анализа литературных данных видно, что использование в качестве шихты продуктов прямого восстановления железа приводит к устойчивому снижению азота в готовом металле. Однако, это не связано с более низким его содержанием в исходной шихте, а объясняется особенностями технологии выплавки стали из окатышей. При работе на металлическом ломе время нахождения жидкого металла под жидким шлаком, омываемым печными газами минимально, а при использовании продуктов прямого восстановления железа это время значительно удлиняется, что улучшает условия реализации «эффекта накачки» и приводит к снижению содержания азота в металле. Так, например, при использовании в шихте 100% металлического лома в ДСП-2 Молдавского металлургического завода среднее время окислительного периода, т.е. время, в течение которого весь металл уже расплавлен и может взаимодействовать со шлаком, составляет от 15 до 25 мин. И даже в этот малый промежуток времени концентрация азота в металле снижается согласно статистическим оценкам в среднем на 0,002 % масс. В то же время при использовании в качестве шихты железорудных окатышей Оскольского электрометаллургического комбината в ДСП-3 Белорусского металлургического завода [144, 146] загрузка окатышей (100 – 120 тонн) в печь идёт со скоростью 2 т/мин при работе по методу с «жидким» стартом. То есть, расплавленный металл находится в контакте с жидким шлаком минимум 50 – 60 мин (в 2,5 – 3 раза больше чем при использовании лома), что и приводит к снижению содержания азота. Кроме того, непрерывный ввод окатышей в ванну ДСП, по свидетельству авторов [144], обеспечивает постоянное подкипание шлака, чем интенсифицирует "эффект накачки".

Замена части стального лома на твёрдый чугун, содержащий углерода значительно больше чем окатыши, по свидетельству самих авторов исследования [15] слабо способствует снижению азота в стали.

Таким образом, необходимость подбора шихтовых материалов с минимальным содержанием азота для плавки стали в открытых металлургических агрегатах не подтверждается практикой.

Общеизвестным фактом является то, что перемешивание ванны металла инертным газом или оксидом углерода, способствует дегазации металла. Распространено мнение [7, 15, 127, 155, 183], что увеличение количества окисленного углерода во время плавки в ДСП приводит к уменьшению содержания азота в металле. Однако, более внимательное рассмотрение всех имеющихся фактических данных показывает, что количество азота удалённого за счёт абсорбции пузырьками СО ничтожно мало и практически не влияет на его содержание в металле. Как отмечает автор работы [7]: *«при кипении металлической ванны на каждую тысячу объёмных единиц выделяющейся окиси углерода из металла уходит всего 2 – 4 объёмные единицы азота»*. То есть «к.п.д.» этого процесса составляет $0,2 \div 0,4$ %, и поэтому для реального снижения азота в стали требуется технологически неприемлемые количества СО или инертного газа, а также времени.

Следует также отметить, что малая эффективность этого процесса, кроме низкой диффузионной подвижности азота, связана также и с тем, что процесс абсорбции азота пузырьком газа прекращается при содержании его в пузырьке $\sim 1 \div 2$ % об. Это следует непосредственно из выражения закона Сивертса для растворов азота в расплавах на основе железа. Несмотря на это авторы [15] уверены в наличии влияния количества окисленного при выплавке углерода на содержание азота в стали на выпуске из ДСП.

1.2.1. Динамика содержания азота в жидком металле при внепечной дегазации

Внепечная обработка жидкого металла с целью уменьшения содержания азота сводится к реализации двух приёмов удаления азота, применяемых порознь или совместно – абсорбция пузырьками газа и вакуумирование.

По данным [196] снижение концентрации азота в металле за время продувки в 80-тонном ковше при удельном расходе аргона $0,2 \div 0,3$ м³/т составило от 2,3 до 15 % от исходного содержания. А.Н. Морозов с соавторами в обзоре практических результатов продувки стали в ковше инертным газом [184] отмечают, что в большинстве случаев продувка стали в ковше инертным газом не даёт положительных результатов по снижению содержания азота в металле. Лишь в отдельных случаях ими отмечено некоторое снижение содержания азота:

- при продувке стали ШХ15 в 100-тонных ковшах с интенсивностью продувки $0,027 \div 0,040$ м³/т-мин и удельным расходом аргона $0,4$ м³/т наблюдалось снижение содержания азота в стали на $11 \div 20$ % через $10 \div 15$ мин продувки,
- продувка углеродистых и легированных сталей с содержанием углерода $0,15 \div 0,65\%$ С, предназначенных для производства бесшовных труб, с интенсивностью $0,056$ м³/т-мин и средним удельным расходом аргона $1,0$ м³/т обеспечила снижение содержания азота в стали на 25% (до уровня 0,0032%) уже через 18 мин продувки.

Таким образом, по данным [184, 196] продувка стали аргоном в ковше с интенсивностью от $0,027$ до $0,056$ м³/т-мин и удельным расходом от $0,4$ до $1,0$ м³/т может обеспечить снижение содержания азота в металле от 11 до 25%. Однако, авторы работы [184] приводят данные, что в большинстве случаев удаления азота при внепечной продувке стали аргоном не происходит. Г. Кньюппель [187] отмечает, что согласно расчётным данным для успешной деазотации стали при продувке аргоном необходим удельный расход аргона $2 \div 6$ м³/т, что чрезвычайно сложно организовать при обработке в ковше.

Необходимо отметить, что при определенных режимах продувки аргоном стали в ковше, приводящим к оголению металла, происходит и обратный эффект насыщения стали азотом. Так в процессе десульфурации стали в 150-тонном ковше обработкой металла синтетическим шлаком с интенсивным перемешиванием аргоном, согласно данным автора [187] происходит повышение концентрации азота в металле на 0,001 – 0,008 %. Авторы указывают на основные факторы, влияющие на величину насыщения обрабатываемого металла:

- количество покровного шлака в ковше – чем больше шлака, тем меньше насыщение;
- величина остаточной концентрации серы в стали – чем ниже остаточное содержание серы в стали, тем выше насыщение металла азотом.

Анализируя данные, приведенные в работах [184, 187, 196], можно отметить следующее:

- удаление азота отмечалось только в случае обработки металла с низкой активностью кислорода – средне – и высокоуглеродистые, легированные раскисленные стали;
- при перемешивании аргоном сталей с низкой активностью кислорода достигается максимальная степень реализации эффекта накачки;
- продувка аргоном металла не должна вызывать оголения металла.

Снижение общего давления газовой атмосферы над расплавом влечет соответственное уменьшение парциального давления азота, что в соответствии с законом Сивертса обеспечивает необходимое условие для деазотации металла.

Общими для всех способов вакуумной деазотации стали являются следующие моменты:

- низкая эффективность снижения содержания азота – относительное снижение содержания азота находится в пределах от 5 до 25 % для нелегированных и низколегированных сталей, при использовании электромагнитного перемешивания или порционного вакуумирования степень удаления может достигать 40%;

- сильная зависимость степени удаления азота от интенсивности перемешивания металла в процессе обработки;
- усиление эффекта деазотации происходит с увеличением степени раскисленности стали.

Наиболее характерные результаты вакуумной обработки различными вариантами приведены в табл. 1.5.

Наибольшей эффективностью удаления азота из жидкого металла (свыше 40%) обладают следующие процессы внепечной обработки:

- вакуум – кислородное обезуглероживание (VOD) – до 60 %,
- вакуум – кислородное обезуглероживание с интенсивным перемешиванием нейтральным газом (SS-VOD) – свыше 90%,

Именно в этих способах наиболее полно реализуются три необходимых условия для удаления азота и стали «накачкой»:

- наличие оксидного шлака на поверхности металла,
- поддержание высокого градиента парциальных давлений кислорода между границами раздела газовая фаза – шлак и шлак металл,
- интенсивное перемешивание металла.

При этом необходимо учитывать, что высокие показатели эффективности достигаются при относительно высоких исходных содержаниях азота (0,02% масс. в среднем).

Каждая последующая технологическая операция от выпуска из сталеплавильного агрегата разливки, при которой жидкий металл может контактировать с воздухом, лишь увеличивает содержание азота, обычно на 20÷40 ppm [17]. Предельно достигаемый уровень деазотации при внепечной обработке сталей массового сортамента составляет 20÷34 ppm [197], а при исходной концентрации в 13÷38 ppm содержание азота в процессе обработки может даже повышаться [148, 198].

Таблица 1.5. Эффективность снижения содержания азота в различных способах вакуумирования стали

| Способ вакуумирования | Исходное содержание азота в стали, % масс. | Содержание азота в стали после вакуумирования, % масс. | Степень удаления азота, % | Источник |
|---|--|--|---------------------------|----------------|
| Вакуумирование в ковше нераскисленная сталь: | | | | |
| – без перемешивания углеродистая | | 0,003÷0,005 | 5÷10 | [188] |
| – без перемешивания низкоуглеродистая | | 0,004 – 0,008 | 5÷15 10÷20 | [188] [125] |
| – с продувкой инертным газом | | 0,003 – 0,007 | 10÷15 | [188] |
| – с электромагнитным перемешиванием | 0,006÷0,011 | 0,003 – 0,006 0,003 – 0,007 | 15÷25 40 | [188] [187] |
| Вакуумирование в ковше раскисленная сталь: | | | | |
| – без перемешивания конструкционная легированная и нелегированная | 0,008* | 0,007* | 12 | [187] |
| – с продувкой инертным газом | 0,0103* 0,0044 | 0,0092* 0,0034 | 10÷20 22,7* | [187] [125] |
| – с электромагнитным перемешиванием легированная | 0,0086* | 0,0086* | 0 | [187] |
| Дегазация в струе при разливке слитков; при переливе из ковша в ковш; при выпуске плавки из печи | | 0,003÷0,007 | 4÷15 до 25 | [188] [125] |
| Порционное вакуумирование (DH) | | 0,003÷0,007 | 10÷25 | [188] |
| Порционное вакуумирование (DH) конструкционная сталь 1÷2,5% Cr, 0,5÷1,0% Mo | | ≤ 0,005 (0 – 20) | 0÷20 | [125] |
| Порционное вакуумирование (DH) хромистые стали | 0,020÷0,050 | 0,020÷0,030 | 0÷40 | [125] |
| Циркуляционное вакуумирование (RH) | 13÷30 ppm | 0,003÷0,006 12÷27 ppm | 10÷25 6÷8 | [188] [193] |
| Вакуум – кислородное обезуглероживание (VOD) легированная сталь | 0,013÷0,022 | 0,005÷0,016 | 27÷61 | [188] |
| Вакуум – кислородное обезуглероживание с интенсивным перемешиванием нейтральным газом (SS-VOD) легированная сталь | 0,020÷0,040 | 0,001÷0,004 | 90÷95 | [187] |

Примечания: - * - средние значения.

1.3. Проблемы термодинамического описания растворов кислорода, углерода и азота в расплавах на основе железа и никеля

1.3.1. Раствор кислорода в железе

Особенности поведения кислорода в расплаве железа одними из первых экспериментально исследовали Ш. Маршалл и Дж. Чипман [81]. Они «пришли к выводу, что коэффициенты активности углерода и кислорода не остаются постоянными, а изменяются в зависимости от содержания в расплаве углерода» [199]. Результатом длительных дискуссий [41, 43, 47, 89, 91, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214] стало общепринятое мнение о том, что поведение кислорода в расплавах на основе железа не соответствует гипотезе разбавленных растворов, что и зафиксировано в учебных пособиях, например, [21]. Авторы работ [81, 89, 213] изучали поведение кислорода и углерода в системе расплавов железа – смесь газов CO и CO₂. При проведении экспериментов авторами работ [203, 209, 211] контролировалось соотношение парциальных давлений водяных паров и водорода в системе и содержание кислорода в металле. В работе [204] эксперименты по равновесию проводили как с использованием газовой смеси CO и CO₂, так и H₂-H₂O.

Для описания неидеальности раствора кислорода в жидком железе, как правило, используют аппарат коэффициентов активности Вагнера [215]. В литературе, например, [21, 47, 73, 216], приводится зависимость коэффициента активности кислорода в жидком железе от содержания кислорода в растворе:

$$\lg f_{[O]} = e_O^O \cdot [\%O], \quad (1.4)$$

где $[\%O]$ - концентрация кислорода в растворе железа, % масс.; e_O^O - коэффициент влияния или массовый параметр взаимодействия первого порядка.

По данным экспериментальных исследований Чипмана с сотрудниками [217, 218] при температуре 1873К значение массового параметра взаимодействия первого порядка $e_O^O = -0,2$. Согласно [219] коэффициент активности кислорода в

разбавленных жидких растворах на основе железа имеет как концентрационную, так и температурную зависимость:

$$\lg f_{[O]} = (-0,21 - 500/T) \cdot [\%O], \quad (1.5)$$

где T – температура, К.

Авторы работы [203] на основе своих экспериментальных данных делают вывод о том, что коэффициент активности кислорода зависит от температуры и окислительного потенциала газовой фазы, находящейся в равновесии с жидким раствором:

$$f_{[O]} = 1 - (2,51 - 1,19 \cdot 10^{-3} \cdot T) \cdot (P_{H_2O}/P_{H_2})^2, \quad (1.6)$$

где P_{H_2O} , P_{H_2} - парциальные давления водяных паров и водорода соответственно.

Процесс растворения кислорода в железе описывают реакцией:



варианты термодинамического описания, которой приведены в табл. 1.6.

Различия в числовых значениях изменений свободной энергии Гиббса (более 30000 Дж/моль) связаны с различным выражением концентрации кислорода: более высокие значения (-53209, -70179 Дж/моль) соответствуют выражению концентрации кислорода в мольных долях, а более низкие значения (-142679 ÷ -118473 Дж/моль) соответствуют выражению концентрации в массовых процентах.

Однако, ряд исследователей [208, 224] придерживались мнения, что раствор кислорода в жидком железе подчиняется законом разбавленных растворов, коэффициент активности кислорода зависит только от температуры и для определённой температуры является постоянным.

1.3.2. Раствор кислорода в расплаве никеля и сплавах на его основе

Растворы кислорода в расплаве никеля относятся к разбавленным и подчиняются закону Генри в широком интервале концентраций [73]. В наиболее ранних исследовательских работах [225] был сделан вывод о снижении растворимости кислорода в никеле с ростом температуры. Результаты более

поздних работ показали, что с растворимость кислорода в жидком азоте растет с увеличением температуры.

Таблица 1.6. Изменение свободной энергии Гиббса реакции растворения кислорода в жидком железе по данным различных авторов

| $\Delta G_o^0, \text{Дж/моль}$ | $\Delta G_o^0, \text{Дж/моль}$ при $T=1873\text{K}$ | Метод исследования | Источник данных, автор, год опубликования |
|--------------------------------|--|--|---|
| $-138\,416+8,54\cdot T$ | -122 418 | Равновесие в системе Fe-CO-CO ₂ | [41,81], Marshall Sh., Chipman J., 1942 |
| $-116\,937-2,39\cdot T$ | -121 407 | Равновесие в системе Fe-H ₂ -H ₂ O | [210], Dastur M.N., Chipman J., 1949 |
| $-119\,366-2,39\cdot T$ | -121 407 | Обобщение литературных данных по равновесию в системе Fe-CO-CO ₂ | [41], Chipman J., 1951 |
| $-123\,804-0,502\cdot T$ | -122 863 | Равновесие в системах Fe-H ₂ -H ₂ O, Fe-CO-CO ₂ | [204], Gokcen A., 1956 |
| $-71\,134-28,55\cdot T$ | -124 615 | Равновесие в системе Fe-H ₂ -H ₂ O | [212], Сюй Цзэн-Цзи, Поляков А.Ю., Самарин А.М., 1963 |
| $-117\,230-2,89\cdot T$ | -122 641 | Обобщение литературных данных | [43], Chipman J., Elliott J.F., 1963 |
| $-114\,383-5,57\cdot T$ | -124 813 | Обобщение литературных данных | [220], Белов Б.Ф., Новохатский И.А., Лобанов Ю.А., 1967 |
| $-181\,246+32,07\cdot T$ | -121 179 | Э.д.с. | [221], Fischer W.A., Ackermann W., 1966 |
| $-137\,118+7,79\cdot T$ | -122 527 | Э.д.с. | [221], Janke D., Fischer W.A., 1975 |
| $-117\,230+25,12\cdot T$ | -70 179 | Нет данных | [222], Swisher J.H., Turkdogan E.T., 1967 |
| $-117\,000-13,23\cdot T$ | -141 780 | Нет данных | [219], Sigworth G.K., Elliott J.F., 1974 |
| $-115\,660-14,42\cdot T$ | -142 676 | Обобщение литературных данных | [214], Chiang T., Chang Y.A., 1976 |
| $-50\,873-1,25\cdot T$ | -53 209 | Нет данных | [223] Кубашевски О., 1982 |
| $-117\,110-3,39\cdot T$ | -123 459 | Нет данных | [74], справочник, 1988 |

Так по данным справочника [226], ссылающегося на сведения из [227], растворимость кислорода в жидком Ni, определенная химическим анализом, составляет в % ат.: 5,8 при 1652°C, 5,4 при 1613°C; 3,68 при 1590°C; 2,49 при 1553°C; 1,51 при 1504°C; 1,65 при 1494°C и 1,35 при 1465°C.

Уравнения растворимости кислорода в жидком никеле имеют следующий вид:

$$\lg x_{[O]} = -10270/T + 3,95, \quad (1723 \div 1964\text{K}) \quad [228] \quad (1.8)$$

где $x_{[O]}$ – концентрация растворённого в никеле кислорода, м.д.; T – температура, К;

$$\lg [\%O] = -10270/T + 5,4, \quad (1723 \div 1964\text{K}) \quad [228] \quad (1.9)$$

где $[\%O]$ – концентрация растворённого в никеле кислорода, % масс.;

$$\ln x_{[O]} = -25080/T + 9,96, \quad (1722 \div 1859\text{K}) \quad [229] \quad (1.10)$$

$$\lg x_{[O]} = -7750/T + 4,62, \quad (1783 \div 1973\text{K}) \quad [222]. \quad (1.11)$$

Особенностью экспериментальных работ по изучению растворимости кислорода в расплаве никеля является использование системы Ni-NiO [222, 224, 228, 229].

Изменение изобарно-изотермического потенциала реакции растворения кислорода в никеле

$$1/2\{O_2\} = [O]_{Ni} \quad (1.12)$$

имеет вид зависимости линейной зависимости от температуры, при этом температурный коэффициент в эмпирических зависимостях может иметь разные знаки [230], Дж/моль:

$$\Delta G = -71500 + 1,84 \cdot T, \quad [21], 1957\text{г.} \quad (1.13)$$

$$\Delta G = -71000 + 1,406 \cdot T, \quad [231], 1977\text{г.} \quad (1.14)$$

$$\Delta G = -70940 - 8,9 \cdot T, \quad [232], 1981\text{г.} \quad (1.15)$$

$$\Delta G = -72930 - 7,11 \cdot T, \quad [233], 1986\text{г.} \quad (1.16)$$

$$\Delta G = -97070 + 5,0874 \cdot T, \quad [230], 1990\text{г.} \quad (1.17)$$

Влияние других компонентов в сплавах на основе никеля на растворимость принято описывать с помощью модели параметров взаимодействия первого порядка [21, 231].

1.3.3. Раствор углерода в железе

Изучение растворов углерода в железе активно началось ещё в 19 веке. Вопросу поведения углерода в железобуглеродистых сплавах посвящено очень

много работ. Поэтому для определения характеристик раствора углерода в жидком железе были использованы основные (определяющие) работы, описывающие экспериментальные данные. Экспериментальное изучение поведения углерода в растворах на основе железа проводилось двумя методами: выдержка расплава железа в смеси газов CO и CO₂ [81, 213, 234, 235, 236], определение потери массы железоуглеродистого металла в вакууме [237, 243]. Основные выводы исследователей – растворы углерода в железе являются реальными, углерод, растворённый в жидком железе, характеризуется значительными отклонениями от закона Рауля, причём характер этого отклонения зависит от концентрации углерода в растворе. Процесс растворения углерода (исходное состояние растворяемого компонента – чистый конденсированный углерод) описывают реакцией:

$$C = [C]. \quad (1.18)$$

Термодинамические характеристики процесса растворения углерода при образовании бесконечно разбавленного раствора углерода в железе по данным различных авторов представлены в табл.1.7.

Таблица 1.7. Изменение свободной энергии Гиббса реакции растворения твёрдого углерода в жидком железе

| $\Delta G_o^0 = f(T)$ Дж/моль | ΔG_o^0 Дж/моль при T=1873K | Единицы измерения концентрации углерода в железе | Метод исследования | Источ- ник |
|----------------------------------|---------------------------------------|--|---|---------------|
| 56 354-61,546*Т | -58 921 | Массовые проценты (% масс.) | Обобщение данных | [238] |
| 22 609-16,747*Т | -8 759 | Мольные доли (м.д.) | Равновесие в системе Fe-CO-CO ₂ | [235] |
| 37 263-50,66*Т | -57 624 | % масс. | Обобщение данных | [41] |
| 12 267-33,076*Т | -49 683 | % масс. | Измерение скорости испарения железа | [237] |
| 22 593,6-42,2584*Т | -56 556 | % масс. | Нет данных | [66] |
| 17 229-14,358*Т | -9 663 | м.д. | Равновесие в системе Fe-CO-CO ₂ | [90] |
| 21 353-41,868*Т | -57 066 | % масс. | Обобщение данных | [43] |
| 10 467-35,588*Т | -56 189 | % масс. | Обобщение данных | [212] |
| 22 609-16,663*Т | -8 602 | м.д. | Обобщение данных | [239] |
| 24 000-16,4*Т | -6 717 | м.д. | Обобщение данных | [240] |
| 44 040-17,616*Т | 11 045 | м.д. | Обобщение данных | [241] |
| 44 040-43,127*Т | -36 737 | % масс. | Обобщение данных | [241] |
| 110 429,3-62,4*Т | -6 446 | м.д. | Обобщение данных | [242] |

Коэффициент активности углерода в насыщенном растворе на основе железа предлагается определять по эмпирическим выражениям (табл.1.8).

Таблица 1.8. Уравнения для определения коэффициента активности углерода в расплавах на основе железа

| $\lg \gamma_{[C]} = f(T)$ | $\gamma_{[C]}^{\infty}$ | Температура, К | Метод исследования | Источник |
|--|-------------------------|----------------|---|----------|
| $(4350/T) \cdot [1 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot (T - 1770)] \times$ $\times (2x_{[C]} - x_{[C]}^2) - 0,97 + 1180/T$ | 0,60 | 1823 | Равновесие в системе Fe-CO-CO ₂ | [235] |
| | 0,56 | 1903 | | |
| $6,4 \cdot x_{[C]} + 900/T - 0,75$ | 0,56 | 1823 | Равновесие в системе Fe-CO-CO ₂ | [90] |
| | 0,53 | 1903 | | |
| $4,3 \cdot x_{[C]} - 0,21$ | 0,62 | 1823 ÷ 1873 | Испарение железа | [237] |
| $5,0 \cdot x_{[C]} - 0,25; (x_{[C]} < 0,045)$ | 0,56 | 1873 | Равновесие в системе Fe-CH ₄ -H ₂ | [85] |
| $2,33 \cdot (2 \cdot x_{[C]} - x_{[C]}^2) - 0,181$ | 0,66 | 1823 | Равновесие в системе Fe-CO-CO ₂ | [236] |
| $\left(\frac{3400}{T} + 0,72\right) \cdot \frac{x_{[C]}}{1 - x_{[C]}} + \left(\frac{1180}{T} - 0,87\right) -$ $-\lg(1 - 2 \cdot x_{[C]})$ | 0,60 | 1823 | Расчёт | [239] |
| | 0,58 | 1903 | | |
| $\left(\frac{5300}{T} + 0,507\right) \cdot \frac{x_{[C]}}{1 - x_{[C]}} + \left(\frac{694}{T} - 0,587\right)$ | 0,62 | 1823 | Испарение железа | [243] |
| | 0,60 | 1903 | | |

1.3.4. Раствор углерода в расплаве никеля

Левый (углеродный) высокотемпературный угол диаграммы фазового равновесия бинарной системы Ni-C конгруэнтен аналогичной области диаграммы Fe-C [223, 225, 226, 227]. Растворимость углерода в жидком никеле увеличивается с ростом температуры и по данным [244, 245] и составляет в % ат. 10,9 при 1450°C, 11,9 при 1500°C; 12,5 при 1550°C; 25,0 при 2490°C.

В температурном диапазоне 1673÷1973К растворимость кислорода описывается выражением

$$\lg x_{[C]} = 1,55 - 896/T, \quad [244] \quad (1.19)$$

где $x_{[C]}$ – концентрация растворённого в никеле углерода, м.д.; T – температура, К.

Для оценки изменения свободной энергии Гиббса реакции растворения графита в жидком никеле в температурном интервале 1673÷1973 К используют выражение [222] (Дж/моль):

$$\Delta G = 17154 + 8,79 \cdot T. \quad (1.20)$$

Более поздние исследования [246] уточняют зависимость растворимости углерода в жидком никеле в более широком температурном диапазоне 1550÷2300°С:

$$\lg[at\%C] = 2,0376 - 1874,68/T \quad (1.21)$$

где $[at\%C]$ – концентрация углерода в растворе жидкого никеля, % ат.; T – температура, К.

Сравнивая данные о растворимости с результатами оценки активности углерода в растворе никеля [247] Красовский и Григорович отметили отрицательные отклонения раствора углерода в жидком никеле от закона Рауля.

Основные легирующие компоненты промышленных сплавов на основе никеля (хром, молибден, ниобий, вольфрам, кобальт, титан, ванадий) увеличивают растворимость углерода в жидких сплавах на основе никеля [222].

1.3.5. Раствор кислорода и углерода в железе

Ключевые эксперименты по изучению жидких растворов системы Fe-C-O описаны в работах [74, 81, 89, 90, 91, 212, 213, 216, 237, 248, 249, 250, 251, 252].

Маршалл и Чипман [81] наблюдали в твёрдом металле раковины, образованные пузырями CO, образующимися во время охлаждения и кристаллизации металла. Исследуемые образцы содержали углерод в диапазоне от 0,02% до 2% масс. Опыты проводили как при атмосферном давлении, так и при повышенном вплоть до 20 атм. Для предотвращения неконтролируемого газообразования они вводили в расплав небольшое количество алюминия до закалки металла

Экспериментальные данные Бан-я и Матоба [90, 248] были главным образом, использованы для термодинамического описания системы Fe-C-O в оценке японского справочника данных по исследованию процессов производства стали [74]. Эксперименты Бан-я и Матобы заключались в исследовании равновесного состояния железоуглеродистого расплава в тиглях из CaO или MgO с газовой фазой с различным соотношением $\{\%CO\}/\{\%CO_2\}$. Опыты проводились в индукционной печи. После выдержки расплава по достижению равновесного состояния тигли для быстрого охлаждения выводились из зоны индукционного нагрева. Для предотвращения выделения газов при охлаждении и кристаллизации расплавов с содержанием углерода менее 0,3% масс. в металл вводили алюминий из расчёта примерно 0,5% масс. за 15 секунд до выключения питания печи. В металл, содержащий более 0,4% масс. углерода алюминий перед охлаждением не добавлялся. Содержание кислорода в образцах металла определяли методом вакуум-плавления. Авторы указывают на сложность в достижении равновесного состояния системы с высокими содержаниями углерода, связанную с трудностью контроля малых величин соотношения $\{\%CO\}/\{\%CO_2\}$, например, для достижения содержания углерода в расплаве на уровне 2% масс. необходимо было контролировать указанное выше соотношение газов на уровне 5×10^{-4} , что затруднительно технически.

Шенк с коллегами [251] использовал для исследований герметизированный графитовый тигель. К 100÷200 г железоуглеродистого сплава в тигель в качестве окислителя добавляли 1-2 г твёрдого оксида железа (III) Fe₂O₃. При этом общее давление в системе не контролировалось, что вносит, конечно, дополнительную погрешность при определении равновесного содержания кислорода. Поэтому результаты экспериментов Шенка малодостоверны для описания равновесия исследуемой системы.

Фишер и Янке [252] исследовали равновесие углерод – кислород в железоуглеродистых расплавах с широким диапазоном концентраций углерода от 0,01% масс. до состояния насыщенного раствора при температуре 1600°C и давлении 1 атм. Опыты проводили в тиглях из CaO, MgO и графита. Эксперименты

проводились по методу обезуглероживания. Активность кислорода в расплаве определяли методом э.д.с. Полученные результаты характеризовались большой степенью разброса данных.

Фува и Чипман [89] исследовали систему Fe-C-O более тщательно и сообщили о возможности существенных погрешностей в содержании кислорода предыдущих экспериментов включая их собственные эксперименты, при использовании добавок алюминия, поскольку ввод алюминия в расплав увеличивает растворимость кислорода в исследуемой системе. Таким образом, они проводили эксперименты при содержании углерода в расплаве более 2% масс. При этом ввод алюминия в металл перед кристаллизацией не требовался. Кроме того, они определили, что кислород или водяной пар могли быть легко адсорбированы пористой графитизированной поверхностью сплава, которая образуется при проведении опытов в графитовых тиглях. В образцах металла, полученных сразу после расплавления без выдержки для достижения равновесия в системе содержание кислорода составляло 3ppm. масс., а в образце металла, прилегающего к графитизированной поверхности после проведения выдержки, содержание кислорода повышалось от 4ppm. до 20ppm. Основываясь на этом результате, авторы пришли к заключению, что во всех предыдущих результатах экспериментах мог быть зафиксирован избыточный кислород в исследуемых образцах металла. Например, авторы сообщают о равновесном содержании кислорода в расплаве железа, содержащем 2 % масс. углерода, в 7 ppm. при температуре 1540°C и давлении CO в 1 атм., в то время как Бан-я и Матоба [90, 248] фиксируют содержание кислорода на уровне 20÷30 ppm. при тех же условиях эксперимента.

Мацумото [250] проводил эксперименты при содержании углерода в металле выше в 1 % масс. без добавления алюминия при давлении CO в системе 1, 4, 8 и 16 атм. и температуре 1500°C. Полученные им результаты совпадают с результатами Фувы и Чипмана [89]. Особенностью экспериментов Мацумото [250] является предварительная подготовка части исходных образцов железоуглеродистых сплавов, заключающаяся в получении требуемого состава сплава путем предварительного расплавления электролитического железа и углерода в

вакуумной печи. Содержания кислорода в образцах металла, полученного после выдержки для достижения равновесия, из предварительно сплавленных материалов и из механической смеси электролитического железа с углеродом совпадали в пределах ошибки эксперимента. Содержание кислорода в металле определяли методом вакуум-плавления.

Для достижения высоких концентраций углерода и минимизации выделения газов из металла при его остывании и кристаллизации Эль-Каддах и Робертсон [213] использовали плавку металла во взвешенном состоянии при повышенном до 80 атм. давлении газовой фазы. Интервал исследуемых температур составил от 1550 до 1750°C. Анализ на содержание кислорода в металле проводился с помощью метода вакуум-плавления. Как показали эксперименты при остывании образцов металла с содержанием углерода менее 2% масс. при температуре 1750°C наблюдалось выделение газа из металла. Для предотвращения этого в жидкий металл за 20 секунд до выключения нагревателя добавляли алюминий из расчёта его содержания 0,05% масс.

Определённые в перечисленных исследованиях коэффициент Генри для углерода, растворённого в железе, массовые параметры взаимодействия первого порядка довольно сильно различаются по величине (табл.1.9).

При всей полноте экспериментальных данных по основной для чёрной металлургии системе Fe-C-O, вопрос о влиянии кислорода на поведение углерода в расплаве железа по-прежнему остаётся открытым ввиду разных по знаку оценок массовых параметров взаимодействия первого порядка кислород – углерод e_o^C (табл. 1.9).

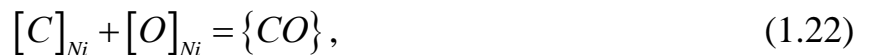
Приведенные выше результаты согласуются с определением величины массового параметра взаимодействия для углерода, полученных при анализе равновесных данных по сплавам железа, насыщенных углеродом (для T=1873K): $e_C^C = 0,191$ [235], $e_C^C = 0,2$ [236], $e_C^C = 0,142$ [239], $e_C^C = 0,14$ [243].

Таблица 1.9. Сравнение результатов экспериментов по изучению расплавов системы железо – углерод – кислород

| Источник данных | Условия эксперимента | | | Значения массовых параметров взаимодействия | | | Коэффициент активности | |
|---------------------|----------------------|--------------|---------|---|---------|---------|------------------------|-----------------------|
| | T, °C | [%C] | P, атм. | e_o^c | e_c^c | e_o^o | $\gamma_{[c]}^\infty$ | $\gamma_{[o]}^\infty$ |
| [81] | 1540 – 1700 | до 2,5 | 1 – 20 | <0 | | | | |
| [90, 248] | 1460 – 1760 | 0,1 – 2,5 | 1 | -0,421 | 0,298 | | 0,55 при 1560°C | |
| [249] | 1600 | 3,39 – 5,53 | 1 | -0,32 | | | | |
| [89] | 1540 – 1600 | от 2 до нас. | 1 | -0,13 | | | | |
| [79] | 1550 – 1750 | 0,15 – 4,7 | 5 – 70 | 0,1 | | | | |
| [213] | 1200, 1500 | нас. | 0 – 25 | 0,05 | | | | |
| [91, 212, 216, 237] | 1550, 1600 | | 1 | -0,33 | | | 0,617 при 1600°C | |
| [74] | 1600 | | | -0,421 | | -0,17 | 0,538 | |

1.3.6. Раствор кислорода и углерода в расплаве никеля

По данным Куликова [33] со ссылкой на эксперименты В.Т. Бурцева с сотрудниками равновесие в системе Ni-C-O описывается реакцией



характеризуется следующей оценкой изменения энергии Гиббса (Дж/моль):

$$\Delta G = -64685 - 40,33 \cdot T. \quad (1.23)$$

Для реакции растворения графита в никеле

$$C_{solid} = [C]_{1\%} \quad (1.24)$$

Куликов [33] рекомендует к использованию не уравнение изменения энергии Гиббса:

$$\Delta G = 6255 - 34,85 \cdot T, \quad (1.25)$$

образующееся путем учета изменения свободной энергии при образовании оксида углерода из графита и кислорода, а также реакции растворения кислорода в никеле, а уточнённое выражение энергии Гиббса:

$$\Delta G = 10795 - 36,94 \cdot T. \quad (1.26)$$

По данным Дашевского [253] зависимость равновесного содержания кислорода в тройной системе Ni-C-O от парциального давления CO и содержания углерода в расплаве при температуре 1873 К имеет вид:

$$\begin{aligned} \lg [\%O]_{Ni} = & -4,419 + \lg P_{CO} - \lg [\%C]_{Ni} + 0,153 \cdot [\%C]_{Ni} + \\ & + 1,64 \cdot 10^{-5} \cdot P_{CO} / [\%C]_{Ni} \end{aligned} \quad (1.27)$$

1.3.7. Раствор азота в расплавах железа и сталей

Многочисленные исследования поведения азота в жидком железе и сплавах на его основе показали [96, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319], что равновесная концентрация азота, растворенного в жидком железе при температуре от точки плавления до 2500°C и широком диапазоне давлений азота в газовой фазе (от 0,1 МПа до 4 МПа), описывается законом Сивертса или законом квадратного корня:

$$[N] = K_N \cdot P_{N_2}^{1/2}, \quad (1.28)$$

где $[N]$ - содержание азота в железе; K_N - константа растворения азота в железе; P_{N_2} - парциальное давление молекулярного (двухатомного) азота в газовой фазе металлургической системы.

Выполнимость закона Сивертса для расплавов железа начинает нарушаться при увеличении давления азота выше 100 атм. [287].

При проведении экспериментов использовались оба варианта методики Сивертса (изобарный и изохорный) а также метод закалки проб. При накоплении свежих данных выходят обзорные публикации по растворимости азота в жидком

железе и влиянию третьих компонентов в сплаве на отклонение содержания азота, самые подробные из них [73, 222, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326].

Помимо исследований по влиянию третьих компонентов на уровень растворимости азота в расплавах железа проводилась масса экспериментов по изучению растворимости азота в жидких сталях и в сплавах, как на железной основе, так и на основе никеля, хрома, марганца [327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350]. Было показано, что значительные добавки легирующих компонентов (хром, марганец) существенно влияют на выполнимость закона Сивертса даже при давлениях близких к одной атмосфере.

Достаточно подробно были изучены и кинетические особенности поглощения азота жидким металлом и процесс десорбции азота из раствора [351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364].

На основе анализа экспериментов были составлены термодинамические модели, описывающие растворы азота в жидком железе и сплавах на его основе [365, 366, 367, 368, 369, 370, 371].

Зависимость константы растворимости азота в жидком железе от температуры приводят в следующем виде:

$$\lg K_N = A/T + B, \quad (1.29)$$

где A , B – эмпирические коэффициенты, T – температура, K . Значения коэффициентов A и B приведены в табл. 1.10.

Растворимость азота в сплавах как на основе железа так и на основе никеля сильно зависит от вида элемента, образующего сплав с железом. Все компоненты и примеси железных сплавов по степени влияния на растворимость азота в расплаве металла можно разделить на пять групп [21, 222, 264, 276, 320, 326]:

1. в первую входят переходные металлы IIIb и IVb подгрупп Периодической системы – титан, цирконий, гафний, скандий, иттрий и все лантаноиды, которые в свободном состоянии образуют с азотом термохимически прочные нитриды. Эти элементы резко повышают растворимость азота в железе;

Таблица 1.10. Значения эмпирических коэффициентов уравнения (1.29)

| Температура экспериментов, °С | Значения коэффициентов | | Литературный источник |
|-------------------------------|------------------------|--------|-----------------------|
| | А | В | |
| --- | -665 | -1,0 | [258] |
| --- | -767 | -0,95 | [259] |
| --- | -399 | -1,126 | [274] |
| 1536 ÷ 1750 | -251 | -2,06 | [283] |
| 1550 ÷ 2550 | -850 | -0,905 | [293] |
| расчёт | -247 | -1,22 | [296] |
| 1600 ÷ 1700 | -941 | -0,841 | [297] |
| 1550 ÷ 1700 | -560 | -1,06 | [308] |
| 1700 ÷ 2600 | -1100 | -0,79 | [308] |
| 1580 ÷ 1650 | -375 | -1,154 | [14] |
| 1556 ÷ 1770 | -188 | -1,25 | [263, 320] |
| | -226 | -1,217 | [333] |
| | -297 | -1,198 | [322] |
| | -400 | -1,126 | [323] |
| | -518 | -1,063 | |
| | -430 | -1,125 | [339] |

2. вторую группу образуют элементы Vb, VIb, и VIIb подгрупп Периодической системы – ванадий, ниобий, хром, тантал, марганец, молибден, вольфрам. Они тоже относятся к переходным металлам, образующим нитриды, но в отличие от элементов первой группы их нитриды не столь прочны термодинамически.

3. Все эти элементы при давлении азота 0,1 МПа в жидком железе при концентрациях, встречающихся в сталях, нитридов не образуют, однако заметно увеличивают растворимость азота в жидком расплаве;

4. Третью группу составляют углерод, бор, кремний, фосфор – элементы, которые резко снижают растворимость азота в железе;

5. Четвертая группа состоит из меди, олова, мышьяка, серы, сурьмы, селена, теллура, никеля и кобальта. Перечисленные элементы незначительно снижают растворимость азота в железе;

6. Пятую группу составляет кислород. Изучение влияния кислорода на растворимость азота в жидком железе выявило неоднозначную картину (рис.1.5): в некоторых случаях кислород способствует увеличению растворимости, в некоторых – не влияет на растворимость и части исследований наличие кислорода

способствует снижению растворимости азота в железе. Для уточнения его влияния необходимы дополнительные эксперименты.

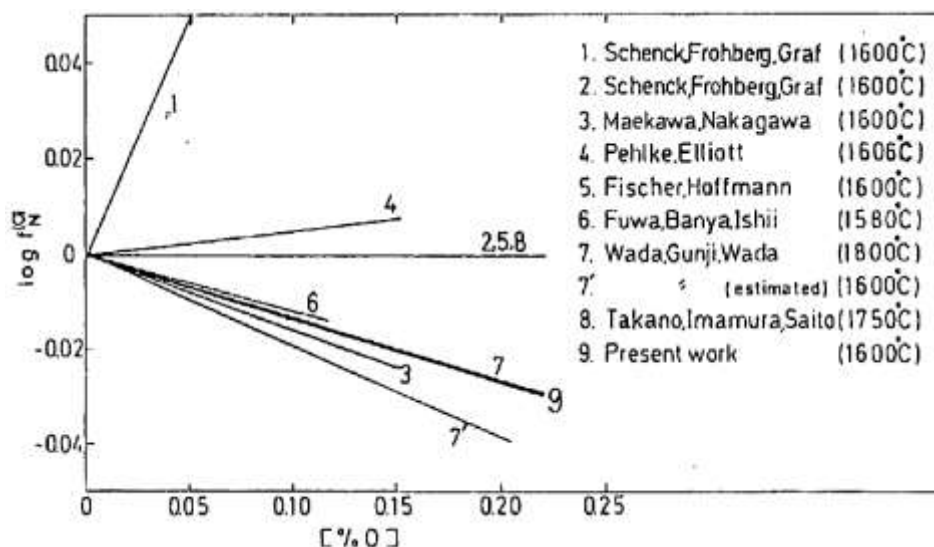


Рисунок 1.5. Влияние содержания кислорода в расплаве железа на коэффициент активности азота по данным различных авторов (рисунок из работы [305])

Учет влияния компонентов стали на растворимость описывается тремя способами:

- способ А – с помощью математического аппарата параметров взаимодействия [130, 165, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 381],
- способ Б – при помощи понятия эквивалентных концентраций [276, 382, 383, 384, 385] и
- способ В – эмпирическими зависимостями [386, 387, 388, 389, 390, 391].

Основные уравнения, используемые для прогнозирования содержания азота в стальных расплавах:

- уравнение Чипмана Дж. и Корригана Д.А. (1965г.) [372], способ А:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{188}{T} - 1,25 - \left(\frac{3280}{T} - 0,75 \right) \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0,13[C] + 0,047[Si] - 0,023[Mn] - \\ -0,045[Cr] + 0,01[Ni] - 0,011[Mo] - \\ -0,002[W] + 0,01[Co] - 0,1[V] + \\ +0,006([Cu] + [Sn]) - 0,067[Nb] - \\ -0,034[Ta] \end{array} \right\} \quad (1.30)$$

– система уравнений Шюрмана Э. и соавторов (1967г.) [276], способ Б:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} + \lg K - \lg f_N \quad (1.31)$$

$$0 \leq [\%C]_{eq} \leq 6 \Rightarrow \lg f_N|_{1873K} = 0,123[\%C]_{eq} + 0,003[\%C]_{eq}^2 \quad (1.32)$$

$$-12 \leq [\%C]_{eq} \leq 0 \Rightarrow \lg f_N|_{1873K} = 0,123[\%C]_{eq} + 0,00225[\%C]_{eq}^2 \quad (1.33)$$

$$[\%C]_{eq} = \left\{ \begin{array}{l} [C] + 0,673[B] + 0,444[Si] + 0,395[P] + 0,136[S] + 0,0813[Ni] + \\ + 0,077[Co] + 0,0463[Cu] - 0,013[W] - 0,094[Mo] - 0,163[Mn] - \\ - 0,382[Cr] - 0,281[Ta] - 0,569[Nb] - 0,85[V] - 5,36[Zr] - 7,88[Ti] \end{array} \right\} \quad (1.34)$$

$$\lg f_N|_T = (3280/T - 0,75) \cdot \lg f_N|_{1873K} \quad (1.35)$$

– уравнение Владимирова Н.Ф. (1973г.) [386, стр.90], способ В:

$$[\%N] = 1,97 + 0,0325[Cr] + 0,021[Mn] + 0,097[V] - 0,0236[Ni] - 1,425 \cdot 10^{-3}T \quad (1.36)$$

– уравнение Вады Х. и Пелке Р.Д. (1977г.) [373], способ А:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{247}{T} - 1,22 - \left(\frac{4780}{T} - 1,51 \right) \lg f_{N,1873K} - \left(\frac{1760}{T} - 0,91 \right) (\lg f_{N,1873K})^2, \quad (1.37)$$

$$\lg f_{N,1873K} = \left\{ \begin{array}{l} -164[Cr] + 8,33[Ni] - 33,2[Mo] - 134[Mn] + \\ 1,68[Cr]^2 - 1,83[Ni]^2 - 2,78[Mo]^2 + 8,82[Mn]^2 + \\ + (1,6[Ni] + 1,2[Mo] + 2,16[Mn]) \cdot [Cr] + \\ + (-0,26[Mo] + 0,09[Mn]) \cdot [Ni] \end{array} \right\} / T + \left\{ \begin{array}{l} 0,0415[Cr] + 0,0019[Ni] + 0,0064[Mo] + 0,035[Mn] - \\ - 0,0006[Cr]^2 + 0,001[Ni]^2 + 0,0013[Mo]^2 - \\ + -0,0056[Mn]^2 + \left(\begin{array}{l} -0,0009[Ni] - 0,0005[Mo] - \\ -0,0005[Mn] \end{array} \right) \cdot [Cr] + \\ + (0,0003[Mo] + 0,0007[Mn]) \cdot [Ni] \end{array} \right\} \quad (1.38)$$

– уравнение Григоренко Г.М. и Помарина Ю.М. (1989г.) [130], способ А:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{293}{T} - 1,16 - \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{3757}{T} - 0,81 \right) \sum_{R=1}^k e_{N,2073K}^R [\%R] + \\ & \left(\frac{5132}{T} - 1,48 \right) \frac{1}{2} \sum_{R=1}^k r_{N,2073K}^R [\%R]^2 + \\ & \frac{1}{6} \sum_{R=1}^k q_{N,2073K}^R [\%R]^3 \end{aligned} \right\} \quad (1.39)$$

– уравнение Григоренко Г.М. и Помарина Ю.М. (1989г.) [130], способ А:

$$\lg[N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{293}{T} - 1,16 - \left\{ \begin{aligned} & \left(-\frac{348}{T} + 0,07 \right) [V] + \frac{1}{2} \left(\frac{6,2}{T} - 5 \cdot 10^{-5} \right) [V]^2 + \left(-\frac{235}{T} + 0,056 \right) [Nb] + \\ & + \left(-\frac{167}{T} + 0,042 \right) [Cr] + \frac{1}{2} \left(\frac{3,3}{T} - 0,001 \right) [Cr]^2 + \frac{1}{6} \left(-\frac{0,039}{T} + 1,2 \cdot 10^{-5} \right) [Cr]^3 + \\ & + \left(-\frac{102}{T} + 0,018 \right) [Ta] + \left(-\frac{73}{T} + 0,022 \right) [Mn] + \frac{1}{2} \left(\frac{0,81}{T} - 3,8 \cdot 10^{-4} \right) [Mn]^2 + \\ & + \left(-\frac{34}{T} + 0,0061 \right) [Mo] + \left(-\frac{3,6}{T} - 0,0039 \right) [W] + \left(\frac{18,4}{T} + 4,2 \cdot 10^{-4} \right) [Ni] + \\ & + \left(\frac{171}{T} - 0,031 \right) [Si] + \left(\frac{274}{T} - 0,06 \right) [C] + \frac{1}{2} \left(-\frac{28}{T} + 0,035 \right) [C]^2 + \\ & + \left(\frac{1640}{T} - 1,14 \right) [O] \end{aligned} \right\} \quad (1.40)$$

– система уравнений соавторов Сатир-Колорц А.Х. и Файхтингера Х.К. (1991г.), [382] и коллектива Форч К., Штайн Г., Мензель Дж. (1991г.) [383], способ Б:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} + \lg K - \lg f_N \quad (1.41)$$

$$\lg f_N|_{1873K} = -0,048 [Cr]_{eq} + 3,6 \cdot 10^{-4} [Cr]_{eq}^2 + 0,13 [N] \quad (1.42)$$

$$\lg f_N|_T = \left(\frac{3280}{T} - 0,75 \right) \cdot \lg f_N|_{1873K} \quad (1.43)$$

$$[Cr]_{eq} = \left\{ \begin{aligned} & 19,4 [Ti] + 13,13 [Zr] + 2,05 [V] + 1,05 [Nb] + [Cr] + 0,69 [Ta] + \\ & + 0,5 [Mn] + 0,27 [Mo] + 0,04 [W] - 0,2 [Co] - 0,22 [Ni] - \\ & - 0,12 [Cu] - 0,2 [As] - 0,16 [Sn] - 0,2 [Sb] - 0,85 [Al] - \\ & - 0,9 [Si] - [P] - 1,73 [B] - 2,46 [C] - 2,7 [N] \end{aligned} \right\} \quad (1.44)$$

– уравнение Лакомского В.И. (1992г.) [374], способ А:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{293}{T} - 1,16 - \sum_{i=1}^k e_N^i [\%i] - \sum_{i=1}^k r_N^i [\%i]^2 - \sum_{i=1}^k q_N^i [\%i]^3 \quad (1.45)$$

– система уравнений Ансона Д.Р. и соавторов (1996г.) [387], способ В:

$$\lg[N] = 1/2 \lg P_{N_2} + 1467,6/T - 1,28 - \lg f_N \quad (1.46)$$

$$\begin{aligned} \lg f_N = e_{N_{Fe20Cr}}^{Cr} \cdot ([\%Cr] - 20) + \sum_{j=1, j \neq Cr}^k e_{N_{Fe20Cr}}^j \cdot [\%J] = \\ = \left(-\frac{185,45}{T} + 0,0694 \right) \cdot ([\%Cr] - 20) + \left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{85,569}{T} - 0,0371 \right) \cdot [Ni] + \\ + \left(0,0701 - \frac{155,68}{T} \right) \cdot [Mn] + \\ + \left(\frac{49,89}{T} - 0,0344 \right) \cdot [Mo] + \\ + \left(\frac{358,87}{T} - 0,0724 \right) \cdot [C] \end{array} \right\} \quad (1.47) \end{aligned}$$

– уравнение Медовара Б.И. и соавторов (1996г.) [375], способ А:

$$\begin{aligned} \lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{293}{T} - 1,16 - \\ - \left(\frac{3757}{T} - 0,81 \right) \left\{ \begin{array}{l} 0,072[C] + 0,051[Si] - 0,015[Mn] - \\ - 0,039[Cr] - 0,0103[Mo] + 0,0092[Ni] - \\ - 0,095[V] - 0,0056[W] - 0,059[Nb] - \\ - 0,031[Ta] - 0,35[O] + 0,44[N] \end{array} \right\} + \\ + 0,5 \left(\frac{5132}{T} - 1,48 \right) \left\{ \begin{array}{l} 0,0215[C]^2 \Big|_{[C]>0,5\%} + 5 \cdot 10^{-6} [Mn]^2 \Big|_{[Mn]>50\%} + \\ + 5,8 \cdot 10^{-4} [Cr]^2 \Big|_{[Cr]>10\%} + 2,49 \cdot 10^{-3} [V]^2 \Big|_{[V]>4\%} + \\ + 6,8 \cdot 10^{-4} [Nb]^2 \Big|_{[Nb]>6\%} \end{array} \right\} + \\ + \frac{1}{6} \left(\frac{8124}{T} - 3,06 \right) \left\{ \begin{array}{l} -6,8 \cdot 10^{-6} [Cr]^3 \Big|_{[Cr]>40\%} - 4,01 \cdot 10^{-6} [V]^3 \Big|_{[V]>20\%} \end{array} \right\} \quad (1.48) \end{aligned}$$

– уравнения Кобелли П. и соавторов (2003г.) [389], способ В:

$$[\%N] = 0,05[Cr] + 0,03[Mn] - 0,75, \quad (1.49)$$

$$[\%N] = 0,066[Cr] + 0,02[Mn] + 0,19[C] - 0,025[Ni] + 0,05[Mo] - 1,05 \quad (1.50)$$

прогноз растворимости азота в расплавах системы Fe-Cr-Mn-Ni-Mo-C-N;

– система уравнений Ригиной Л.Г. (2005г.) [385], способ Б:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{560}{T} - 1,06 + \left(\frac{700}{T} - 0,37 \right) - \left(\frac{2600}{T} - 0,39 \right) \left\{ -0,048[\%Cr]_{eq} + 3,5 \cdot 10^{-4} [\%Cr]_{eq}^2 + 0,13[N] \right\} \quad (1.51)$$

$$[\%Cr]_{eq} = [Cr] + 0,5[Mn] - 2,45[C] - 0,9[Si] - 0,23[Ni] + 0,27[Mo] + 2,04[V] - 0,12[Cu] - 0,15[S] - [P] \quad (1.52)$$

– уравнение Свяжина А.Г. и соавторов (2005г.) [165, 380, 381], способ А:

$$\lg[N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{850}{T} - 0,905 - \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{90}{T} + 0,47 \right) [C] + \left(\frac{35}{T} + 0,03 \right) [Si] + \left(-\frac{45}{T} + 0,006 \right) [Mn] + \\ & + \left(\frac{17,3}{T} - 1,2 \cdot 10^{-4} \right) [Ni] + \left(\frac{23}{T} - 0,0053 \right) [S] + \left(\frac{148}{T} - 0,034 \right) [P] + \\ & + \left(-\frac{171}{T} + 0,043 \right) [Cr] + \left(-\frac{424}{T} + 0,106 \right) [V] + \left(-\frac{3500}{T} + 1,27 \right) [Ti] + \\ & + \left(-\frac{77}{T} - 0,026 \right) [Mo] + \left(\frac{115}{T} - 0,025 \right) [N] \end{aligned} \right\} - \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{60}{T} - 0,022 \right) [C]^2 + 8 \cdot 10^{-4} [Si]^2 - 4 \cdot 10^{-4} [Mn]^2 \\ & + \left(\frac{0,206}{T} + 3,8 \cdot 10^{-6} \right) [Ni]^2 + \left(\frac{0,7}{T} - 2 \cdot 10^{-4} \right) [Cr]^2 + \\ & + \left(\frac{6,1}{T} - 0,00195 \right) [V]^2 + \left(\frac{0,32}{T} - 1,4 \cdot 10^{-4} \right) [Mo]^2 \end{aligned} \right\} - \left\{ \begin{aligned} & 0,01[C][Si] - 0,0009[Si][Mn] + 0,02[Mn][C] + 0,0037[N][Cr] + \\ & + 0,0034[N][Mn] + 0,009[N][V] \end{aligned} \right\} - \left\{ -2,5 \cdot 10^{-5} [N][Cr]^2 - 4,5 \cdot 10^{-5} [N][V]^2 \right\} \quad (1.53)$$

– уравнение Цзяна Ч. и соавторов (2005г.) [376], способ А:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg \left(\frac{P_{N_2}}{P^\circ} \right) - \frac{188}{T} - 1,17 - \left(\frac{3280}{T} - 0,75 \right) \cdot \left\{ \begin{array}{l} 0,13[N] + 0,118[C] + 0,043[Si] + \\ + 0,011[Ni] + 3,5 \cdot 10^{-5} [Ni]^2 - 0,024[Mn] + \\ + 3,2 \cdot 10^{-5} [Mn]^2 - 0,011[Mo] + \\ + 7,9 \cdot 10^{-5} [Mo]^2 - 0,048[Cr] + \\ + 3,5 \cdot 10^{-4} [Cr]^2 + \delta_N^p \lg \sqrt{\frac{P_{N_2}}{P^\circ}} \end{array} \right\} \quad (1.54)$$

- уравнение Шпайделя М.О. и соавторов (2006г.) [390], способ В, прогноз растворимости азота при температурах 1460-1500°C и атмосферном давлении азота в расплавах системы Fe-Cr-Mn-Ni-Mo-N:

$$[\%N] = 0,067[Cr] + 0,02[Mn] + 0,04[Mo] - 0,01([Ni] - 1) \quad (1.55)$$

- уравнение Рийпи Я. и соавторов (2009г.) [388], способ В:

$$[N \text{ масс.}\%] = \left(\begin{array}{l} (-11,786m_{Cr}^2 + 1,8136m_{Cr} - 0,2325)m_{Ni} + \\ + 9,6786m_{Cr}^2 - 1,1532m_{Cr} + 0,1518 \end{array} \right) \cdot \sqrt{P_{N_2}} \quad (1.56)$$

где [N масс.%] - равновесное содержание азота в стальном расплаве в масс.%, m_{Cr} - массовая доля хрома в стальном расплаве, m_{Ni} - массовая доля никеля в стальном расплаве и P_{N_2} - парциальное давление азота в газовой фазе, контактирующей со сталью;

- уравнение Ли-Юаня С. и соавторов (2011г.) [377, 378], способ А:

$$\lg[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{188,052}{T} - 1,17 - \left(\begin{array}{l} 0,13[C] + 0,047[Si] - 0,02[Mn] + 0,007[S] + \\ + 0,045[P] + 0,05[O] - 0,011[Mo] + 0,01[Ni] - \\ - 0,047[Cr] + 0,009[Cu] \end{array} \right) - \left(1,5 \cdot 10^{-4} [Mn]^2 + 2,8 \cdot 10^{-4} [Cr]^2 \right) \quad (1.57)$$

- уравнение Киджака Дж. и соавторов (2012г.) [379], способ А:

$$\lg[N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{644}{T} - 0,999 - \left[\begin{aligned} & \left(\frac{90}{T} + 0,47 \right) [C] + \left(\frac{35}{T} + 0,03 \right) [Si] + \left(-\frac{5}{T} + 0,006 \right) [Mn] + \\ & + \left(\frac{148}{T} - 0,034 \right) [P] + \left(\frac{23}{T} - 0,0053 \right) [S] + \\ & + \left(-\frac{164}{T} + 0,0415 \right) [Cr] + \left(-\frac{316}{T} + 0,053 \right) [V] + \\ & + \left(-\frac{4835}{T} + 2,04 \right) [Ti] + \left(-\frac{322,2}{T} + 0,04 \right) [Al] \end{aligned} \right] - \left\{ \begin{aligned} & \left(\frac{60}{T} - 0,022 \right) [C]^2 + 8 \cdot 10^{-4} [Si]^2 - 4 \cdot 10^{-4} [Mn]^2 + 3,6 \cdot 10^{-4} [Cr]^2 \right\} - \\ & - (0,01 [C][Si] - 0,0009 [Si][Mn] + 0,02 [Mn][C]) \end{aligned} \right. \quad (1.58)$$

– уравнение Науменко В.В. (2012г.) [391], способ В:

$$\lg[\% N] = -1,225 - \frac{306}{T_{кр}} - \frac{1873}{T_{кр}} \lg f_N. \quad (1.59)$$

где $T_{кр}$ - температура кристаллизации Fe-Cr-Ni-N-Si коррозионностойкой стали.

Из выше перечисленных элементов, влияющих на растворимость азота в расплавах на основе железа, акцентируем внимание на влиянии углерода на растворимость азота в жидком железе, так как углерод – это практически единственный легирующий компонент, который присутствует в стали на протяжении всего цикла выплавки в сталеплавильных агрегатах в количествах, способных повлиять на растворимость азота в металлическом расплаве, и с другой стороны, его влияние на растворимость азота однозначно, в отличие от кислорода.

В работе [279] была изучена растворимость азота в расплавах железо – углерод при температурах 1750÷2150°С. При этом было подтверждено, что во всем интервале температур раствор азота подчиняется закону квадратного корня. По данным работы [261] этот закон выполняется для раствора азота в железоуглеродистых сплавах и в интервале температур 1500÷1650°С. Автором работы [392] предложено уравнение для определения равновесной концентрации азота (% по массе) в железоуглеродистых расплавах:

$$[\%N] = \frac{1}{2} \lg P_{N_2} - \frac{664}{T} - 0,999 - \left(\frac{386}{T} - 0,158 \right) \cdot [\%N] - \left(\frac{280}{T} - 0,053 \right) \cdot [\%C] - \left(\frac{74}{T} - 0,047 \right) \cdot [\%C]^2, \quad (1.60)$$

где $[\%C]$ - концентрация углерода в сплаве, % масс. (392)

1.3.8. Раствор азота в расплавах никеля и его сплавах

Растворимость азота в жидком никеле при давлении 101325 Па и температуре 1873 К измеренная различными экспериментальными методами чрезвычайно мала [393, 394] и близка к величине 0,001 % масс. (табл.1.11).

Таблица 1.11. Растворимость азота в жидком никеле при 1873 К и давлении 101325 Па

| Год | Исследователи | Растворимость азота, ppm | Экспериментальный метод | Литературный источник |
|------|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 1958 | Шенк Г. и сотрудники | 25 | метод Сивертса | [259] |
| 1960 | Гумберт Дж.К. и Эллиотт Дж.Ф. | от 5 до 12,1 | | [395] |
| 1965 | Стомахин А.Я. и сотрудники | 12,6 | | [396] |
| 1966 | Блосси Р.Г., Пелке Р.Д. | 13 | | [275] |
| 1968 | Вада Х. и сотрудники | 13 | техника левитационной плавки | [279] |
| 1968 | Федорченко В.И. и сотрудники | 15 | метод Сивертса | [397] |
| 1970 | Ланге К.В. и Шенк Г. | 14,4 | метод отбора проб | [284] |
| 1975 | Кодзима Ю. и сотрудники | от 13 до 35 | | [294] |
| 2001 | Абдулрахман Р.Ф. и Хендри А. | 20 | метод Сивертса | [346] |
| 2003 | Кованда К. и Шпайдель М.О. | 12 | метод отбора проб | [349] |
| 2019 | Цянь К. и сотрудники | 10 | | [393] |

Растворение азота в жидком никеле выразили реакцией



Изменение свободной энергии Гиббса реакции растворения азота в жидком никеле имеет различные выражения, имеющие положительный температурный коэффициент (Дж/моль):

$$\Delta G = 44769 + 57,32 \cdot T \quad [222], (1823 \div 1973 \text{ K}) \quad (1.62)$$

$$\Delta G = 48442 + 31,937 \cdot T \quad [326], \quad (1.63)$$

$$\Delta G = 53602 + 30,06 \cdot T \quad [392], \quad (1.64)$$

$$\Delta G = 49100 + 31,4 \cdot T \quad [393], (1773 \div 2023 \text{ K}), \quad (1.65)$$

$$\Delta G = 69000 + 18,62 \cdot T \quad [396], \quad (1.66)$$

$$\Delta G = 34530 + 25,10 \cdot T \quad [398], (1800 \div 2460 \text{ K}), \quad (1.67)$$

$$\Delta G = 27865 + 39,71 \cdot T \quad [231], (1823 \div 2473 \text{ K}), \quad (1.68)$$

выражения (1.67) и (1.68) справедливы при рассмотрении раствора азота в жидком никеле с концентрацией 1 % ат., в отличие от остальных выражений для 1% масс. концентрации азота;

$$\Delta G = 50775,3 + 53,966 \cdot T \quad [399]. \quad (1.69)$$

Добавка основных легирующих компонентов никелевых сплавов (Ti, V, Cr, Nb, Ta, Mo, W, Mn, Fe, Co, Al – элементы расположены в порядке уменьшения степени воздействия) резко увеличивают растворимость азота в расплавах [222, 349, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398]. Легирующие компоненты никелевого сплава – алюминий, кремний, бор и медь – снижают растворимость азота в расплаве [400].

Расчет растворимости азота в сплавах на основе никеля проводят по двум методикам: с использованием параметров взаимодействия Вагнера [393, 394, 401, 402] и с использованием методики расчета эквивалентных концентраций растворенных компонентов в никеле [399]. Методика применения первого метода достаточно подробно изложена выше на примере расчета растворимости азота в сталях. Применение второго метода прогноза для никелевых сплавов достаточно полно изложено в работах [399, 400, 403, 404, 405].

По методике эквивалентных концентраций растворимость азота в сплаве на основе никеля определяется по выражению:

$$\lg [\% N]_{Ni-all} = -1900/T - 1,81 - (-324/T + 0,0525) \cdot [\% Cr_{eqv}] - (7/T - 0,002) \cdot [\% Cr_{eqv}]^2, \quad (1.70)$$

где $[\%Cr_{eqv}]$ - эквивалентная концентрация хрома в сплаве на основе никеля, % масс. которая определяется по следующему уравнению:

$$[\%Cr_{eqv}]_{Ni-all} = [\%Cr]_{Ni-all} + \sum_{i=1}^{n-1} (K_N^{X_i} \cdot [\%I]_{Ni-all}), \quad (1.71)$$

где $[\%Cr]_{Ni-all}$, $[\%I]_{Ni-all}$, $I \neq Cr$ - концентрация хрома и компонентов сплава на основе никеля, % масс., n - количество компонентов в никелевом сплаве, $K_N^{X_i}$ - коэффициент эквивалентности концентрации компонента I концентрации хрома.

Значения коэффициентов эквивалентности в различных вариантах методики приведены в табл.1.12.

Таблица 1.12. Коэффициенты эквивалентности для расчета растворимости азота в сплавах на основе никеля.

| Al | Ce | Co | Cr | Fe | Mo | Nb | Si | Ta | Ti | W | Zr | Источ- ник |
|--------|-------|--------|-----|-------|------|-------|-----|------|------|-------|------|---------------|
| -0,354 | 13,45 | 0,0642 | 1,0 | 0,224 | 0,86 | --- | 1,0 | --- | --- | 2,830 | 0,85 | [399] |
| --- | --- | --- | 1,0 | 0,131 | 0,31 | 0,204 | --- | --- | --- | 0,123 | --- | [403] |
| --- | --- | --- | 1,0 | 0,15 | 0,20 | 0,308 | --- | 0,69 | 3,06 | 0,110 | 3,83 | [404] |

Для получения гарантированно низких концентраций углерода (ниже 100 ppm) в сплавах на основе никеля в процессе вакуумной индукционной плавки применяют операцию многократного повторения интенсивного углеродного кипения за счет подачи в расплав оксида никеля [5]. Однако, в случае производства никелевых сплавов с высоким содержанием хрома реализация такой технологии не обеспечивает гарантированно низкой концентрации углерода в сплаве, что вынуждает применение дополнительных видов переплавов – вакуумного дугового и/или электронно-лучевого.

1.4. Анализ противоречий при описании кинетики растворения азота в металлическом расплаве

В описании кинетики поглощения азота жидкими расплавами на основе железа нет единой точки зрения. Большинство исследователей [14, 21, 100, 216,

359, 374, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414] считает, что растворение азота лимитируется процессом массопереноса азота в жидком металле и отмечает следующие особенности:

- 1) весь процесс растворения азота в жидком металле можно условно разделить на следующие стадии:
 - перенос молекул азота в газовой фазе из основного объема к поверхности жидкого металла;
 - химическая реакция сорбции азота, протекающая на границе раздела газовая фаза – металл;
 - отвод растворенного азота от границы раздела фаз в объем жидкого металла;
- 2) скорость газообменных процессов между жидким металлом и газовой фазой в металлургических агрегатах контролируется скоростью отвода растворенного газа от границы раздела фаз вглубь жидкого металла.
- 3) скорость собственно химической реакции сорбции азота превышает скорости первой и третьей стадий процесса растворения, поэтому концентрация газа на поверхности жидкого металла всегда близка к равновесной, исключения составляют случаи, когда расплавы на основе железа содержат повышенные концентрации кислорода и серы, когда концентрация азота на поверхности не достигает равновесных значений;
- 4) скорости прямой реакции сорбции азота жидким металлом и обратной реакции десорбции азота из жидкого металла близки между собой даже при наличии повышенных концентраций кислорода и серы.

Однако в ряде работ [100, 216, 374, 410] лимитирующим называется химико – адсорбционное звено процесса. При этом отмечается, что процесс описывается кинетическим уравнением второго порядка.

Применительно к открытым сталеплавильным процессам поглощение или удаление азота из металла удовлетворительно описывается кинетическим уравнением первого порядка:

$$g_N = \frac{d[\%N]}{d\tau} = \beta \frac{S}{V} ([N]_{нов} - [N]) \quad (1.72)$$

где g_N - скорость поглощения азота жидким металлом, τ - время, β - коэффициент массообмена, который равен отношению коэффициента диффузии азота в диффузионном слое металла D_N к толщине диффузионного слоя δ , $\beta = D_N/\delta$; S – площадь поверхности раздела газовой фазы и жидкого металла, V – объем жидкого металла, $[N]_{нов}$ - концентрация азота в поверхностном слое металла, близкая к равновесной концентрации азота в металле $[N]_{нов} = [N]_p$, $[N]$ - концентрация азота в объеме жидкого металла.

Итоговое уравнение скорости адсорбции азота жидким металлом имеет вид

$$g_N = \frac{D_N}{\delta} \cdot \frac{S}{V} ([N]_p - [N]). \quad (1.73)$$

Таким образом, скорость адсорбции азота металлом зависит от величины значения коэффициента диффузии азота и разности равновесной концентрации азота и концентрации азота в объеме металла.

Сравнение коэффициентов диффузии водорода и азота [222, 413, 415] показывает, что значения коэффициента диффузии водорода превышает величину аналогичного показателя для азота на один – два порядка и сравним по порядку значений с коэффициентами диффузии кислорода и серы. Это может быть основанием того факта, что процесс удаления азота из стали протекает менее эффективно, чем процесс удаления водорода не зависимо от способа дегазации стали [184, 187, 188, 189, 190, 191, 416]. При вакуумной обработке стали удаление водорода из металла достигает 80%, деазотация – от 5% до 10% и только в исключительных случаях достигает 40%.

При разливке стали содержание в ней азота повышается. Поглощение азота из воздуха составляет до 0,002% [184, 187, 188, 189], его интенсивность возрастает с уменьшением окисленности стали [411, 412].

На величину коэффициента диффузии азота в стали влияет наличие примесных и легирующих компонентов стали [14, 73, 184, 413]. Особое влияние на коэффициент диффузии азота в жидком железе оказывает растворенные кислород и сера [14, 73, 312, 362]. А.Н. Морозов [14] отмечает, что скорость растворения

азота в железе и стали, как и скорость десорбции, в сильной степени зависит от содержания кислорода, растворенного в жидком металле. Экспериментально показано, что в присутствии оксидной или шлаковой пленки на поверхности жидкого металла скорость поглощения азота уменьшается.

Но даже в отсутствии оксидной пленки скорость адсорбции азота жидким металлом уменьшается с повышением концентрации растворенного кислорода. Количественно это влияние оценивается формулой [417]:

$$\lg \frac{d[N, \%]}{dt} = -5,22 \cdot [O] + \lg P_{N_2}^{\frac{1}{2}} - 2,42 \quad (1.74)$$

К аналогичным выводам о влиянии кислорода на диффузионную подвижность азота в жидком железе приходит и автор работы [73]. В частности, он отмечает, что при концентрации кислорода до 0,02% значение коэффициента диффузии азота практически не изменяется. При увеличении концентрации кислорода до 0,03% происходит резкое уменьшение значения коэффициента диффузии до $1,3 \times 10^{-9}$ м²/с. При концентрации кислорода выше 0,03% абсорбция азота не наблюдалась. Аналогичное изменение коэффициента диффузии азота наблюдается и при превышении концентрации серы в металле выше 0,02%. Согласно представлениям Б.В. Линчевского [73], на поверхности металла при концентрациях кислорода выше 0,03% и концентрации серы выше 0,02% возникает полимолекулярная пленка соединений FeO и FeS, толщина которой увеличивается с повышением концентрации кислорода и серы, что затрудняет перенос атомов азота и является причиной изменения хода зависимости коэффициента диффузии азота. При этом отмечается, что совместное влияние серы и кислорода проявляется подобно действию только кислорода. Аналогичная картина влияния растворенного кислорода характерна не только для чистого железа, но и для его сплавов [334, 408].

Сильное влияние наличия шлаковой плёнки, покрывающей жидкий металл, на скорость переноса азота отмечают также авторы работ [14, 73, 417]. Влияние наличия шлаковой фазы на поверхности металлической фазы на процесс растворения азота в металле связано с тем, что на растворимость азота в шлаковой фазе существенно влияет окисленность системы. Впервые это явление было

подробно исследовано авторами работ [418, 419, 420]. В отличие от закона Сивертса растворимость азота в шлаках описывается уравнением:

$$(N) = k'_N \cdot P_{N_2}^{1/2} \cdot P_{O_2}^{-3/4} \quad (1.75)$$

где P_{O_2} - парциальное давление кислорода.

С влиянием кислорода на поведение азота в шлаке связан так называемый «эффект накачки» [420], который возникает в слое шлака при неоднородной его окисленности. Это объясняет то, что фактическая концентрация азота в металле в условиях, когда на его поверхности присутствует оксидная фаза (шлак), всегда ниже равновесной концентрации с газовой фазой агрегата и при этом сильно зависит от интенсивности перемешивания шлака. Поэтому, отмеченное в работах [14, 73, 417] влияние кислорода и серы на скорость переноса азота могло быть связано с проявлением «эффекта накачки».

Таким образом, «накачка» относится к очень действенным эффектам в металлургии. Однако для её интенсификации необходимо поддерживать достаточный перепад окисленности шлака и обеспечивать активное перемешивание шлака, что не всегда достигается в конкретных производственных условиях.

Выводы

1. Использование для термодинамического описания металлургических процессов с участием конденсированных фаз закона действующих масс способствует накоплению ошибки при прогнозных расчётах по следующим причинам – большой разбег значений констант равновесия гетерогенных реакций, допущение стехиометричности соединений в конденсированных фазах, произвольный выбор химических реакций для создания термодинамической модели.

2. При термодинамическом описании растворов кислорода и углерода постулируется неидеальность растворов, несмотря на ограниченную растворимость этих элементов в железе. Для остальных компонентов раствора, как

газовых (азот, водород) так и металлических выполняются законы разбавленных растворов вплоть до предела растворимости. Данный факт не нашёл должного объяснения в термодинамике сплавов при многочисленных попытках.

3. При большом собранном фактическом материале по поведению азота в расплавах на основе железа и в сплавах на основе элементов подгруппы железа построены многочисленные варианты термодинамического описания поведения азота в металлическом расплаве. Для такого описания используют параметры модели. Число этих параметров колеблется, в зависимости от концентрации дополнительных компонентов расплава (помимо азота) от 1 до 3 для каждого дополнительного компонента, что с одной стороны усложняет модель, а с другой – снижает её прогностические свойства.

4. При описании кинетики поведения азота (как и других компонентов) металлического расплава используют представления об идеальности раствора, хотя при термодинамическом описании свойств ни у кого не вызывает сомнений использование понятий активности и коэффициента активности компонента в расплаве. Это вносит неизбежные неточности в выполнении прогнозных расчётов.

5. При термодинамическом описании поведения компонентов шлакового раствора существенным прорывом стало использование найденного явления влияния окислительного потенциала фазы на активность компонента шлака. Применение аналогичного подхода ко всем конденсированным фазам может привести к построению строгой и единообразной модели поведения компонента в металлургической системе.

6. Анализ существующих способов управления содержанием азота в расплаве стали показывает наличие пределов как при попытках получить стали с низким содержанием азота, так и при осуществлении легирования азотом. Недостаточное осмысление кинетики массообменных процессов азота с металлическим расплавом с учётом взаимодействия всех конденсированных фаз не позволяет усовершенствовать имеющиеся технологические процессы.

7. Увеличенное содержание азота в металле, выплавленном в дуговых печах связывают с поступлением азота в зонах контакта электрических дуг с ванной.

Каждая последующая технологическая операция с жидким металлом, начиная от выпуска из первичного сталеплавильного агрегата (вне зависимости конвертер или дуговая печь) и вплоть до его кристаллизации, либо не меняет содержание азота, либо изменяет его в большую сторону, увеличивая на 0,002 до 0,004% масс. Применение вакуумной обработки обеспечивает различную эффективность снижения уровня азота в жидком металле, не превышающую 80%, и зависящую от исходного содержания азота в расплаве. При исходном содержании азота не выше 40 ppm, эффективность обработки стремится к нулевому значению.

8. Для получения гарантированно низких концентраций углерода (ниже 100 ppm) в сплавах на основе никеля в процессе вакуумной индукционной плавки применяют операцию многократного повторения интенсивного углеродного кипения за счет подачи в расплав NiO. Однако, в случае производства никелевых сплавов с высоким содержанием хрома реализация такой технологии не обеспечивает гарантированно низкой концентрации углерода в сплаве, что вынуждает применение дополнительных видов переплавов – ВДП и/или ЭЛП.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В представленной работе использованы следующие методы исследований – системный анализ, статистический анализ данных с использованием критерия Стьюдента и критерия Фишера, регрессионный однофакторный и многофакторный анализы данных, химический анализ проб металла, газовый анализ проб металла.

2.1. Методика проведения экспериментов по влиянию технологических факторов на содержание азота при выплавке стали в ДСП и внепечной обработке на установке ковш-печь

Были проведены эксперименты в условиях действующего производственного процесса в условиях ЭСПЦ Молдавского металлургического завода (ММЗ) на ДСП-2, в условиях ЭСПЦ Донецкого электрометаллургического завода (ДЭМЗ) на ДСП-2, на установке ковш – печь ЭСПЦ ММЗ, в условиях ПАО "Северсталь" (г. Череповец, РФ) в ЭСПЦ на шахтной электродуговой сталеплавильной печи ШП-2.

Основные технические характеристики оборудования, на котором проводили промышленные эксперименты, приведены в табл.2.1.

Для отслеживания изменения концентрации азота в стали при проведении экспериментов использовали данные экспресс-анализа. Сопоставление параллельных анализов на содержание азота в стали, ранее выполненных параллельно в экспресс-лаборатории ЭСПЦ ММЗ на спектроанализаторе и в ЦЗЛ ММЗ методом вакуум-плавления, показало некоторое систематическое расхождение результатов, полученных этими методами, при несколько более высокой дисперсии данных экспресс-анализа. Для статистической обработки данных указанные расхождения несущественны. Пробы металла на содержание азота отбирались – первая – по расплавлению; вторая – перед выпуском металла из печи.

Таблица 2.1. Технические характеристики сталеплавильных дуговых печей, на которых проводили промышленные эксперименты

| Наименование предприятия | ИСТИЛ (Украина) [421] | | Молдавский металлургический завод [422, 423, 424] | ПАО "Северсталь" | | |
|---|------------------------------------|---------------------------------------|---|------------------|---------------------------------|----------------------------|
| Наименование печи | ДСП-2 Danarc Danieli, до 2005 года | ДСП-2 Danarc Danieli, после 2005 года | ДСП-2 | ШП-2 | | |
| Состав шихты | 100% лом | 100% лом | 100% лом | 100% лом [425] | 70% лом, 30% жидкий чугун [425] | 50% лом, 50% жидкий чугун* |
| Номинальная масса плавки, т | 120 | 120 | 140 | 150 | | |
| Масса металла на выпуске, т | 100 | 100 | 120 | 125 | | |
| Номинальная мощность трансформатора, МВА | 50/63 | 87 | 95 | 86 | | |
| Диаметр электрода, мм | 610 | | | | | |
| Средняя длительность выплавки низкоуглеродистого полупродукта, мин. | 67 | 52 | 47 | 59 | 54 | 59 |
| Удельный расход электроэнергии, кВт-ч/т | 350 | 400 | 410 | 298 | 245,5 | 206 |
| Удельный расход кислорода, нм ³ /т | 45 | 33,3 | 36,8 | 45 | 43 | 38 |
| Удельный расход природного газа, нм ³ /т | 8 | 6 | 7 | 18 | 15 | 6 |
| Длительность работы под током, мин. | 57 | 42 | 47 | 37 | 32 | 27 |
| Удельный расход электродов, кг/т. | 2,25 | 1,8 | 1,41 | нет данных | 1,5 | нет данных |
| Число плавов в сутки | 19 - 20 | 27 - 28 | 31 | 24 | 26-27 | 24 |
| Стойкость футеровки, плавов | 450 | 350 | 450 | нет данных | нет данных | 740 |

Примечания: * - данные, предоставленные ПАО "Северсталь" при выполнении прикладной НИР, в которой автор был ответственным исполнителем.

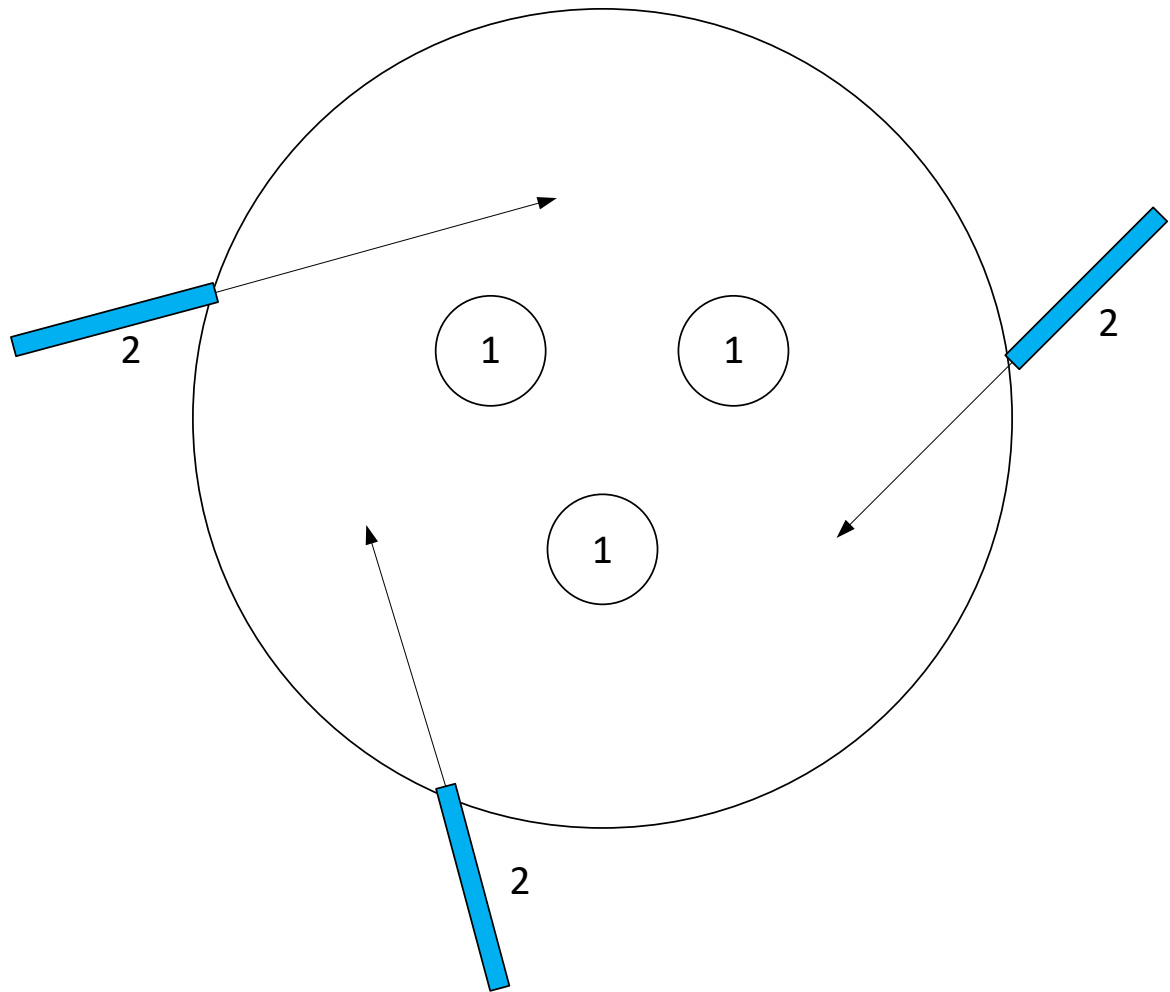
2.1.1. Методика первой серии промышленных экспериментов на ДСП-2 в ЭСПЦ ММЗ

Серия экспериментов состоит из 5 плавов высокоуглеродистых марок сталей (сталь 70 или сталь 80).

1. Шихтовку плавов проводить согласно ТИ 518-ЭСЛ-01-98 (ММЗ) со следующими дополнениями:
 - 1.1. В завалку дается передельный чугун в количестве не менее 10 и не более 18 тонн.
 - 1.2. Остальное количество металлошихты – габаритный лом.
 - 1.3. Углеродистых материалов в завалку и подвалки не давать.
 - 1.4. В последнюю подвалку вместо извести подать известняк в эквивалентном к извести количестве.
2. Выплавка ведется согласно ТИ 518-ЭСС-02-98 (ММЗ) и действующей технологической карте со следующими изменениями:
 - 2.1. Подача углеродистых материалов в печь провести таким образом, чтобы после проплавления последней подвалки на поверхности шлака не должно быть углеродистых материалов.
 - 2.2. После второй подвалки вместо извести в печь подавать только известняк порциями по 200 кг каждую минуту.
 - 2.3. Атмосфера печи должна быть окислительной. Расход кислорода, подаваемого через вспомогательные устройства поддерживать на уровне 2–10 м³/мин, при этом необходимо предотвратить оголение металла от шлака.
 - 2.4. При выплавке углеродистых марок сталей содержание углерода в стали на выпуске из печи не должно быть ниже критической концентрации 0,12–0,15% С.
3. Работа вспомогательного оборудования.
 - 3.1. Стеновые газокислородные горелки работают по существующему режиму.

- 3.2. При работе дверного манипулятора и кислородного манипулятора "Палмур" расход кислорода должен быть 2–10 м³/мин, чтобы не допустить оголения металла от шлака. Величины расхода кислорода корректируют работники технического отдела ММЗ.
- 3.3. В период доводки в печи металл продувается аргоном через пористые пробки.
4. Порядок присадки материалов на выпуске плавки из ДСП.
 - 4.1. При наполнении 10–15 тонн дается шлаковая смесь 600 кг извести, 100 кг шпата.
 - 4.2. Одновременно с подачей шлаковой смеси в ковш отдать кусковой углеродистый материал в количестве – 500–600 кг.
 - 4.3. Масса науглероживателя, вводимого после завершения выпуска, уменьшается на величину массы кускового углеродистого материала, введенного в начале выпуска.
 - 4.4. Во время выпуска металла из печи проводить продувку стали аргоном в сталеразливочном ковше через продувочные пробки с расходом 350–500 литров/мин.
5. Обработка стали на установке ковш-печь проводить согласно действующей технологической инструкции ТИ 518–ЭСС–14–97 (ММЗ) с изменениями №1, а также с выполнением следующих пунктов:
 - 5.1. Перед началом обработки поверхность шлака в ковше обдувают струей кислорода для полного окисления углеродистых материалов, оставшихся на поверхности шлака.
 - 5.2. Управление позиционером заслонки газохода производить таким образом, чтобы обеспечить подсос воздуха под крышку установки (из-под крышки не должны выделяться пыль и продукты сгорания во время обработки).
 - 5.3. Количество вводимой извести на установке "ковш–печь" довести до 2000 кг. Весь необходимый объем шлака следует сформировать на начальной стадии обработки.

- 5.4. Исключить попадание дисперсных углеродистых материалов на поверхность шлака. Науглероживание стали проводить только проволокой с углеродистым наполнителем или погружением углеродистого блока в сталь. Ввод углеродистых материалов должен исключать их последующее нахождение на поверхности шлака.
- 5.5. Расход аргона выставить таким образом, чтобы исключить оголение металла (200-250 литров/мин на пористую пробку).
- 5.6. В течение всей обработки на установке "ковш-печь" обеспечить окислительную атмосферу над поверхностью шлака (схем обдува поверхности шлака сталеразливочного ковша представлена на рис.2.1). Для чего подавать кислород равномерно через 3 (три кислородные трубки 0,5" с общей интенсивностью 0,5–1,25 нм³/мин.
- 5.7. Раскисление шлака в установке «ковш–печь» осуществлять порошком силикокальция.
- 5.8. Конечное раскисление на установке «ковш–печь» осуществлять силико – кальцием.
6. Отбор проб:
- 6.1. Пробы металла на содержание азота и других элементов отобрать в следующие периоды времени:
- 1 проба - после расплавления;
 - 2 проба – непосредственно перед выпуском из печи;
 - 3 проба – из ковша сразу после выпуска, перед началом обработки на установке «ковш–печь».
 - 4 проба - после окончания обработки на установке «ковш–печь».
- 6.2. Пробы шлака отбираются одновременно с пробами металла путем намораживания шлака на металлический прут.
- 6.3. Все отобранные пробы передать в ЦЗЛ ММЗ для проведения химического анализа по действующим на предприятии методикам.



1 – проекция расположения графитированных электродов, 2 – кислородные трубки 0,5", стрелками показаны направления движения струй кислорода

Рисунок 2.1. Схема расположения кислородных трубок (0,5")

2.1.2. Методика проведения второй серии промышленных экспериментов на ДСП-2 в ЭСПЦ ММЗ

Первая часть второй серии из пяти плавов среднеуглеродистой стали проводилась по следующей методике.

1. Шихтовку плавов, выплавку стали в ДСП и выпуск стали из печи в ковш провести согласно действующим технологическим инструкциям и картам.
2. Обработку стали на установке ковш-печь провести согласно действующей технологической инструкции со следующими изменениями:

- 2.1. Количество вводимой извести на установке ковш-печь довести до 2000 кг. Весь необходимый объем шлака следует сформировать на начальной стадии обработки. Добавки извести в ходе дальнейшей обработки на установке ковш-печь исключить.
 - 2.2. Исключить попадание дисперсных углеродистых материалов на поверхность шлака. Науглероживание стали проводить только проволокой с углеродистым наполнителем или погружением углеродистого блока в сталь. Ввод углеродистых материалов должен исключать их последующее нахождение на поверхности шлака.
 - 2.3. Расход аргона выставить таким образом, чтобы исключить оголение металла: не более 250 литров в минуту.
 - 2.4. Организовать обдув поверхности шлака кислородом в сталеразливочном ковше после доводки химического состава стали по содержанию углерода, для полного окисления углеродистых материалов, плавающих в шлаке. Установить следующее время обдува поверхности шлака для каждого опыта:
 - первый опыт – 5 мин;
 - второй опыт – 7.5 мин;
 - третий опыт – 10 мин;
 - четвертый опыт – 12.5 мин;
 - пятый опыт – 15 мин.
 - 2.5. В течение всей обработки на установке ковш-печь обеспечить окислительную атмосферу над поверхностью шлака.
 - 2.6. Раскисление шлака в установке ковш-печь разрешается осуществить алюминиевыми отходами или порошком силикокальция.
 - 2.7. Конечное раскисление на установке ковш-печь провести силикокальцием.
3. Отбор проб:
- 3.1. Пробы металла на содержание азота отобрать в следующие периоды времени:

- первая проба – начало обработки стали на установке ковш–печь;
- вторая проба – конец доводки металла по углероду, начало обдува поверхности шлака кислородом;
- третья проба – конец обдува поверхности шлака кислородом;

3.2.Пробы шлака отобрать одновременно с пробами металла путем намораживания шлака на металлический прут.

3.3.Все отобранные пробы передать в ЦЗЛ ММЗ для проведения химического анализа по действующим на предприятии методикам.

Вторая серия экспериментальных плавов – эксперименты по выплавке стали с пониженным содержанием азота – состояла также из 5 плавов.

1. Шихтовку плавов проводили согласно действующей технологической инструкции (ТИ 518-ЭСЛ-01-98) со следующими дополнениями:

1.1. Углеродистых материалов в завалку и подвалки не отдавали.

1.2. В последнюю подвалку вместо извести применяли известняк в эквивалентном к извести количестве.

2. Выплавку проводили согласно действующей технологической инструкции (ТИ 518-ЭСС-02-98) и действующей технологической карте со следующими изменениями.

2.1. Подачу углеродистых материалов в печь проводили таким образом, чтобы после проплавления последней подвалки на поверхности шлака не оставалось углеродистых материалов.

2.2. После второй подвалки вместо извести в печь подавали только известняк порциями по 200 кг каждую минуту.

2.3. Атмосфера печи поддерживали окислительной, для чего расход кислорода, подаваемого через вспомогательные устройства должен быть таким, чтобы предотвратить оголение металла от шлака.

2.4. При выплавке среднеуглеродистых марок сталей содержание углерода в стали на выпуске из печи не должно быть ниже концентрации 0,12 – 0,15% масс.

3. Работа вспомогательного оборудования.

- 3.1. Стеновые газокислородные горелки работают по существующему режиму.
- 3.2. При работе дверного манипулятора и кислородного манипулятора «Палмур» расход кислорода должен быть таким, чтобы не допустить оголения металла от шлака, величины расхода кислорода устанавливаются работниками технического отдела.
- 3.3. В период доводки в печи металл продувать азотом через донные фурмы. При этом выставить минимальный расход азота.
- 3.4. Разрешается работа копьём (кислородной трубкой) с погружением в металл.
4. Порядок присадки материалов на выпуске плавки из ДСП соблюдать согласно действующим технологическим инструкции и карте технологического процесса.
5. Обработку стали на установке ковш-печь провести согласно действующей технологической инструкции ТИ 518-ЭСС-14-97 с изменениями №1 со следующими изменениями:
 - 5.1. Количество вводимой извести на установке ковш-печь довести до 2000 кг. Весь необходимый объем шлака следует сформировать на начальной стадии обработки. Добавки извести в ходе дальнейшей обработки на установке ковш-печь исключить.
 - 5.2. Исключить попадание дисперсных углеродистых материалов на поверхность шлака. Науглероживание стали проводить только проволокой с углеродистым наполнителем или погружением углеродистого блока в сталь. Ввод углеродистых материалов должен исключить их последующее нахождение на поверхности шлака.
 - 5.3. Расход аргона выставить таким образом, чтобы исключить оголение металла – не более 250 литров в минуту.
 - 5.4. После доводки химического состава стали по содержанию углерода, поверхность шлака в ковше обдувать струей кислорода для полного окисления углеродистых материалов, плавающих в шлаке. Время обдува поверхности шлака установить по результатам первой серии опытов.

5.5. В течение всей обработки на установке ковш-печь обеспечить окислительную атмосферу над поверхностью шлака.

5.6. Раскисление шлака в установке ковш-печь разрешается осуществлять порошком силикокальция.

5.7. Конечное раскисление на установке ковш-печь осуществлять силикокальцием.

6. Отбор проб:

6.1. Пробы металла на содержание азота и других элементов отобрать в следующие периоды времени:

- первая проба – после расплавления;
- вторая проба – непосредственно в момент (или после) открытия эркера для выпуска стали из печи;
- третья проба – из ковша перед началом обработки на установке «печь-ковш»
- четвертая проба – перед выдачей ковша на МНЛЗ.

6.2. Пробы шлака отбираются одновременно с пробами металла путем намораживания шлака на металлический прут.

6.3. Все отобранные пробы передать в ЦЗЛ ММЗ для проведения химического анализа по действующим на предприятии методикам.

2.1.3. Методика проведения промышленных экспериментов на ДСП-2 в ЭСПЦ "ДЭМЗ"

Методика проведения экспериментов при выплавке низкоуглеродистого полупродукта в ДСП-2 ЭСПЦ "ДЭМЗ" (ранее ММЗ "ИСТИЛ (Украина)", в настоящее время ООО "ДМЗ", г. Донецк, ДНР) состояла в следующем. По ходу плавки в дуговой сталеплавильной печи первая проба на содержание азота отбирали одновременно с первой пробой металла по расплавлению последней подвалки, вторую пробу на содержание азота отбирали непосредственно перед выпуском металла из печи. Отбор проб металла проводили по утвержденным технологическим инструкциям предприятия. Анализ на содержание азота

проводился на установке Леко ТС-300 методом вакуум-плавления. Каждое определение проводили не менее трёх раз. В табл. 2.2 приведен рабочий диапазон измерения азота и относительная погрешность прибора.

Таблица 2.2. Рабочий диапазон измеряемых концентраций азота и погрешность определения газового анализатора Леко ТС-300

| Рабочий диапазон для кислорода | Рабочий диапазон для азота | Относительная погрешность для кислорода | Относительная погрешность для азота |
|--------------------------------|----------------------------|---|-------------------------------------|
| 0,0002÷0,2% | 0,0002÷0,5% | 1 ppm или 0,5 % | 0,25 ppm или 0,5 % |

2.1.4. Методика проведения промышленных экспериментов на электродуговой шахтной сталеплавильной печи №2 (ШП-2) в ЭСПЦ ПАО «Северсталь»

Для проведения промышленных экспериментов по отработке изменений в технологии выплавки полупродукта в ШП-2 ЭСПЦ Череповецкого металлургического комбината выполняли следующие рекомендации по коррекции действующей технологической инструкции.

1. Общие положения

1.1. Кислородную фурму использовали в следующем режиме:

- включение – при расходе электроэнергии 6 МВт·ч, расход кислорода – 3000 нм³/час;
- выключение – при расходе электроэнергии 25 МВт·ч.

Не использовали подачу коксового порошка для вспенивания шлака.

1.2. В порядке исключения (в случае недостаточной вспененности шлака и оголения дуг) допускается эпизодическое включение подачи коксового порошка с интенсивностью 40–50 кг/мин.

2. Операции во время плавки

2.1. От начала плавки и до окончания заливки чугуна:

- инжекторы №1 и №2 должны работать в режиме горелок,

- инжектор №4 должен работать в режиме продувки кислородом с расходом 2000 нм³/час.
- 2.2. По окончании заливки чугуна включить все три инжектора на продувку кислородом с расходом 2000 нм³/час.
- 2.3. При расходе электроэнергии 5 МВт:
- инжекторы №1 и №4 переключить на расход в 3500 нм³/час,
 - кокс не вдувать.
- 2.4. При расходе электроэнергии 12 МВт переключить газокислородные горелки на дежурный режим.
- 2.5. При расходе электроэнергии 25 МВт – на высокоуглеродистом сортаменте заказов и при расходе электроэнергии 24 МВт – на низкоуглеродистом сортаменте:
- отключить трансформатор,
 - отобрать пробу металла на химический анализ,
 - произвести замер температуры,
 - при температуре ниже 1525°С включить трансформатор и произвести подогрев металла до 1525°С.
- 2.6. Дальнейшее дожигание углерода до нужного значения проводить додувкой через инжекторы №1 и №4 с расходом в 3500 нм³/час на каждый.
- 2.7. В случае, если инжектор №2 был выставлен во время ремонта, использовать его при додувке с расходом кислорода 3500 нм³/час
3. Дополнительно – при фиксировании заметалливания свода перевести инжектор №2 в дежурный режим на последующих плавках при расходе электроэнергии 5 МВт и не использовать его при додувке.

2.2. Методика проведения экспериментов по выплавке специальных сталей и сплавов на никелевой основе

Первичная выплавка специальных сталей и некоторых сплавов на никелевой основе проводили на комплексе дуговая сталеплавильная печь – установка ковш – печь – камерный вакууматор в электросталеплавильном цехе Предприятия А.

Технические параметры дуговой сталеплавильной печи ЭСПЦ Предприятия А представлены в табл. 2.3

Таблица 2.3. Технические характеристики дуговой сталеплавильной печи
Предприятия А

| Наименование параметра | Единица измерения | Значение |
|--|--------------------|-----------|
| Тип выпуска | | Эркерный |
| Общий объём | м ³ | 8,3 |
| Чистый объём | м ³ | 8,0 |
| Диаметр корпуса (внутренний диаметр стальных пластин) | м | 2,8 |
| Диаметр корпуса (внутренний диаметр панелей) | м | 2,8 |
| Толщина донного огнеупорного материала | мм | 502 |
| Толщина огнеупорного материала стен | мм | 476 |
| Диаметр электрода | мм | 250 |
| Длина электрода | мм | 1700-1800 |
| Длина одной части электрода | мм | 1500 |
| Номинальная мощность трансформатора | МВА | 7 |
| Удельный расход электроэнергии (минимальный) | кВт/т | 500 |
| Электроэнергия (среднее максимальное) | МВт | 4,1 /5,2 |
| Удельный расход электродов (минимальный) | | 3,2 |
| Удельный расход кислорода | нм ³ /т | 24 |
| Удельный расход углерода вдуваемого | кг/т | 14 |
| Удельный расход углерода загружаемого | | 10 |
| Удельный расход извести | кг/т | 26 |
| Удельный расход доломита | кг/т | 12 |
| Количество стального лома и отходов в завалке (минимальное) | % | 100 |
| Плотность шихты | т/м ³ | 0,6-0,65 |
| Выход металла | % | 91,5-94 |
| Продолжительность плавки от выпуска до выпуска (минимальная) | мин | 55 |

Выплавку основной массы сплавов на никелевой основе и некоторых видов легированных сталей специального назначения проводили в цехе специальной электрометаллургии Предприятия А проводили в вакуумной индукционной тигельной печи ВИП-3,0, основные технические характеристики которой представлены в табл. 2.4

Таблица 2.4. Технические характеристики вакуумной индукционной печи

Предприятия А

| Наименование параметра | Значение | Единица измерения |
|--|---------------------------|-------------------|
| Тип печи | тигельная | |
| Номинальная ёмкость тигля (при плотности расплава 7000 кг/м ³) | 3,0 / 4,6 | тонна |
| Тип тигля | набивной | |
| Материал набивки тигля | высокоглинозёмистый бетон | |
| Количество вакуумных камер | 4 | |
| Максимальный диаметр слитка | 425 | мм |
| Минимальный диаметр слитка | 190 | мм |
| Максимальная длина слитка | 2500 | мм |
| Максимальное количество слитков | 5 | |
| Максимальная мощность | 1000 | кВт |
| Средний расход электроэнергии (сильно зависит от марки стали или сплава) | 750 | кВт/т |
| Средняя длительность плавки | 8 | час |
| Количество ступеней вакуумных насосов | 3 | |
| Рабочее разрежение в плавильной камере в период рафинировки металла | ≤0,002 | мбар |
| Разрежение в разливочной камере во время разливки | 0,1 | мбар |
| Предельное натекание в плавильную камеру | ≤0,035 | мбар/мин |

Промышленные эксперименты по электрошлаковому переплаву легированных сталей и сплавов на никелевой основе проводили в печах ЭШП-9,8, ЭШП-14(1) и ЭШП-14(2) цеха специальной электрометаллургии Предприятия А, основные технические характеристики печей ЭШП приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5. Основные технические характеристики печей электрошлакового переплава Предприятия А

| Наименование параметра | Значение | Единица измерения |
|---|---|-------------------|
| Тип печей | Одноэлектродная однофазная с защитным колпаком с возможностью последовательного наплавления до 5 расходуемых электродов в один слиток | |
| Типы осуществляемых видов процесса | Переплав в глуходонный кристаллизатор; Переплав в кольцевой кристаллизатор с вытягиванием слитка вниз | |
| Максимальный диаметр слитка | 750 | мм |
| Минимальный диаметр слитка | 300 | мм |
| Максимальная масса слитка | | |
| – ЭШП-9,8 | 9800 | кг |
| – ЭШП-14(1) и ЭШП-14(2) | 14000 | кг |
| Защитная атмосфера | Смесь аргон+азот или азот | |
| Мощность трансформатора | 2625 | кВА |
| Максимальная скорость переплава | 825 | кг/час |
| Максимальный ток переплава | 25 | кА |
| Длительность операции замены расходуемого электрода при последовательном наплавлении слитка (циклический ЭШП) | 90÷100 | сек |

Промышленные эксперименты по вакуумному дуговому переплаву сплавов на никелевой основе проводили в печах ВДП-2,5 и ВДП-7,0 цеха специальной электрометаллургии Предприятия А, основные технические характеристики печей ЭШП приведены в табл. 2.6, 2.7.

Таблица 2.6. Основные технические характеристики печи ВДП-2,5

| Наименование параметра | Значение | Единица измерения |
|-------------------------------------|---|-------------------|
| Тип печи | Вакуумная дуговая со сменными кристаллизаторами | |
| Номинальная электрическая мощность | 790 | кВА |
| Вторичное напряжение холостого хода | 65 | В |

| Наименование параметра | | Значение | | | | Единица измерения |
|---|-------------------|----------|------|------|------|-------------------|
| Рабочее напряжение | | ≤35 | | | | В |
| Рабочий ток переплава | | 1 ÷ 16 | | | | кА |
| Остаточный вес расходуемого электрода | | 6 ÷ 28 | | | | кг |
| Параметры расходуемых электродов и слитков ВДП-2,5 | | | | | | |
| Вариант | | (А) | (В) | (С) | (D) | (E) |
| Расходуемый электрод | | | | | | |
| Диаметр | мм | 309 | 309 | 400 | 260 | 180 |
| Длина | мм | 900 | 1800 | 2690 | 1860 | 1000÷2385 |
| Плотность | кг/м ³ | 7400 | 7400 | 7400 | 7400 | 7400 |
| Вес | кг | 500 | 1000 | 2500 | 730 | 188÷450 |
| Слиток ВДП | | | | | | |
| Диаметр | мм | 373 | 373 | 448 | 312 | 230 |
| Длина | мм | 562 | 1145 | 2000 | 1200 | 560÷1360 |
| Плотность | кг/м ³ | 7850 | 7850 | 7850 | 7850 | 7850 |
| Вес | кг | 483 | 983 | 2472 | 718 | 183÷445 |
| Кристаллизатор ВДП-2,5 | | | | | | |
| Диаметр | мм | 381 | 381 | 457 | 318 | 235 |
| Длина | мм | 800 | 1400 | 2300 | 1500 | 800÷1600 |

Таблица 2.7. Основные технические характеристики печи ВДП-7,0.

| Наименование параметра | Значение | Единица измерения |
|---|---|-------------------|
| Тип печи | Вакуумная дуговая со сменными кристаллизаторами | |
| Максимальный диаметр слитка | 700 | мм |
| Минимальный диаметр слитка | 312 | мм |
| Максимальная длина слитка | 2500 | мм |
| Максимальная длина медной трубы тигля | 2750 | мм |
| Максимальная масса слитка при плотности 8,28 кг/дм ³ | 6899 | кг |
| Максимальная длина электрода (без держателя) | 3180 | мм |
| Максимальный диаметр электрода | 620 | мм |
| Минимальный диаметр электрода | 230 | мм |
| Максимальный вес электрода (без держателя) | 7000 | кг |
| Расчетный вес (электрод + держатель) | 7300 | кг |
| Максимальный ток переплава | 20 | кА |
| Рабочий ток переплава | 3,5–12,0 | кА |
| Рабочее напряжение переплава | 23–26 | В |
| Скорость переплава | 2,3–7,5 | кг/мин |

2.2.1. Методика проведения экспериментов по электрошлаковому переплаву стали 12X18AG18

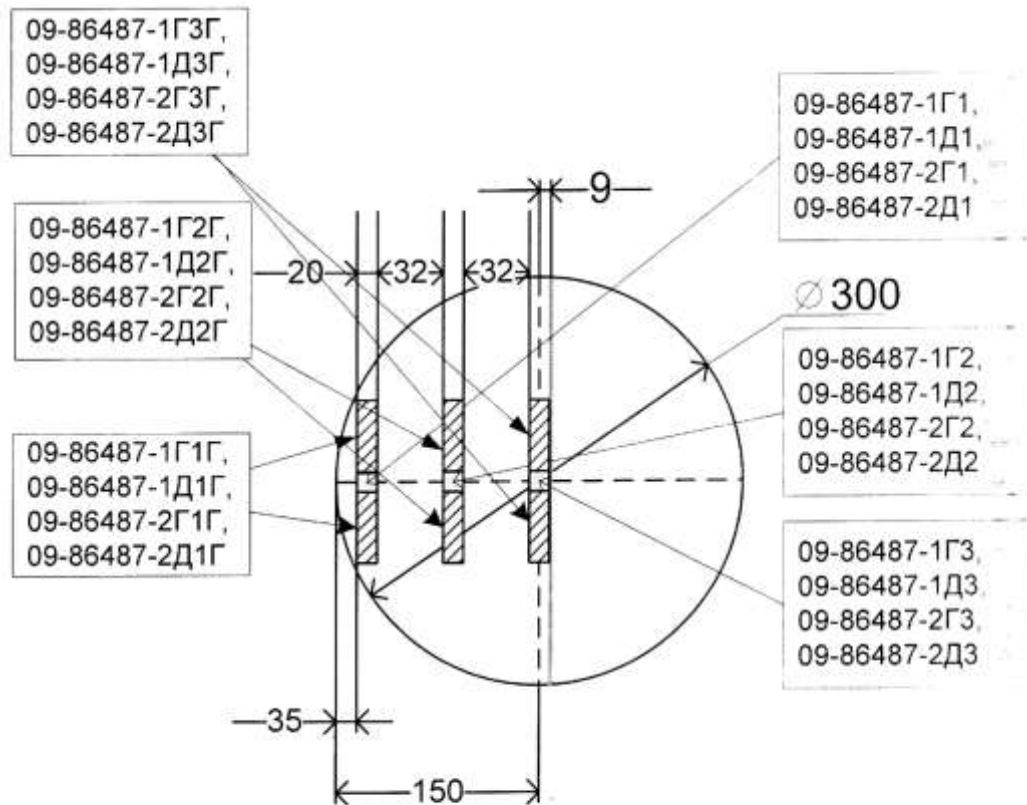
С целью проверки соответствия нормативным требованиям, предъявляемым к расходуемым электродам, провели отрезку от исходных слитков темплетов от головной и донной части слитка толщиной 16 мм. (см.рис.2.2).



Рисунок 2.2. Схема порезки слитков плавки 09-86487 при подготовке к электрошлаковому переплаву стали 12X18AG18

Порезку проводили на ленточной пиле. После соответствующей механической обработки темплетов провели анализ макроструктуры литого металла согласно ГОСТ 10243-75 "Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры" [427]. После анализа макроструктуры, каждый темплет разрезали согласно схеме (рис.2.3) для подготовки образцов к проведению исследований микроструктуры металла и химического состава.

Химический анализ образцов проводили по действующей на предприятии методике на спектрометре QSN-750 фирмы OBLF (Германия) методом атомно-эмиссионного спектрального анализа по ГОСТ Р 54153-2010 [428]. Абсолютные погрешности определения содержания легирующих и примесных компонентов для исследуемого сплава приведены в табл.2.8.



□ - образец для проведения спектрального анализа

▨ - образец для проведения газового анализа

Рисунок 2.3. Схема порезки поперечных темплетов исходных слитков стали 12X18AГ18 диаметром 300 мм

Таблица 2.8. Пределы погрешности определения массовой доли компонента сплава.

| Компонент | Массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность, % | Компонент | Массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность, % |
|-----------|---------------------------------|---------------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------|
| Углерод | свыше 0,02 до 0,05 включительно | 0,008 | Фосфор | св. 0,005 до 0,010 включительно | 0,0024 |
| | свыше 0,05 до 0,1 включительно | 0,012 | | св. 0,01 до 0,020 включительно | 0,003 |
| Кремний | свыше 0,2 до 0,5 включительно | 0,030 | | св. 0,02 до 0,050 включительно | 0,006 |
| | свыше 0,5 до 1,0 включительно | 0,050 | Медь | св. 0,10 до 0,20 включительно | 0,020 |
| Марганец | свыше 0,5 до 1,0 включительно | 0,040 | | св. 0,20 до 0,50 включительно | 0,030 |
| | свыше 1,0 до 2,0 включительно | 0,060 | Титан | св. 0,20 до 0,50 включительно | 0,050 |

| Компонент | Массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность, % | Компонент | Массовая доля компонента, % | Абсолютная погрешность, % |
|--------------------|---------------------------------|--|-----------|--------------------------------|---------------------------|
| Никель | свыше 5,0 до 10,0 включительно | 0,200 | Алюминий | св. 0,50 до 1,0 включительно | 0,080 |
| | свыше 10 до 20 включительно | 0,400 | | св. 0,01 до 0,02 включительно | 0,005 |
| Хром | свыше 10 до 20 включительно | 0,400 | | св. 0,02 до 0,050 включительно | 0,011 |
| Сера | от 0,001 до 0,002 включительно | $0,2 \times [\%S] + 0,0008$ | | св. 0,050 до 0,10 включительно | 0,020 |
| | св. 0,002 до 0,005 включительно | 0,0016 | | св. 0,10 до 0,20 включительно | 0,030 |
| | св. 0,005 до 0,010 включительно | 0,0024 | | св. 0,20 до 0,50 включительно | 0,050 |
| Остальные элементы | | Согласно требованиям ГОСТ Р 54153-2010 | | | |

Примечание: величины концентраций приведены в массовых процентах, если в тексте не указаны другие единицы измерения.

После получения результатов химического анализа провели сравнение фактических данных анализа с паспортными сведениями на слиток и с нормативными требованиями.

На основе анализа физико-химических параметров стали 12X18AГ18 подобрана композицию флюсов с ожидаемой температурой плавления шлака ЭШП на 150–200 градусов ниже температуры ликвидус стали 12X18AГ18

Проведен электрошлаковый переплав по действующей на предприятии технологической инструкции в глуходонный кристаллизатор диаметром 450 мм.

Провели исследование распределение азота, алюминия, титана, ванадия, хрома, марганца, углерода, серы, фосфора, кислорода и примесей цветных металлов по телу слитка; исследовали макроструктуру слитка и распределение неметаллических включений. Для чего осуществили порезку слитка ЭШП с целью получения проб металла для проведения химического и металлографического анализов (рис.2.4).

Каждый темплет после исследования макроструктуры разрезали согласно схемы, приведенной на рис. 2.5, для дальнейшего исследования микроструктуры и проведения химического анализа образцов опытного металла.

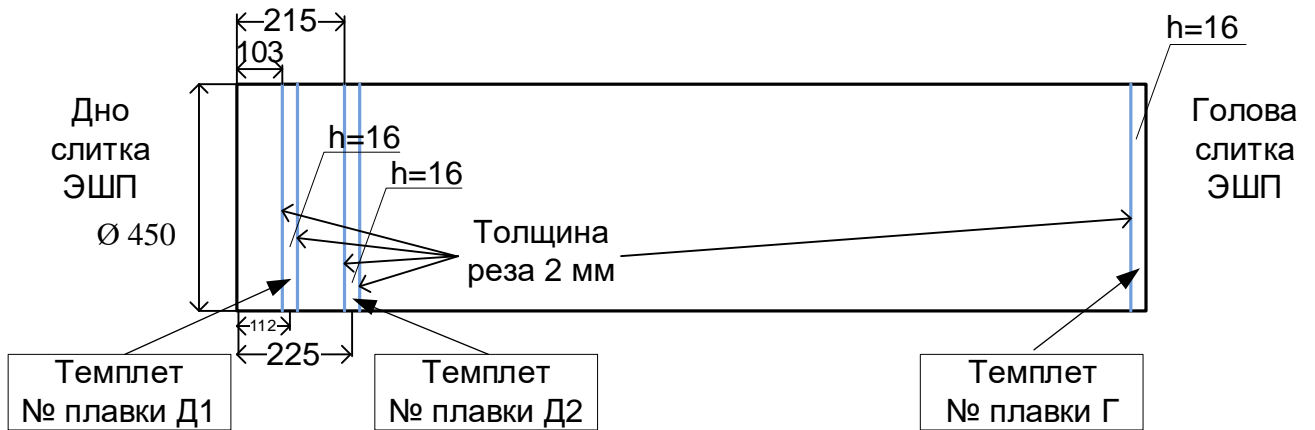


Рисунок 2.4. Схема порезки опытного слитка электрошлакового переплава стали 12X18AG18

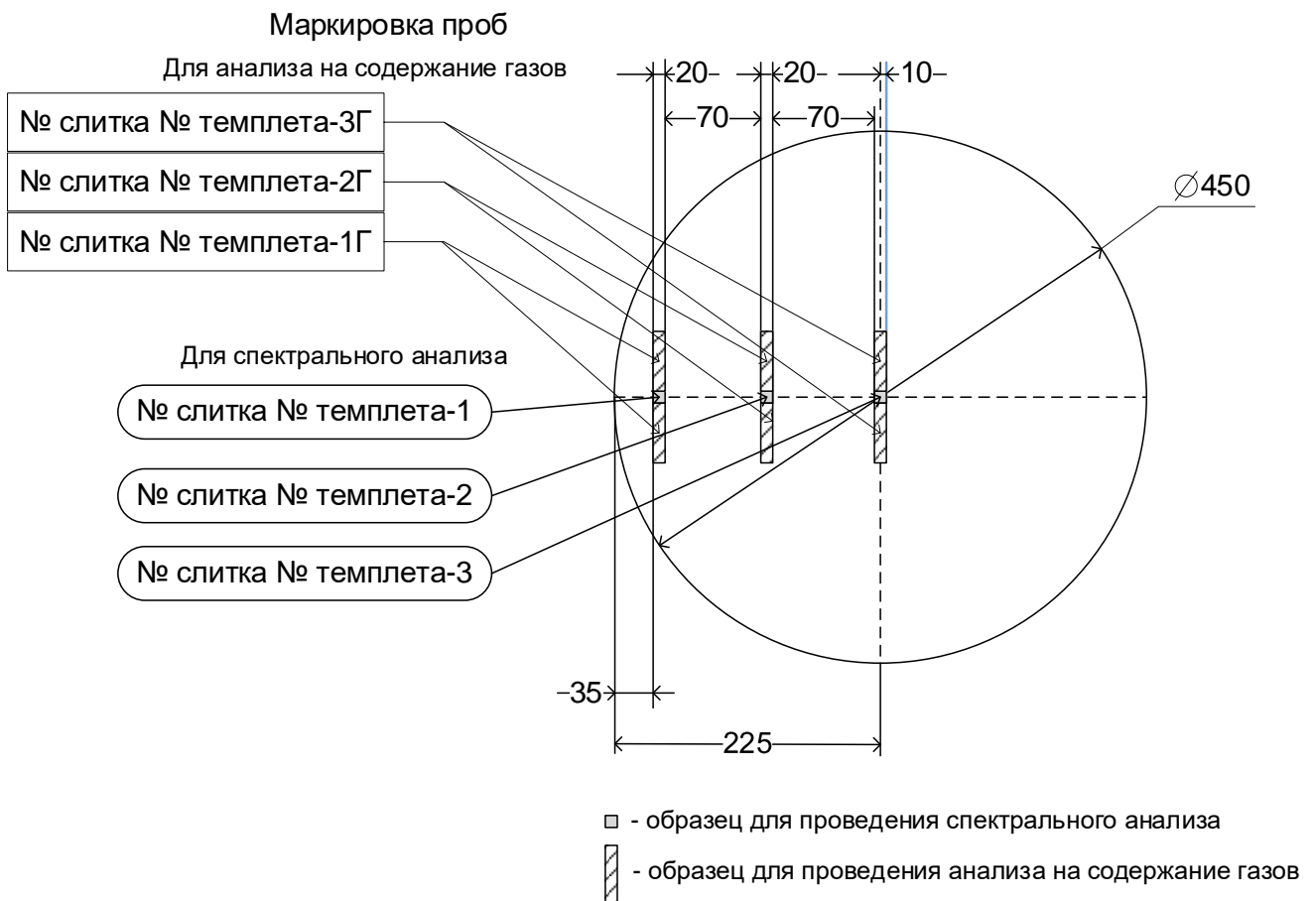


Рисунок 2.5. Схема порезки поперечных темплетов слитка ЭШП стали 12X18AG18-III после анализа макроструктуры

Оценку неметаллических включений металла производили под микроскопом Axiovert A1 сравнением с эталонными шкалами при просмотре всей площади

нетравленных шлифов с продольным направлением волокон согласно межгосударственному стандарту ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79) "Сталь: Металлографические методы определения неметаллических включений" [429].

2.2.2. Методика проведения экспериментов по электрошлаковому переплаву стали 12Х18АГ18

Основные пункты методики работы совпадают с методикой проведения работ по промышленному эксперименту по электрошлаковому переплаву стали 12Х18АГ18.

Отличительной чертой методики работ по стали 04Х20Н6Г11М2АФБ является дополнительное исследование физических свойств стали.

Определение магнитной проницаемости отдельных образцов опытных слитков стали 04Х20Н6Г11М2АФБ и стали 04Х20Н6Г11М2АФБ-Ш проводили по "Методика измерения относительной магнитной проницаемости слабомагнитных сталей аустенитного класса неразрушающим методом №261.0343/01.00258/2014" (свидетельство об аттестации №261.0343/01.00258/2014). Для чего подготавливались образцы в виде пластин размерами 8x20x20 мм. Вид испытаний: измерение магнитной проницаемости μ магнитным методом с использованием магнетоскопа 1.069 (с накладным датчиком локального типа) фирмы Institut Dr. Foerster (сертификат о калибровке RU 01 № 2205/405-2015 от 11.12.2015г.). Относительная погрешность измерений магнитной восприимчивости ($\chi = \mu - 1$) $\delta = 5\%$. Среднеквадратическое отклонение магнитной восприимчивости в условиях внутрिलाбораторной прецизионности, $\sigma_R(\delta) = 1\%$.

2.2.3. Методика проведения экспериментов по выплавке и рафинированию сплавов на основе никеля

План проведения работ по совершенствованию технологии производства сплава Inconel 718 предусматривал последовательное выполнение следующих

пунктов.

Провести две плавки в ВИП-3/4,6 сплава Inconel 718, с разливкой в слитки весом по 400 кг (по пять штук на каждой плавке). Подготовку из полученных слитков расходоуемых электроды для электрошлакового переплава.

Переплавить расходоуемые электроды на установке ЭШП-14(3) в кристаллизатор диаметром 310 мм. методом последовательного сплавления пяти расходоуемых электродов в один слиток с получением двух слитков ЭШП сплава Inconel 718.

Провести гомогенизирующий отжиг слитков ЭШП сплава Inconel 718 длительностью не менее 36 часов при температуре не менее 1100°C; закалить слитки после отжига.

После закалки первый опытный слиток сплава Inconel 718 разрезать на экспериментальные образцы для исследований, схема порезки первого слитка приведена на рис. 2.6: донная обрезь 80 мм; головная обрезь 40 мм; три поперечных темплета толщиной примерно 95 мм. с донной (маркировка темплета – № плавки-Д), центральной (маркировка темплета – № плавки-Ц) и головной частей (маркировка темплета – № плавки-Г) слитка №1 для изготовления технологических проб и образцов для проведения химического, газового анализа и исследования механических свойств.

Замаркировать вырезанные поперечные темплеты следующим образом: №плавки-Д, №плавки-Ц, №плавки-Г.

Отрезать темплеты из головной и донной частей второго слитка ЭШП сплава Inconel 718 для проведения исследований.

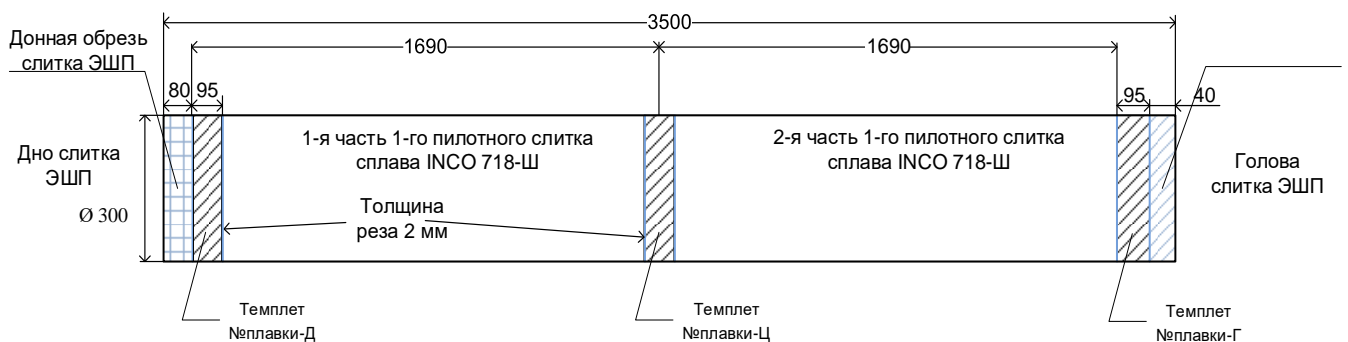


Рисунок 2.6. Схема порезки 1-го опытного слитка ЭШП сплава Inconel 718

Схема порезки второго опытного слитка ЭШП приведена на рис.2.7: донная обреза 80 мм; головная обреза 40 мм; два поперечных темплета (~95 мм) с донной (маркировка темплета - №плавки-Д), и головной частей (маркировка темплета - №плавки-Г) опытного слитка №2 для отбора металла на изготовление технологических проб и образцов для проведения химического, газового анализа и исследования механических свойств.

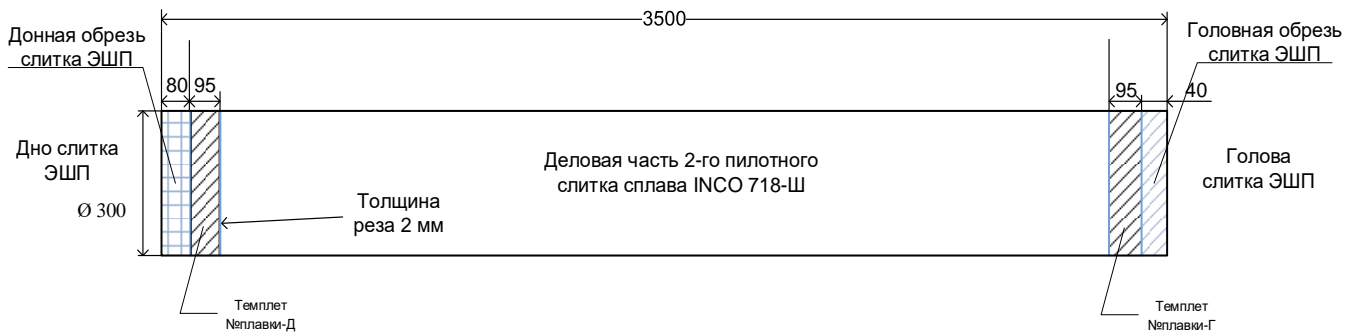


Рисунок 2.7. Схема порезки 2-го опытного слитка ЭШП сплава Inconel 718

Замаркировать вырезанные поперечные темплеты следующим образом: № плавки-Д, № плавки-Г.

Провести порезку всех поперечных темплетов от опытных слитков ЭШП согласно схеме, приведенной на рис.2.8 и 2.9.

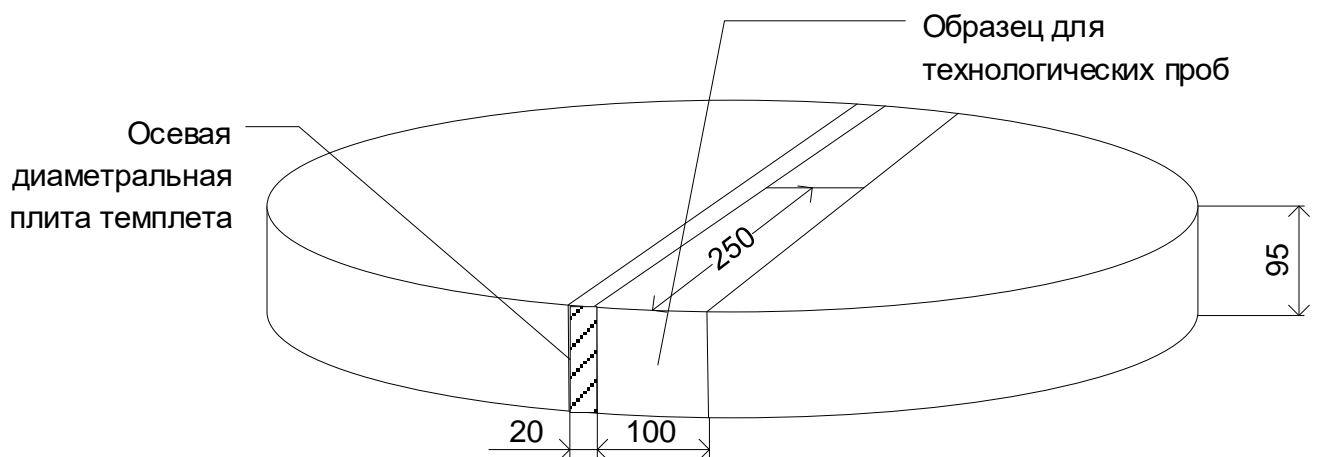


Рисунок 2.8. Схема порезки поперечных темплетов опытных слитков сплавов на основе никеля

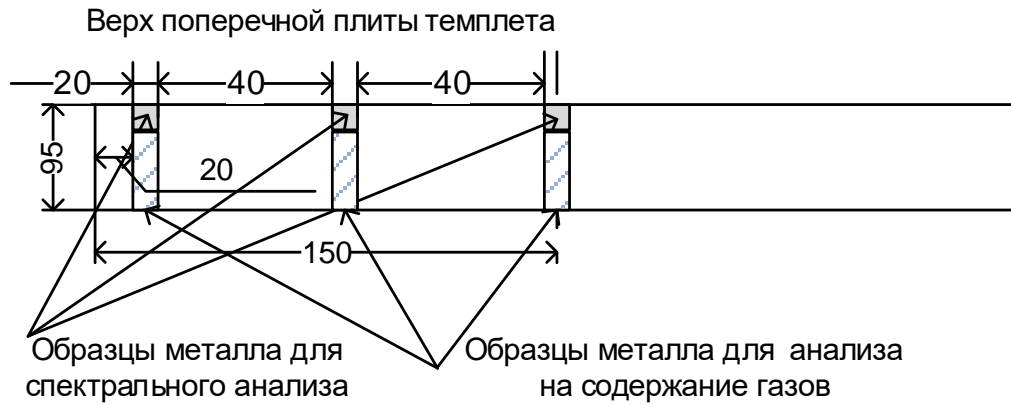


Рисунок 2.9. Схема порезки осевой диаметральной плиты поперечного темплета

Ободрать оставшуюся (деловую) часть второго опытного слитка ЭШП сплава Inconel 718 на обдирочно-шлифовальном станке до диаметра 295 мм и подготовить расходуемый электрод для вакуумного дугового переплава.

Переплавить подготовленный расходуемый электрод в ВДП-2,5 в кристаллизатор диаметром 381 мм или в ВДП-7,0 в кристаллизатор диаметром 388 мм.

Из головной и донной частей слитка ВДП отрезать темплеты для проведения исследований. Схема порезки слитка ВДП сплава Inconel 718 представлена на рис.2.10.

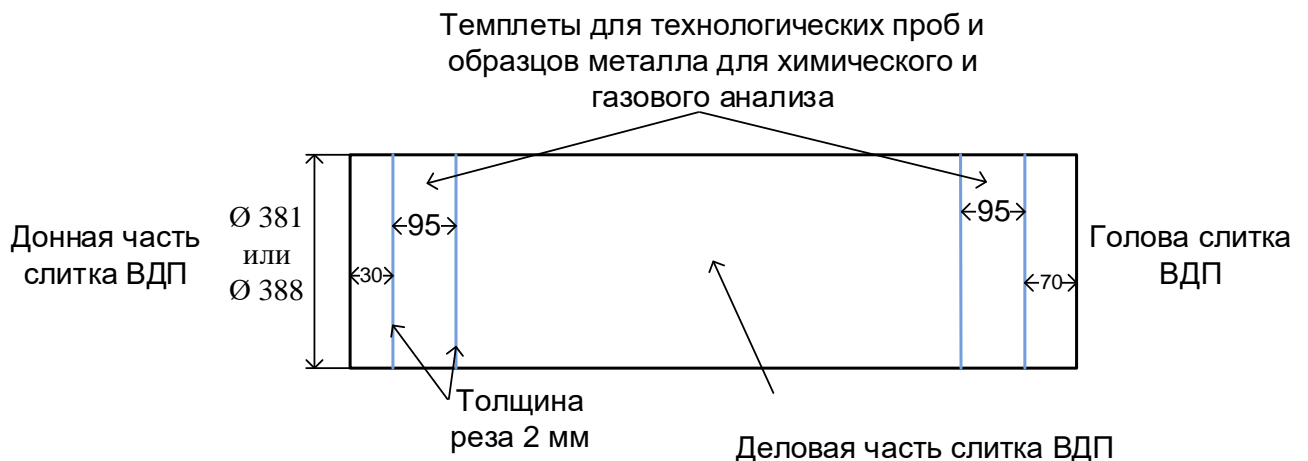


Рисунок 2.10. Схема порезки опытного слитка ВДП сплава Inconel 718

Разрезать темплеты опытного слитка ВДП сплава Inconel 718 согласно схемам, приведенным на рис. 2.8 и 2.9.

Замаркировать образцы для химического анализа донных темплетов опытных слитков сплава Inconel 718 следующим образом:

- номер плавки Д1– первый образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{3}{4}$ радиуса слитка);
- номер плавки Д2– второй образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{1}{2}$ радиуса слитка);
- номер плавки Д3– образец из осевой линии слитка.

Замаркировать образцы для химического анализа темплета из центральной части первого опытного слитка ЭШП сплава Inconel 718 следующим образом:

- номер плавки Ц1– первый образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{3}{4}$ радиуса слитка);
- номер плавки Ц2– второй образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{1}{2}$ радиуса слитка);
- номер плавки Ц3– образец из осевой линии слитка.

Замаркировать образцы для химического анализа темплетов от головных частей опытных слитков сплава Inconel 718 следующим образом:

- номер плавки Г1 – первый образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{3}{4}$ радиуса слитка);
- номер плавки Г2– второй образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{1}{2}$ радиуса слитка);
- номер плавки Г3 – образец из осевой линии слитка.

Замаркировать образцы для анализа на содержание газов из донных темплетов опытных слитков сплава Inconel 718 следующим образом:

- номер плавки ГД1– первый образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{3}{4}$ радиуса слитка);
- номер плавки ГД2– второй образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{1}{2}$ радиуса слитка);
- номер плавки ГД3– образец из осевой линии слитка.

Замаркировать образцы для анализа на содержание газов из темплета от центра части первого опытного слитка ЭШП сплава Inconel 718 следующим образом:

- номер плавки ГЦ1 – первый образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{3}{4}$ радиуса слитка);
- номер плавки ГЦ2 – второй образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{1}{2}$ радиуса слитка);
- номер плавки ГЦ3 – образец из осевой линии слитка.

Замаркировать образцы для анализа на содержание газов из темплетов от головных частей слитков сплава Inconel 718 следующим образом:

- номер плавки ГГ1 – первый образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{3}{4}$ радиуса слитка);
- номер плавки ГГ2 – второй образец от боковой поверхности слитка (на $\frac{1}{2}$ радиуса слитка);
- номер плавки ГГ3 – образец из осевой линии слитка.

Провести атомно-эмиссионный спектральный химический анализ состава вырезанных образцов металла, химический анализ на содержание цветных металлов (Pb, Bi, Se) [430-432] и анализ на содержание газов: кислород, водород, азот.

Отобрать из всех поперечных темплетов опытных слитков сплава Inconel 718 образцы для технологических проб. Замаркировать образцы для технологических проб из темплета от головной части слитка ЭШП следующим образом:

- номер плавки ТП Д – из темплетов от донной части слитков;
- номер плавки ТП Ц – из темплета от центральной части слитка ЭШП;
- номер плавки ТП Г – из темплетов от головной части опытных слитков.

Провести изготовление перекованных проб с последующим проведением механических испытаний при комнатной и повышенной (649°C) температурах.

Передать деловую часть опытного слитка ВДП согласно в дальнейший передел для изготовления готовой продукции.

Сравнить технологические свойства слитков ВДП сплава Inconel 718, полученных по технологическим цепочкам ВИП-ВДП и ВИП-ЭШП-ВДП.

Сравнить механические свойства готовой продукции из сплава, полученного по разным технологическим линиям.

2.3.Методика термодинамического моделирования

Термодинамические расчеты равновесных систем «металл – газ» и "шлак – газ" выполняли в программе "Терра" версии 5.3, разработанной в МВТУ им. Н.Э. Баумана [378-380].

Термодинамическое моделирование фазового состава сталей и сплавов, равновесного и неравновесного процесса кристаллизации сталей и сплавов, определение температур ликвидуса, солидуса и растворимости газов сталях и сплавах проводили в пакете прикладных программ Thermo-Calc версии 2017a и версии 2019a. Программа Thermo-Calc реализует термодинамические расчеты по методу CALPAD [436-438].

2.3.1.Методика термодинамического моделирования

Процесс растворения азота в сплаве описали реакцией:



Равновесное парциальное давление азота над жидким сплавом определяли из выражения закона Сивертса:

$$\lg P_{N_2} = 2 \times (\lg [N]_{Ni} + \lg f_{[N]} - \lg K_N) \quad (2.2)$$

где P_{N_2} - равновесное парциальное давление азота над жидким сплавом, атм., $f_{[N]}$ - коэффициент активности растворенного в сплаве азота, K_N - константа равновесия реакции (2.1), по данным работы [346] $K_N = 0,002$ при температуре 1600°C;

Коэффициент активности азота определяли с использованием массовых параметров взаимодействия первого порядка для сплавов на основе никеля e_N^j :

$$\lg f_{[N]} = \sum_{j=2}^k e_N^j \cdot [\%J], \quad (2.3)$$

Численные значения массовых параметров взаимодействия для азота, растворенного в никеле, для температуры 1600°C приведены в табл.2.9.

Таблица 2.9 – Значения массовых параметров взаимодействия первого порядка для сплавов на основе никеля.

| Элемент J | Si | Mn | Cr | Fe | Mo | Cu | Al | Ti | W | Co | Ce | N |
|-----------|--------|---------|-----------------|-------|-------|--------|----|-----------------|--------|---------|-------|-------|
| e_N^J | 0,0119 | -0,0179 | -0,11 | -0,02 | -0,04 | 0,0015 | 0 | -0,2 | -0,026 | -0,0054 | -0,55 | 0,28 |
| Источник | [405] | [405] | [194, 346, 231] | | | [405] | | [194, 346, 231] | | | | [405] |

2.4.Методика статистического анализа полученных данных

Статистический анализ проводили с помощью прикладной программы "STATISTICA".

В процессе регрессионного анализа для каждой выборки из N точек определяли число степеней свободы рассматриваемой выборки S , коэффициент корреляции R , коэффициент детерминации R^2 , стандартные ошибки определения коэффициентов корреляционного уравнения Δa , Δb соответственно, критерии Стьюдента каждого коэффициента регрессии t_a , t_b , критическое значение двустороннего критерия Стьюдента t_t (табличное значение), критерий Фишера F и критическое значение критерия Фишера F_t . Уровень значимости α для всех выборок был принят равным 0,05. Значимость коэффициентов регрессионного уравнения определяли путём сравнения модуля соответствующего критерия Стьюдента с критическим значением двустороннего критерия Стьюдента, определяемого по справочной таблице [455], при соблюдении условия

$$|t_a|, |t_b| > t_t \quad (2.4)$$

коэффициенты регрессионного уравнения признаются значимыми. Значимость уравнения регрессии в целом определяли с помощью F-статистики. Если

рассчитанный для полученного уравнения регрессии в исследуемой выборке критерий Фишера больше критического значения

$$F > F_t \quad (2.5)$$

то уравнение регрессии является значимым на принятом уровне значимости α .

При невыполнении условия (2.4) соответствующие коэффициенты регрессионного уравнения признаются незначимыми, а при невыполнении условия (2.5) – соответствующее уравнение незначимым.

Выводы

1. Выбранная методика обеспечивает однозначность и достоверность трактовки полученных экспериментальных и расчетных данных.

2. Разработана методика проведения промышленных экспериментов на дуговых сталеплавильных печах, позволяющая без радикальных изменений карты технологического процесса осуществить их реализацию в рамках текущего производства.

3. Разработана методика анализа результатов промышленных экспериментов, проводимых на агрегатах специальной электрометаллургии (ВИП, ЭШП, ВДП). Разработаны схемы порезки экспериментальных слитков ЭШП и ВДП для обеспечения адекватного сравнения результатов экспериментов с показателями качества текущего производства аналогичных металлов.

4. Выбраны и проверены методики термодинамического моделирования равновесных состояний систем "металл – газ" и моделирования фазового состава сталей и сплавов, равновесного и неравновесного процесса кристаллизации сталей и сплавов, определение температур ликвидуса, солидуса и растворимости газов сталях и сплавах.

Основные материалы настоящего раздела опубликованы в работах [439, 440, 441, 442, 443, 444].

РАЗДЕЛ 3

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ РАВНОВЕСИЯ В СИСТЕМЕ ГАЗ-ШЛАК-МЕТАЛЛ

3.1. Уточнение термодинамического описания растворов кислорода и углерода в железе

Большинство экспериментов по изучению поведения кислорода в растворе жидкого железа проводилось в системе железо – водяной пар – водород. Контролировали соотношение водорода и водяного пара в газовой фазе, давление газовой смеси и содержание кислорода в образце металла, полученного после длительной выдержки в заданной атмосфере. Считается [206], что в равновесие в системе описывается химической реакцией



Константа равновесия реакции (3.1):

$$K = P_{H_2O} / (P_{H_2} \cdot f_{[O]} \cdot [\%O]). \quad (3.2)$$

Перенесем коэффициент активности кислорода в железе в левую часть уравнения (3.2) и получим слева произведение, которое обозначим как

$$K' = K \cdot f_{[O]}. \quad (3.3)$$

Контролируемые в процессе эксперимента параметры можно представить в виде функции $K' = f(P_{H_2O}/P_{H_2}, [\%O])$. Если линейная аппроксимация экспериментальных точек в указанных координатах будет параллельна оси X, то коэффициент активности кислорода будет равен единице и раствор кислорода в железе можно отнести к типу разбавленных. В противном случае, если будет зафиксирован какой-либо угол наклона линейной регрессии экспериментальных точек, то коэффициент активности кислорода не равен единице и раствор кислорода относится к типу реальных.

Результаты работ [203, 204, 206, 209, 211, 217, 218] представили в виде точек в координатах по оси X – концентрация кислорода в металле [%O], % масс., по оси Y – десятичный логарифм величины модифицированной константы равновесия $\lg K'$. Провели линейный регрессионный анализ групп точек, относящихся к отдельно взятой работе и температуре исследования, а также регрессионный анализ точек для одной температуры, полученных разными исследователями (обобщённые данные) (рис. 3.1 – 3.12). В качестве регрессионной функции выбрана линейная, так как наличие угла наклона линии функции $\lg K' = f([\%O])$ даёт ответ о значении коэффициента активности отличном от нуля и его зависимости от концентрации кислорода в виде произведения параметра взаимодействия первого порядка на концентрацию кислорода:

$$\lg K' = a + b \cdot x = a + e_O^O \cdot [\%O]. \quad (3.4)$$

Результаты регрессионного анализа выборок экспериментальных данных представлены в табл. 3.1.

По итогам анализа можно сделать следующие заключения:

1. Большинство регрессионных линий в выбранных координатах не являются статистически значимыми – из 21 выборки только для 9 выборок уравнение линейной регрессии статистически значимо, в остальных выборках в уравнениях линейной регрессии значимым является только коэффициент «а»;
2. При повышении температуры эксперимента снижается значимость регрессионного уравнения;
3. Более ранние выборки [203, 217, 218] отличаются значимостью и высокими коэффициентами детерминации; более поздние эксперименты (после 1960 года) не подтверждают зависимости, найденные в период с 1933 по 1958 годы;
4. При объединении выборок результатов экспериментов различных авторов при одной температуре из 6 регрессионных уравнений только два получаются значимыми (при 1823–1824 К и 1893–1894 К) остальные – незначимые.

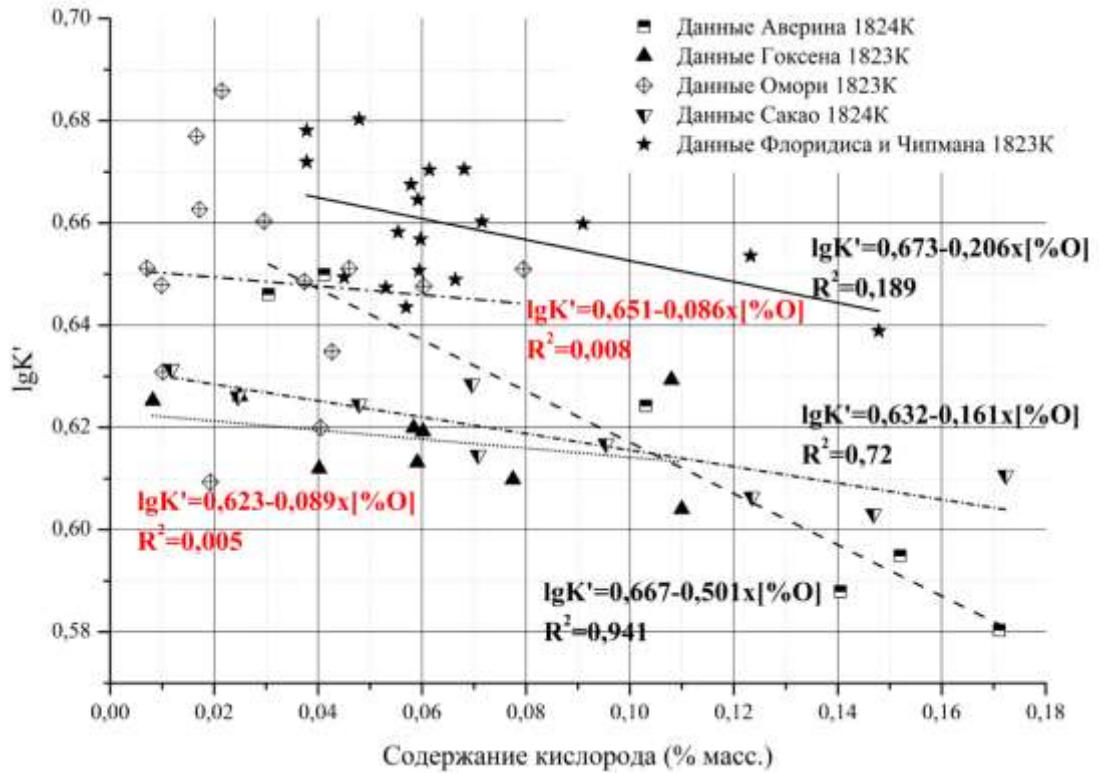


Рисунок 3.1. Анализ экспериментальных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1823 К

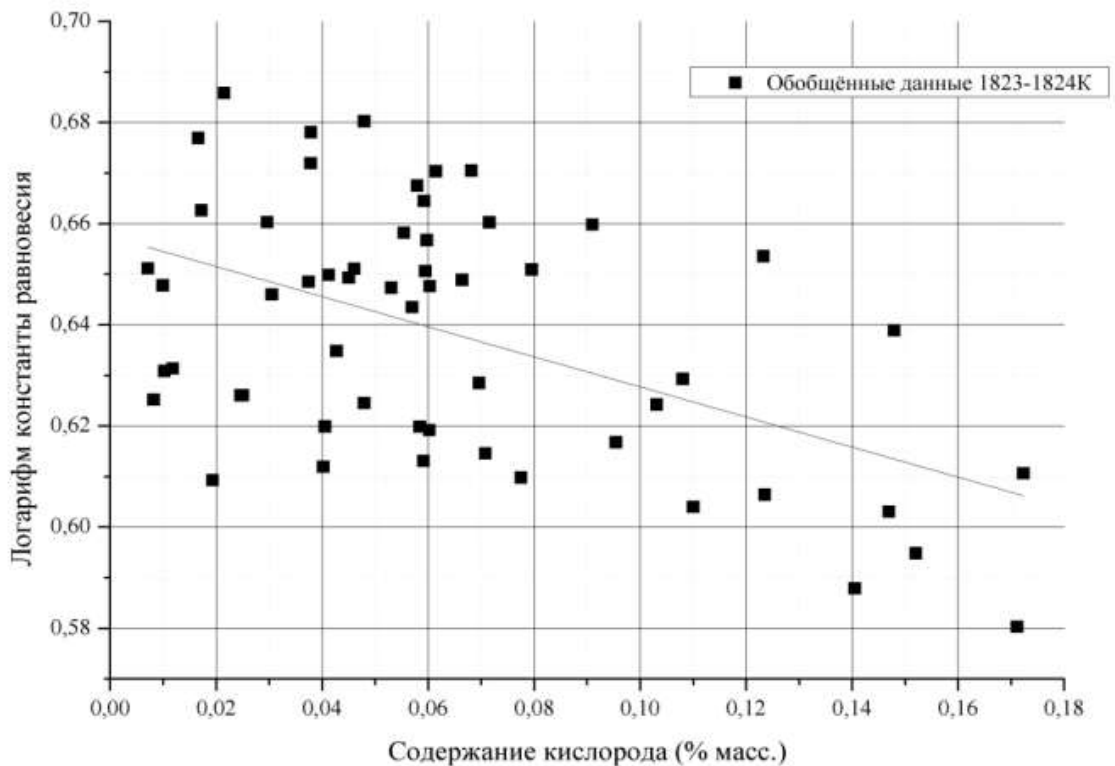


Рисунок 3.2. Анализ суммарных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1823–1824 К.

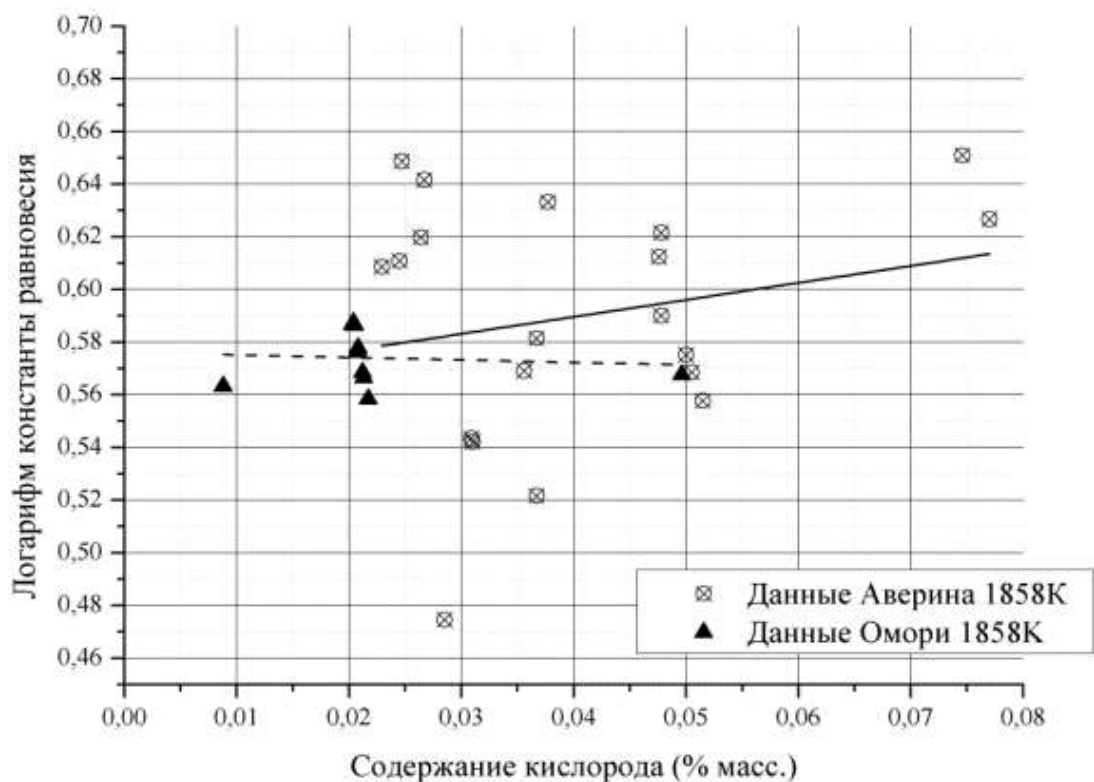


Рисунок 3.3. Анализ экспериментальных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1858 К

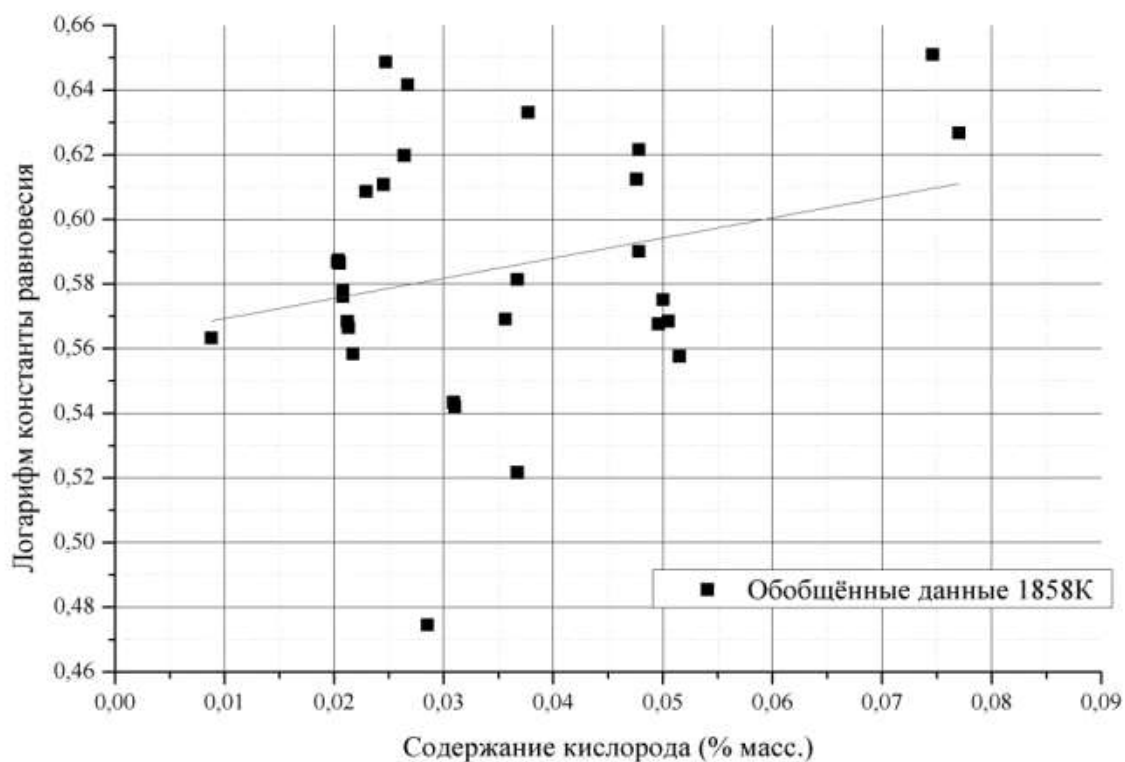


Рисунок 3.4. Анализ суммарных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1858 К

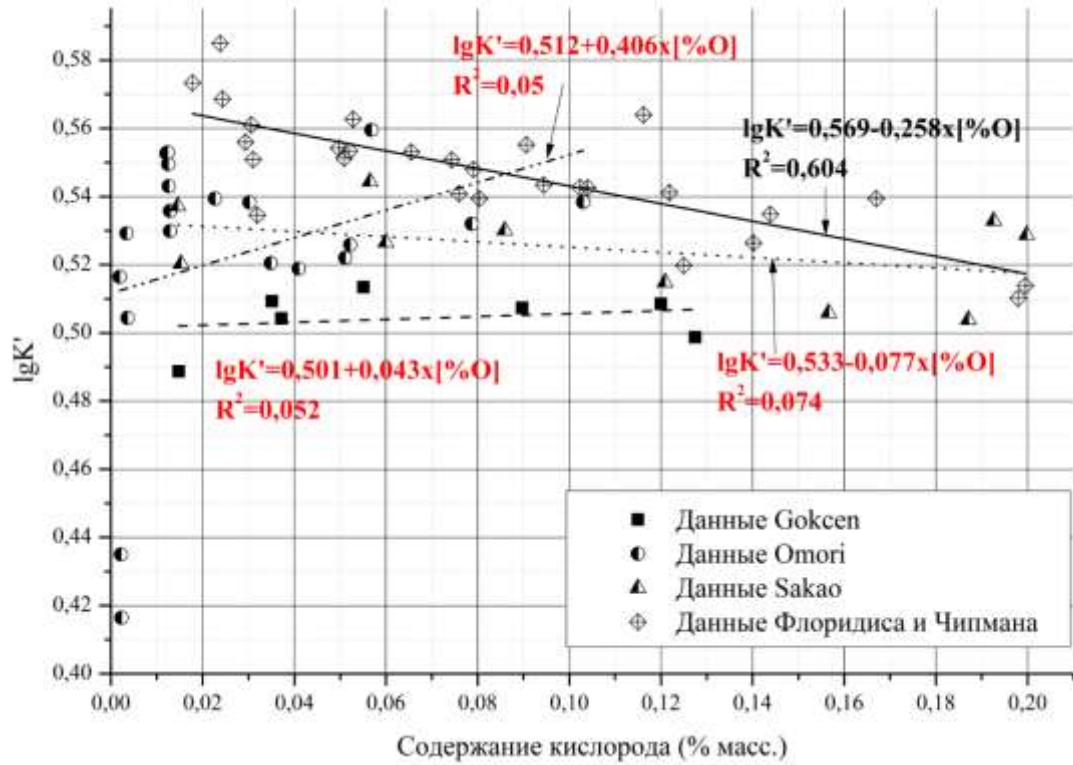


Рисунок 3.5. Анализ экспериментальных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1873 К

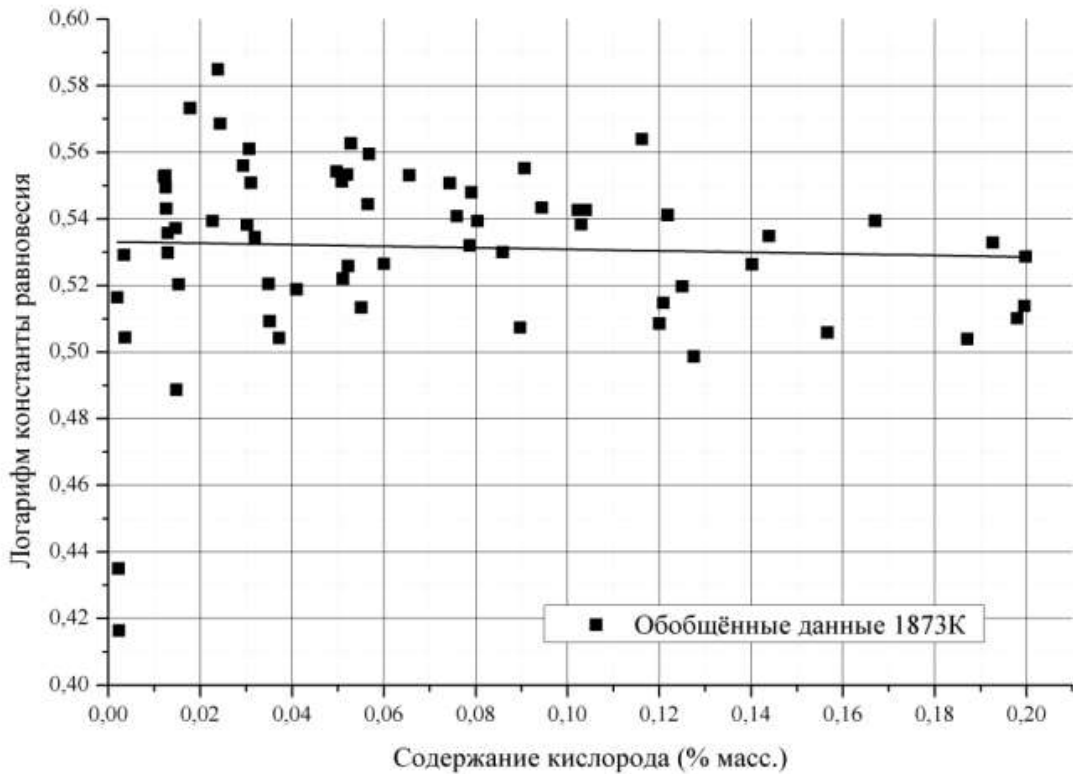


Рисунок 3.6. Анализ суммарных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1873 К

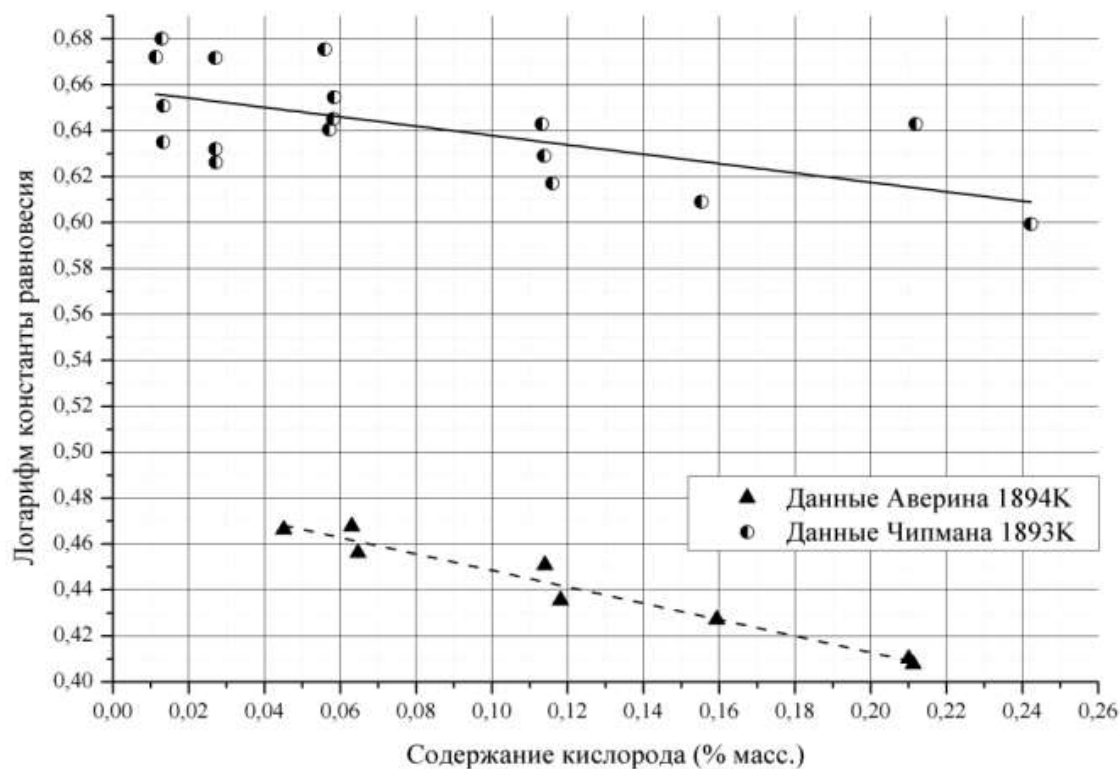


Рисунок 3.7. Анализ экспериментальных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1893–1894 К

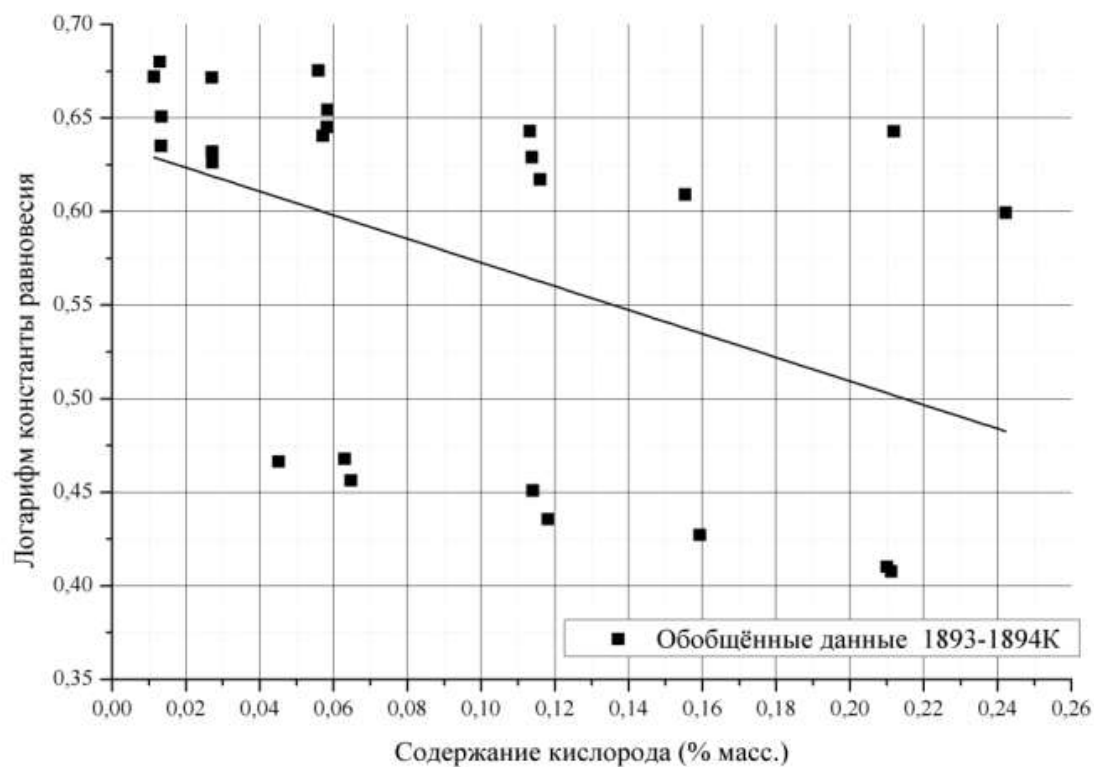


Рисунок 3.8. Анализ суммарных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1893–1894 К

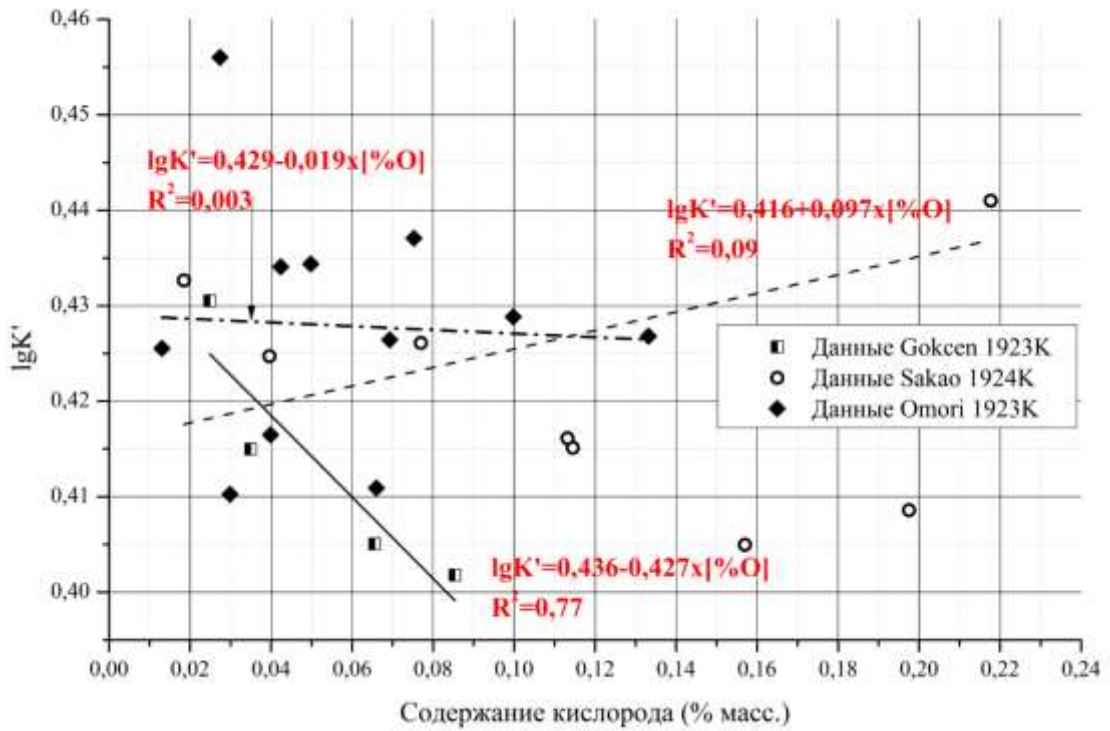


Рисунок 3.9. Анализ экспериментальных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1923–1924 К

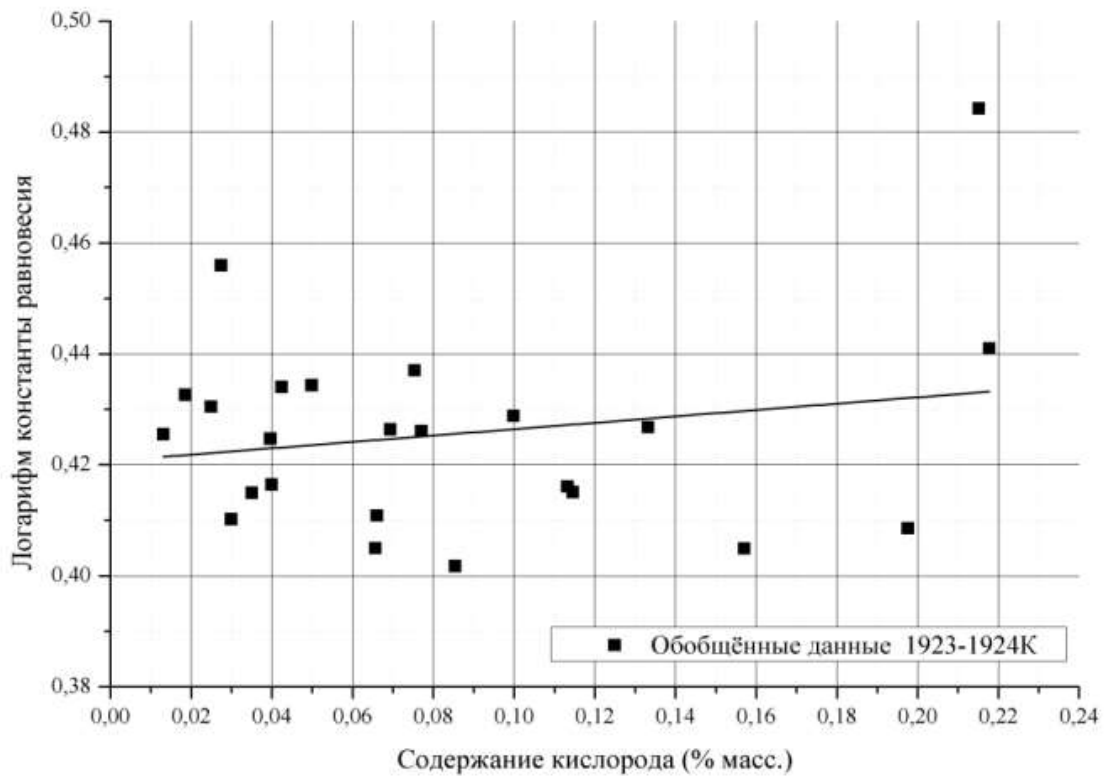


Рисунок 3.10. Анализ суммарных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1923–1924 К

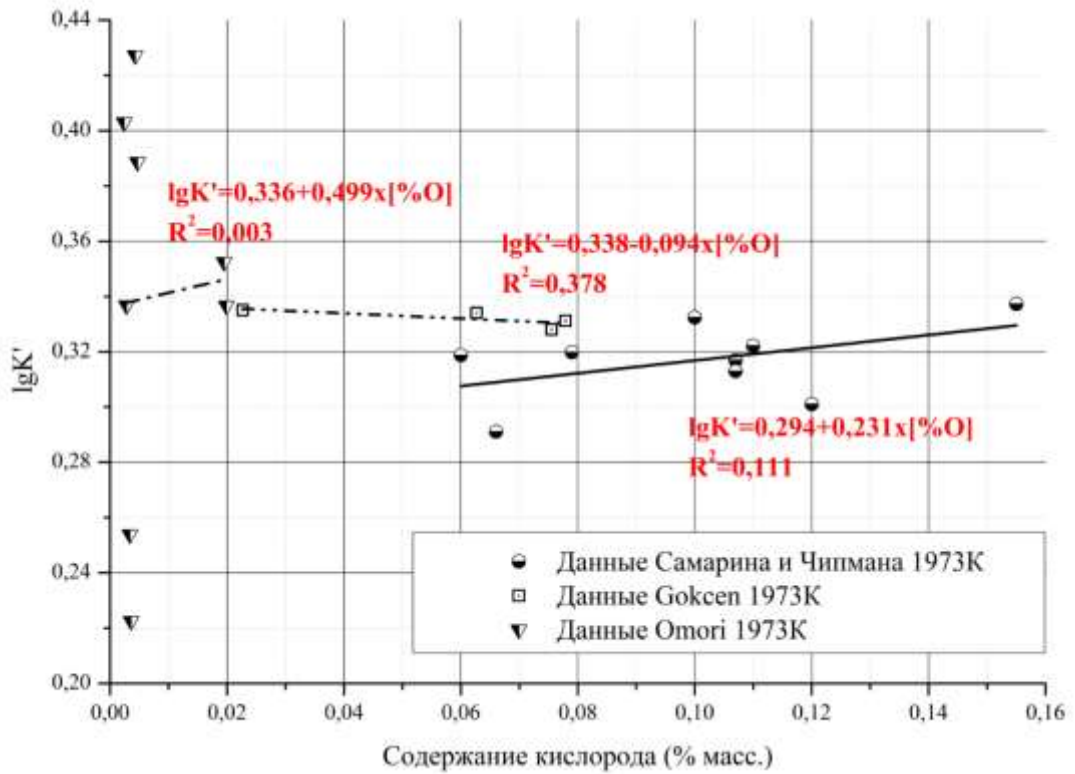


Рисунок 3.11. Анализ экспериментальных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1973 К

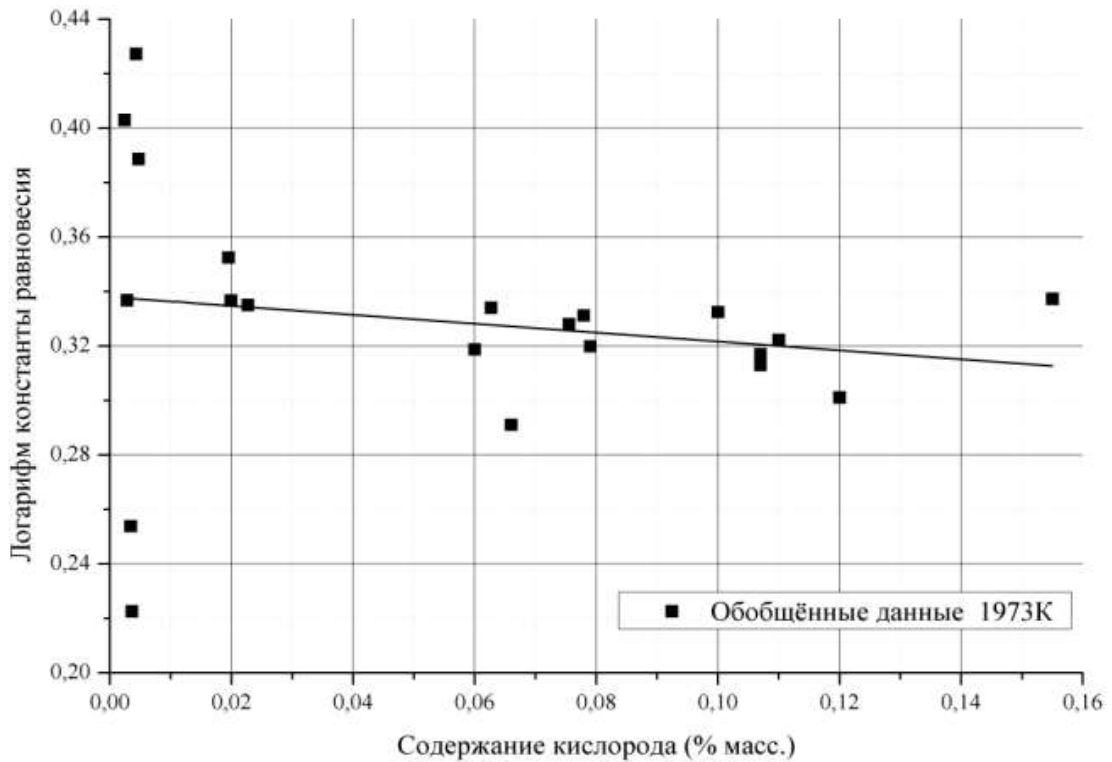


Рисунок 3.12. Анализ суммарных данных по изучению равновесия в системе Fe-H₂O-H₂ при T=1973 К

Таблица 3.1. Результаты статистического анализа зависимости $\lg K' = f([\%O])$ для системы Fe-H₂-H₂O

| Источник данных | N | R ² | Линейная регрессия вида $y=a+b \cdot x$ | | | | C | Уровень значимости $\alpha=0,05$ | | | Вывод о значимости уравнения регрессии |
|---------------------------|----|----------------|---|------------|---------|------------|----|--|-------------------------|--|--|
| | | | a | Δa | b | Δb | | t-тест коэффициента a | t-тест коэффициента b | F-тест уравнения регрессии | |
| T=1823-1824K | | | | | | | | | | | |
| [206] | 18 | 0,189 | 0,673 | 0,0066 | -0,2057 | 0,0924 | 16 | t _t =2,1199 t _a =101,04 | t _b =2,2256 | F _t (1,16)=4,49 F(1,16)=4,953 | значимо |
| [203] | 6 | 0,941 | 0,6672 | 0,0066 | -0,5013 | 0,0557 | 4 | t _t =2,7764 t _a =100,49 | t _b =9,0057 | F _t (1,4)=7,71 F(1,4)=81,103 | значимо |
| [204] | 9 | 0,005 | 0,623 | 0,006 | -0,0887 | 0,0871 | 7 | t _t =2,3646 t _a =103,98 | t _b =1,018 | F _t (1,7)=5,59 F(1,7)=1,0364 | незначимо |
| [209] | 9 | 0,72 | 0,6317 | 0,0034 | -0,1613 | 0,0347 | 7 | t _t =2,3646 t _a =183,3456 | t _b =4,6435 | F _t (1,7)=5,59 F(1,7)=21,562 | значимо |
| [211] | 14 | 0,008 | 0,651 | 0,0104 | -0,0862 | 0,2783 | 12 | t _t =2,1788 t _a =62,728 | t _b =0,3096 | F _t (1,12)=4,75 F(1,12)=0,0959 | незначимо |
| [203, 204, 206, 209, 211] | 56 | 0,243 | 0,6575 | 0,0053 | -0,2976 | 0,0689 | 54 | t _t =2,0003 t _a =124,41 | t _b =4,319 | F _t (1,54)=4,03 F(1,54)=18,65 | значимо |
| T=1847K | | | | | | | | | | | |
| [203] | 9 | 0,531 | 0,5891 | 0,0146 | -0,3681 | 0,1161 | 7 | t _t =2,7764 t _a =40,236 | t _b =3,17 | F _t (1,7)=5,59 F(1,7)=10,054 | значимо |
| T=1858K | | | | | | | | | | | |
| [203] | 20 | 0,046 | 0,5638 | 0,0298 | 0,6454 | 0,6898 | 18 | t _t =2,109 t _a =18,931 | t _b =0,9357 | F _t (1,18)=4,41 F(1,18)=0,876 | незначимо |
| [211] | 10 | 0,008 | 0,576 | 0,0089 | -0,094 | 0,3626 | 8 | t _t =2,306 t _a =64,723 | t _b =0,2591 | F _t (1,8)=5,32 F(1,8)=0,067 | незначимо |
| [203, 211] | 30 | 0,035 | 0,5631 | 0,0166 | 0,6232 | 0,4359 | 28 | t _t =2,0484 t _a =33,998 | t _b =1,4297 | F _t (1,28)=4,2 F(1,28)=2,044 | незначимо |
| T=1870K | | | | | | | | | | | |
| [203] | 10 | 0,555 | 0,5095 | 0,0091 | -0,2201 | 0,0629 | 8 | t _t =2,306 t _a =55,903 | t _b =3,4968 | F _t (1,8)=5,32 F(1,8)=12,228 | значимо |

Продолжение таблицы 3.1.

| Источник данных | N | R ² | Линейная регрессия вида $y=a+b \cdot x$ | | | C | Уровень значимости $\alpha=0,05$ | | | Вывод о значимости уравнения регрессии | |
|----------------------|----|----------------|---|--------|---------|--------|----------------------------------|---------------------------------|-----------------------|--|----------------------------|
| | | | a | Δa | b | | Δb | t-тест коэффициента a | t-тест коэффициента b | | F-тест уравнения регрессии |
| T=1873K | | | | | | | | | | | |
| [206] | 28 | 0,604 | 0,5689 | 0,0039 | -0,2578 | 0,0397 | 26 | $t_t=2,0555$ $ t_a =144,788$ | $ t_b =6,4882$ | $F_t(1,26)=6,22$ $F(1,26)=42,096$ | значимо |
| [204] | 7 | 0,052 | 0,5014 | 0,0065 | 0,0428 | 0,0813 | 5 | $t_t=2,5706$ $ t_a =77,281$ | $ t_b =0,5266$ | $F_t(1,5)=6,61$ $F(1,5)=0,277$ | незначимо |
| [209] | 10 | 0,074 | 0,5328 | 0,0075 | -0,0765 | 0,0584 | 8 | $t_t=2,306$ $ t_a =70,8448$ | $ t_b =1,31$ | $F_t(1,8)=5,32$ $F(1,8)=1,7163$ | незначимо |
| [211] | 20 | 0,05 | 0,5116 | 0,0113 | 0,4063 | 0,2873 | 18 | $t_t=2,1009$ $ t_a =45,4709$ | $ t_b =1,4143$ | $F_t(1,18)=4,41$ $F(1,18)=2,0002$ | незначимо |
| [204, 206, 209, 211] | 65 | 0,002 | 0,5331 | 0,0055 | -0,0229 | 0,0615 | 63 | $t_t=2,0003$ $ t_a =97,479$ | $ t_b =0,372$ | $F_t(1,63)=4,00$ $F(1,63)=0,1384$ | незначимо |
| T=1893-1894K | | | | | | | | | | | |
| [217] | 17 | 0,35 | 0,6584 | 0,0068 | -0,2041 | 0,0658 | 15 | $t_t=2,1315$ $ t_a =96,498$ | $ t_b =3,104$ | $F_t(1,15)=4,54$ $F(1,15)=9,633$ | значимо |
| [203] | 8 | 0,952 | 0,484 | 0,0041 | -0,3573 | 0,0301 | 6 | $t_t=2,4469$ $ t_a =116,88$ | $ t_b =11,8561$ | $F_t(1,6)=5,99$ $F(1,6)=140,57$ | значимо |
| [203, 217] | 25 | 0,175 | 0,6362 | 0,0297 | -0,6341 | 0,2568 | 23 | $t_t=2,0687$ $ t_a =21,426$ | $ t_b =2,469$ | $F_t(1,23)=4,28$ $F(1,23)=6,096$ | значимо |
| T=1923-1924K | | | | | | | | | | | |
| [204] | 4 | 0,77 | 0,4356 | 0,0075 | -0,427 | 0,1286 | 2 | $t_t=4,3027$ $ t_a =58,449$ | $ t_b =3,3211$ | $F_t(1,2)=18,5$ $F(1,2)=11,0295$ | незначимо |
| [209] | 9 | 0,09 | 0,4158 | 0,0169 | 0,0969 | 0,1162 | 7 | $t_t=2,3646$ $ t_a =24,5512$ | $ t_b =0,8337$ | $F_t(1,7)=5,59$ $F(1,7)=0,6951$ | незначимо |
| [211] | 11 | 0,003 | 0,4290 | 0,0084 | -0,0194 | 0,1237 | 9 | $t_t=2,2622$ $ t_a =51,318$ | $ t_b =0,157$ | $F_t(1,9)=5,12$ $F(1,9)=0,0245$ | незначимо |
| [204, 209, 211] | 24 | 0,038 | 0,4207 | 0,0063 | 0,0574 | 0,0615 | 22 | $t_t=2,0739$ $ t_a =66,361$ | $ t_b =0,933$ | $F_t(1,22)=4,3$ $F(1,8)=0,8702$ | незначимо |

Продолжение таблицы 3.1.

| Источник данных | N | R ² | Линейная регрессия вида $y=a+b \cdot x$ | | | | C | Уровень значимости $\alpha=0,05$ | | | Вывод о значимости уравнения регрессии |
|-----------------|----|----------------|---|------------|---------|------------|----|----------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|--|
| | | | a | Δa | b | Δb | | t-тест коэффициента a | t-тест коэффициента b | F-тест уравнения регрессии | |
| T=1973K | | | | | | | | | | | |
| [218] | 9 | 0,111 | 0,2938 | 0,017 | 0,2308 | 0,1631 | 7 | $t_t=2,2622$ $ t_a =17,292$ | $ t_b =1,4146$ | $F_f(1,7)=5,59$ $F(1,7)=2,001$ | незначимо |
| [204] | 4 | 0,378 | 0,3377 | 0,0036 | -0,0940 | 0,0559 | 2 | $t_t=4,3027$ $ t_a =94,8066$ | $ t_b =1,6804$ | $F_f(1,2)=18,5$ $F(1,2)=2,8236$ | незначимо |
| [211] | 8 | 0,003 | 0,3364 | 0,0398 | 0,4985 | 3,8509 | 6 | $t_t=2,4469$ $ t_a =8,449$ | $ t_b =0,1294$ | $F_f(1,6)=5,99$ $F(1,6)=0,0168$ | незначимо |
| [204, 211, 218] | 21 | 0,031 | 0,3380 | 0,0155 | -0,1637 | 0,2094 | 19 | $t_t=2,093$ $ t_a =21,846$ | $ t_b =0,782$ | $F_f(1,19)=4,38$ $F(1,19)=0,6111$ | незначимо |

Таким образом, при анализе всего массива экспериментальных данных по предложенной в [206] схеме невозможно однозначно утверждать, что растворы кислорода в железе не подчиняются закону Генри.

При рассмотрении равновесного состояния в системе Fe-H₂O-H₂ необходимо иметь в виду, что обычно используемая константа равновесия (3.2) представляет собой отношение двух констант, одна из которых описывает газовое равновесие, а вторая – межфазное распределение кислорода (константа Генри). Температурные зависимости этих констант следуют, вообще говоря, разным законам. Это необходимо учитывать при необходимости более точного анализа вопроса о растворимости кислорода в железе.

Кислород обладает ограниченной растворимостью в жидком железе. Даже насыщенные растворы кислорода в железе характеризуются преимущественным содержанием железа. Можно предположить, что ненасыщенные растворы кислорода в железе ведут себя как разбавленные растворы, в которых поведение растворителя близко к поведению компонента в идеальном растворе. При анализе фактических данных концентрацию целесообразнее выражать в мольных долях или атомных процентах, так как именно эти способы выражения дают реальное соотношение количества частиц раствора без учёта влияния атомных масс компонентов раствора. В качестве компонентов газовой и конденсированной фаз рассматриваем химические элементы.

Критерием подчинённости поведения растворённого компонента законам разбавленных растворов выбрали соответствие закону Генри [456], который для кислорода, растворённого в железе можно записать в виде:

$$x_{[O]} = k_H^{(O)} \cdot P_{\{O\}}, \quad (3.5)$$

где $x_{[O]}$ – концентрация кислорода в металле, м.д.; $P_{\{O\}}$ – парциальное давление кислорода (моноатомного) в газовой фазе над жидким металлом; $k_H^{(O)}$ – константа Генри для кислорода, растворённого в железе.

Для анализа поведения кислорода в расплавах железа использовали экспериментальные данные по исследованию равновесия как в системе Fe-H₂O-H₂

[203, 204, 206, 209, 211, 217, 218], так и в системе Fe–CO–CO₂ [81, 89, 204, 213]. Для проверки выполнимости уравнения (3.5) рассчитывали величины парциального давления атомарного кислорода в газовой фазе, которые находили из соответствующих выражений констант равновесия следующих реакций:



соответственно:

$$K_1 = P_{H_2O} / (P_{H_2} \cdot P_O), \quad (3.8)$$

$$K_2 = P_{CO_2} / (P_{CO} \cdot P_O) \quad (3.9)$$

где K_1 – константа равновесия реакции окисления водорода (3.6), P_{H_2O} – парциальное давление паров воды, атм., P_{H_2} – парциальное давление водорода, атм., K_2 – константа равновесия реакции окисления угарного газа (3.7), P_{CO} , P_{CO_2} – парциальные давления оксидов углерода, атм.

Из выражения (3.8) получаем:

$$P_O = \frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}} / K_1. \quad (3.10)$$

Причём, соотношение $\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}}$ измерялось непосредственно в эксперименте, т.е. для определения парциального давления атомарного кислорода необходимо рассчитать только константу равновесия реакции (3.6).

Аналогично из выражения (3.9) получаем:

$$P_O = \frac{P_{CO_2}}{P_{CO}} / K_2 \quad (3.11)$$

Расчёт констант равновесия K_1 , K_2 производили с помощью данных о приведенных термодинамических потенциалах (Φ) компонентов газовой фазы [457]:

$$K = \exp(\Delta\Phi(T)/R - \Delta H^0/RT), \quad (3.12)$$

где $\Delta\Phi(T)$ - изменение приведенного термодинамического потенциала системы при протекании химической реакции при температуре T ; ΔH^0 - изменение энтальпии системы при протекании реакции при $T = 0\text{K}$, R – универсальная газовая постоянная.

Приведенный термодинамический потенциал рассчитывался с помощью статистически определённых коэффициентов φ_i по формуле:

$$\Phi(T) = \varphi_1 + \varphi_2 \ln x + \varphi_3 x^{-2} + \varphi_4 x^{-1} + \varphi_5 x + \varphi_6 x^2 + \varphi_7 x^3 \quad (3.13)$$

где $x = T/10000$ - температурный фактор.

Исходные данные для расчёта констант равновесия реакций (3.6) и (3.7) приведены в табл.3.2.

Таблица 3.2. Исходные термодинамические данные для расчёта значений констант равновесия реакций образования водяного пара и окисления СО [457]

| Вещество | Коэффициенты приведенного термодинамического потенциала | | | | | | | Изменение энтальпии при $T=0\text{K}$, Дж/моль | Температурный интервал, К | |
|------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---|---------------------------|------|
| | φ_1 | φ_2 | φ_3 | φ_4 | φ_5 | φ_6 | φ_7 | | Tmin | Tmax |
| H ₂ | 188,5198 | 22,6034 | 0,0041769 | -0,376 | 40,489 | -23,282 | 8,333 | 0 | 500 | 6000 |
| O | 214,7962 | 21,2418 | 0,0002034 | -0,0587 | -2,501 | 2,558 | -0,531 | 246783 | 500 | 6000 |
| H ₂ O | 247,8955 | 25,3032 | 0,0008283 | -0,2212 | 98,381 | -64,039 | 23,304 | -238913 | 500 | 6000 |
| CO | 267,8206 | 29,5948 | -0,003315 | 0,21826 | 27,40 | -20,97 | 8,295 | -113812 | 500 | 6000 |
| CO ₂ | 323,4839 | 49,1852 | -0,01191 | 1,28551 | 49,04 | -40,304 | 17,797 | -393142 | 500 | 6000 |

Используемые для дальнейших расчётов значения константы равновесия реакции образования водяного пара (3.6) представлены в табл. 3.3.

Таблица 3.3. Значение константы равновесия реакции образования водяного пара (3.6)

| Температура, К | Значение константы K_I | Температура, К | Значение константы K_I |
|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|
| 1823 | 101 482 329,00 | 1894 | 29 033 537,01 |
| 1824 | 99 642 388,40 | 1918 | 19 418 589,75 |
| 1847 | 65 771 240,84 | 1923 | 17 880 117,24 |
| 1858 | 54 115 394,51 | 1924 | 17 588 268,73 |
| 1870 | 43 856 337,08 | 1973 | 8 013 444,25 |
| 1873 | 41 628 583,82 | | |

Экспериментальные данные работ по изучению равновесия в системе Fe-H₂-H₂O [203, 204, 209, 211] использовали для корреляционного анализа концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода в газовой фазе. При пересчёте концентрации кислорода в мольные доли не учитывалось содержание примесных элементов в металле. В качестве гипотезы использовали уравнение линии, проходящей через точку начала координат, $y=b \cdot x$, как отвечающее виду закона Генри. Результаты корреляционного анализа представлены на рис. 3.13 – 3.16 и в табл. 3.4.

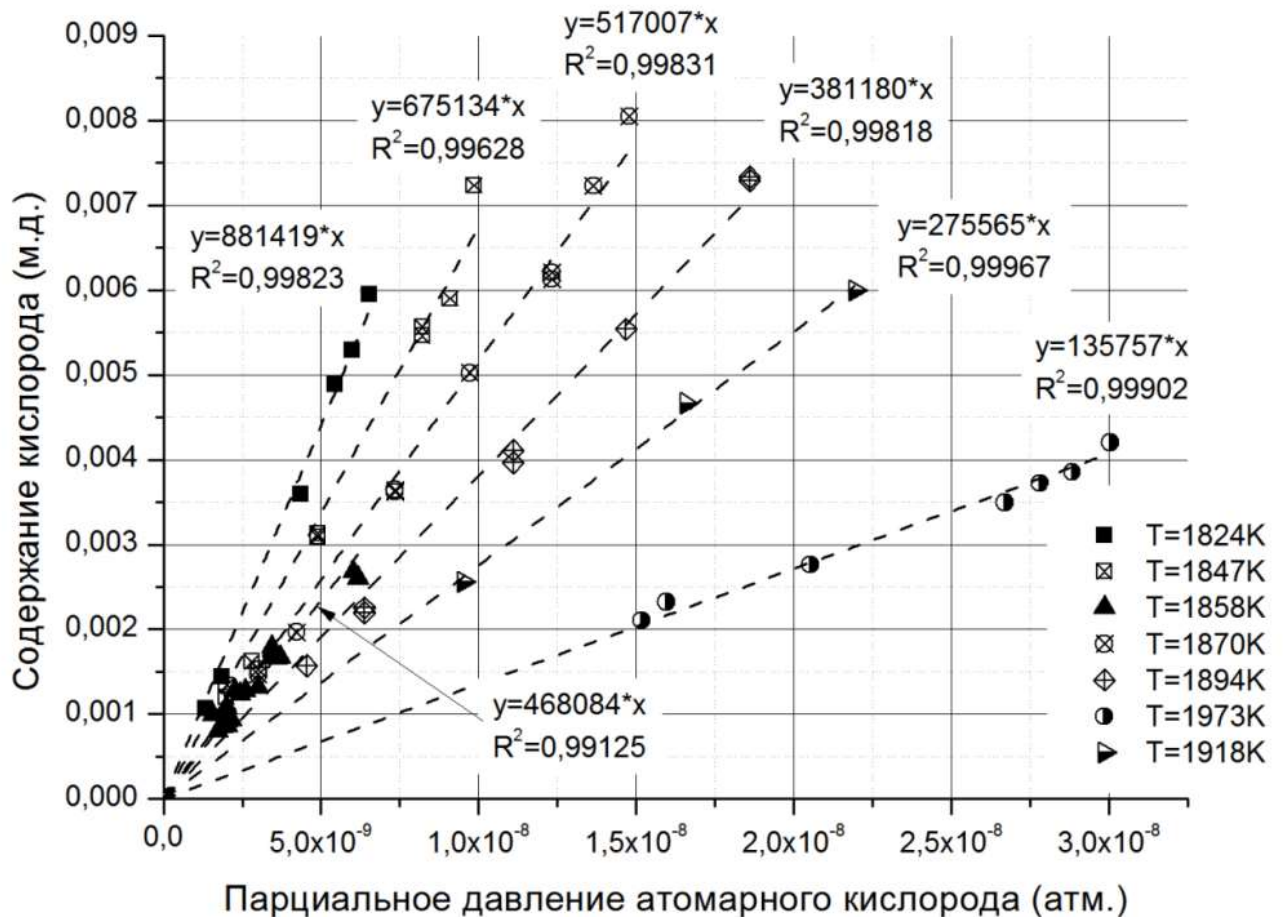


Рисунок 3.13. Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [203]

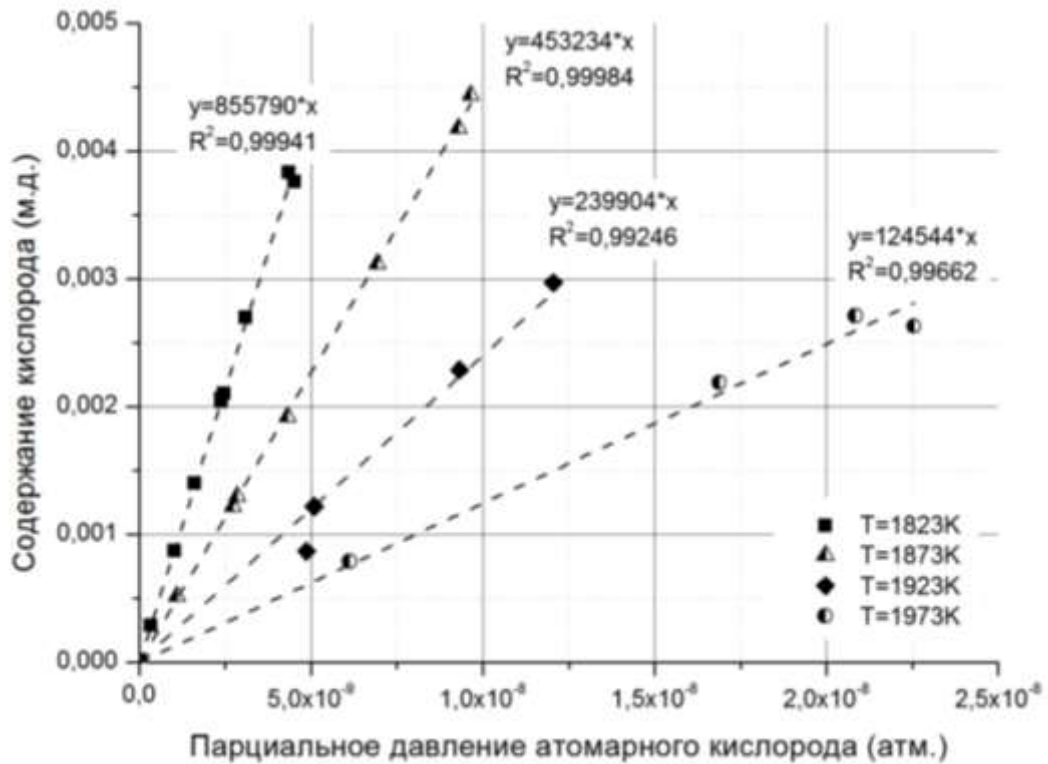


Рисунок 3.14. Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [204]

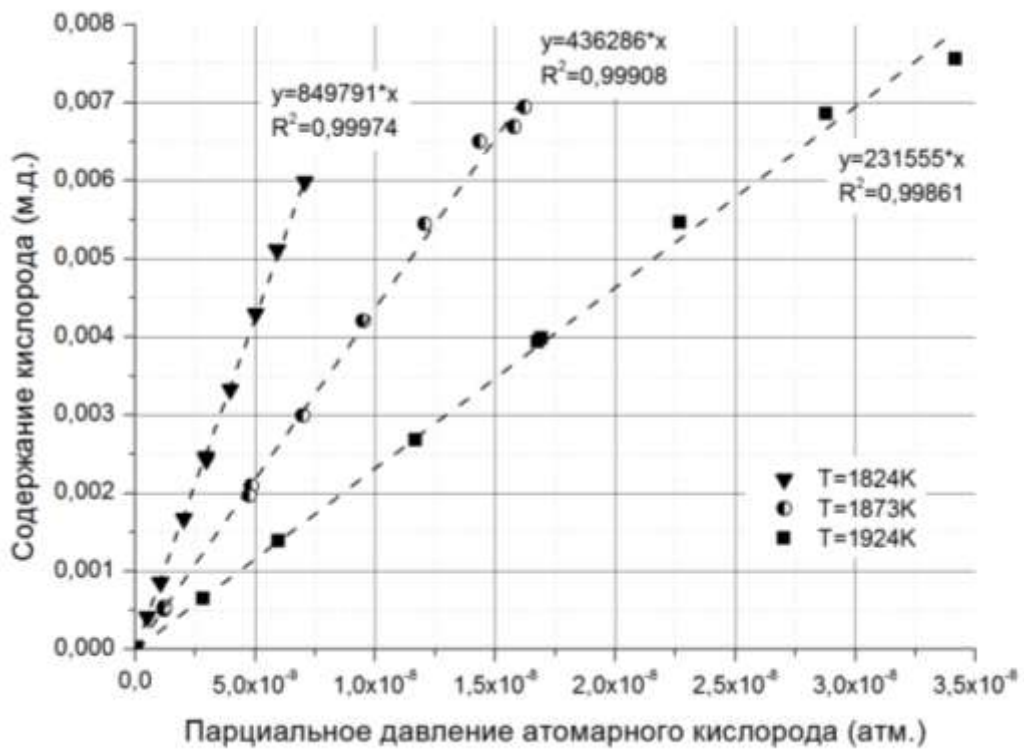


Рисунок 3.15. Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [209]

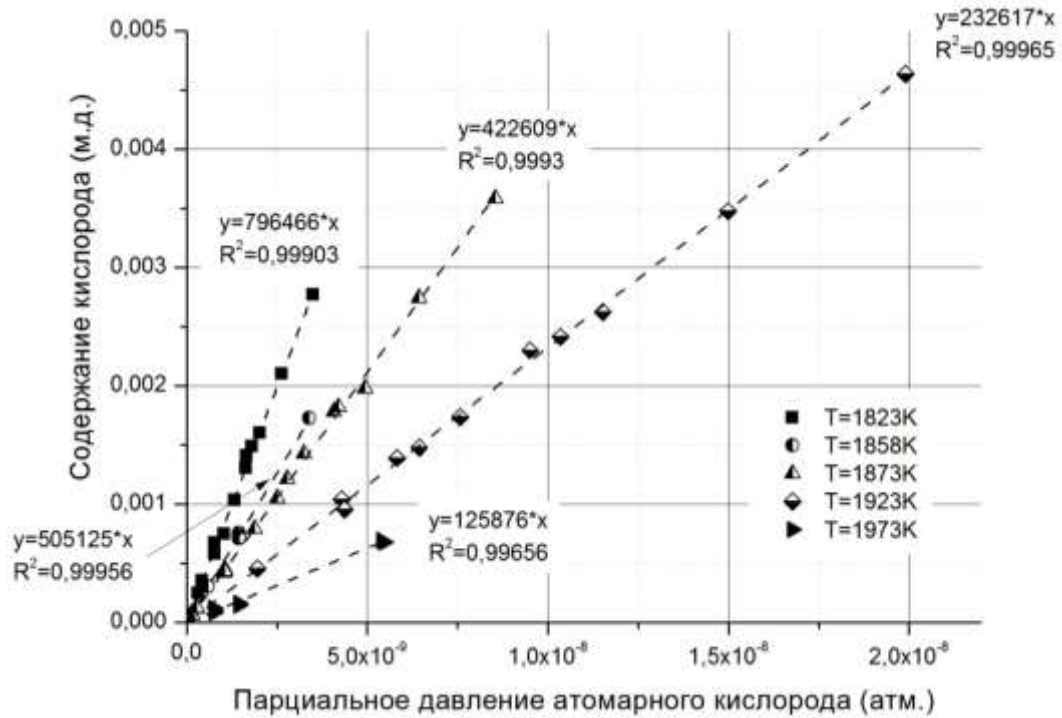


Рисунок 3.16. Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [211]

Таблица 3.4. Результаты линейной аппроксимации экспериментальных данных растворимости кислорода в жидком железе при равновесии с газовой смесью

$\text{H}_2\text{-H}_2\text{O}$.

| Источник данных, авторы | Температура, К | Значение коэффициента b | Максимальное отклонение коэффициента b | Коэффициент корреляции r |
|---|----------------|---------------------------|--|----------------------------|
| [203], Аверин В.В., Поляков А.Ю., Самарин А.М. | 1 824 | 881 418,64098 | 14 035,42644 | 0,99911 |
| | 1 847 | 675 134,37294 | 13 042,70900 | 0,99814 |
| | 1 858 | 468 084,24356 | 9 592,22664 | 0,99562 |
| | 1 870 | 517 006,84839 | 6 410,84348 | 0,99915 |
| | 1 894 | 381 180,14978 | 5 420,56586 | 0,99909 |
| | 1 918 | 275 565,36663 | 2 504,73225 | 0,99983 |
| | 1 973 | 135 757,19230 | 1 502,19176 | 0,99951 |
| [204], Gokcen A. | 1 823 | 855 790,11187 | 6 565,79342 | 0,99970 |
| | 1 873 | 453 233,99275 | 2 044,98717 | 0,99992 |
| | 1 923 | 239 903,62770 | 9 346,19265 | 0,99622 |
| | 1 973 | 124 543,88604 | 3 244,07149 | 0,99831 |
| [209], Sakao H., Sano K. | 1824 | 849 790,87143 | 4 327,33715 | 0,99987 |
| | 1873 | 436 286,17626 | 4 001,61785 | 0,99954 |
| | 1924 | 231 555,32440 | 2 877,50864 | 0,99930 |

| Источник данных, авторы | Температура, К | Значение коэффициента b | Максимальное отклонение коэффициента b | Коэффициент корреляции r |
|---|----------------|---------------------------|--|----------------------------|
| [211], Omori Y., Suzuki K., Aratani F., Sanbongi K. | 1823 | 796 465,77315 | 6 399,51991 | 0,99951 |
| | 1858 | 505 124,74633 | 3 200,80822 | 0,99978 |
| | 1873 | 422 609,43495 | 2 440,68204 | 0,99965 |
| | 1923 | 232 616,66816 | 1 251,38428 | 0,99982 |
| | 1973 | 125 875,51259 | 2 463,41979 | 0,99828 |

По численным величинам коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе, (см. табл. 3.4) проанализировали возможность получения температурной зависимости: $k_H^{(O)} = f(T)$. При этом анализе использовали логарифм константы Генри кислорода, так как запись выражения закона Генри аналогична записи константе межфазного распределения кислорода:

$$\{O\} = [O]_{Fe}, \quad (3.14)$$

$$K_O = a_{[O]} / P_O \quad (3.15)$$

а константа равновесия, как известно, зависит от температуры по экспоненциальной зависимости (уравнение изотермы $\ln K = -\Delta G / RT$).

Результаты анализа температурной зависимости константы Генри для кислорода, растворённого в жидком железе, приведены на рис. 3.17.

Таким образом, температурная зависимость коэффициента Генри для кислорода в железе описывается уравнением:

$$\ln k_H^{(O)} = 44922,8/T - 10,98. \quad (3.16)$$

При анализе результатов исследований равновесия в системе Fe–CO–CO₂ необходимо отметить следующие особенности системы.

1. Растворимость углерода в железе выше, чем растворимость водорода при исследовании равновесия в системе Fe–H₂–H₂O, это, с одной стороны, оказывает влияние на растворимость кислорода в железе, с другой стороны вызывает кипение металла при его затвердевании и снижения точности анализа за счёт удалившихся при кипении части кислорода и углерода, а с третьей стороны вызывает выделения чистого графита в твёрдом металле, отобранном на анализ. Последнее в свою

очередь приводит к увеличению погрешности при измерении содержания кислорода в пробе металле.

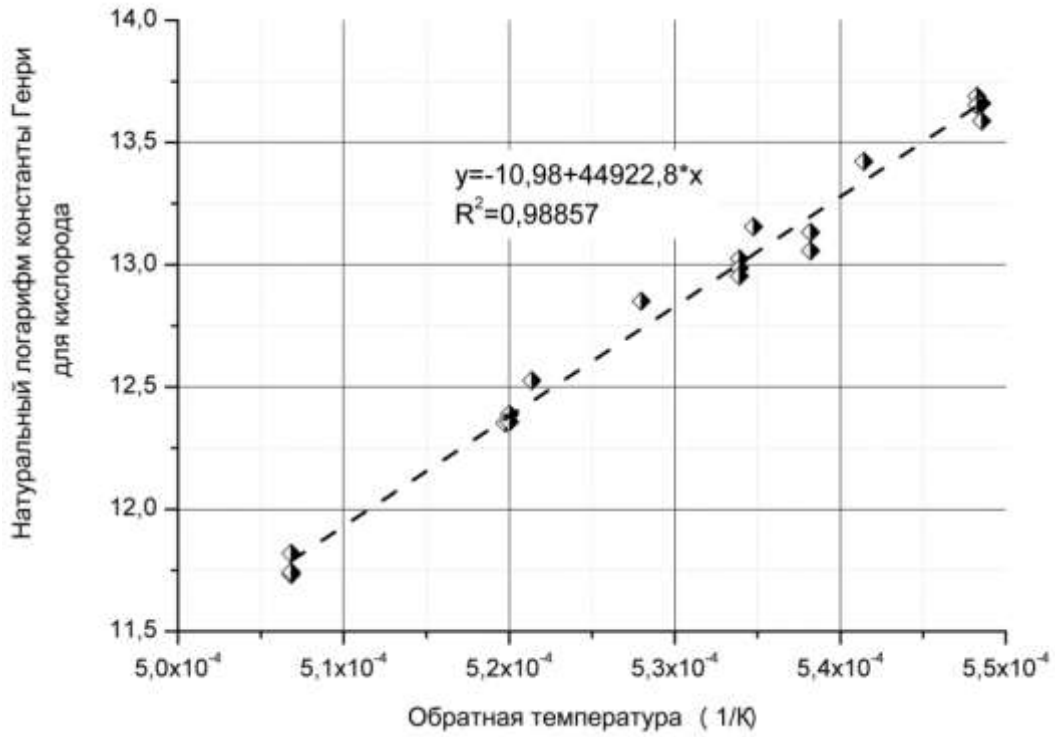


Рисунок 3.17. Температурная зависимость константы Генри для кислорода, растворённого в железе, вида $\ln k_H^{(o)} = A + B/T$

2. Непосредственное измерение содержания кислорода в металле затруднено низким его уровнем. Величины концентраций кислорода в железе близки по уровню с погрешностью метода определения.

3. Только в двух работах [81, 89] металл одной пробы анализировался на содержание и кислорода и углерода. Однако в работе [89] не приводятся данные по равновесному составу газовой фазы, что делает невозможным использование экспериментальных данных этой работы в анализе поведения кислорода по выбранной нами схеме. В работах [204, 213] металл анализировался только на содержание кислорода.

4. Самые большие отклонения по содержанию кислорода имеет металл с наиболее высоким содержанием углерода.

Для расчёта равновесного парциального давления кислорода в системе Fe–CO–CO₂ использовали значения константы равновесия реакции (3.7), приведенные в табл. 3.5. При пересчёте концентрации кислорода в мольные доли учитывали содержание углерода в железе и не учитывали содержание других элементов в металле.

Таблица 3.5. Значения константы равновесия реакции (3.7)

| Температура, К | Значение константы K_2 | Температура, К | Значение константы K_2 |
|----------------|--------------------------|----------------|--------------------------|
| 1813 | 101 482 329,00 | 1923 | 4 142 712,35 |
| 1823 | 25 835 090,84 | 1973 | 1 779 100,23 |
| 1873 | 10 094 404,98 | 2023 | 796 830,68 |
| 1888 | 7 689 162,68 | | |

В качестве гипотезы, как и в случае анализа экспериментальных данных по системе Fe–H₂–H₂O, использовали линейную гипотезу, как отвечающую виду закона Генри. Результаты корреляционного анализа представлены на рис. 3.18, 3.19 и в табл. 3.6.

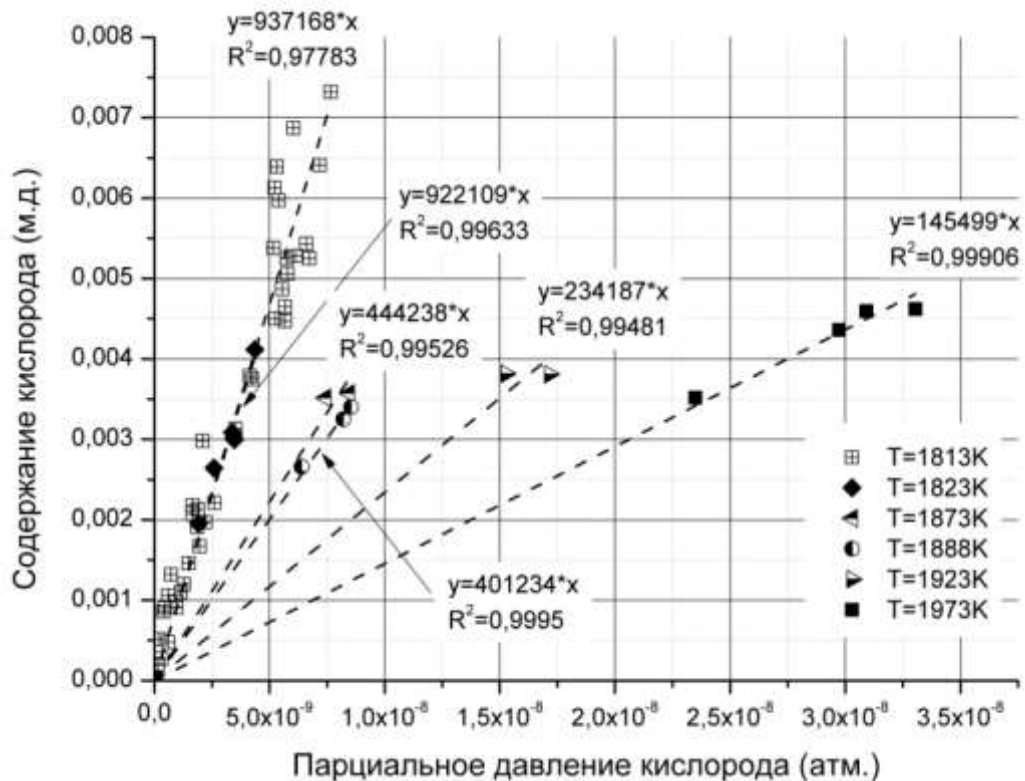
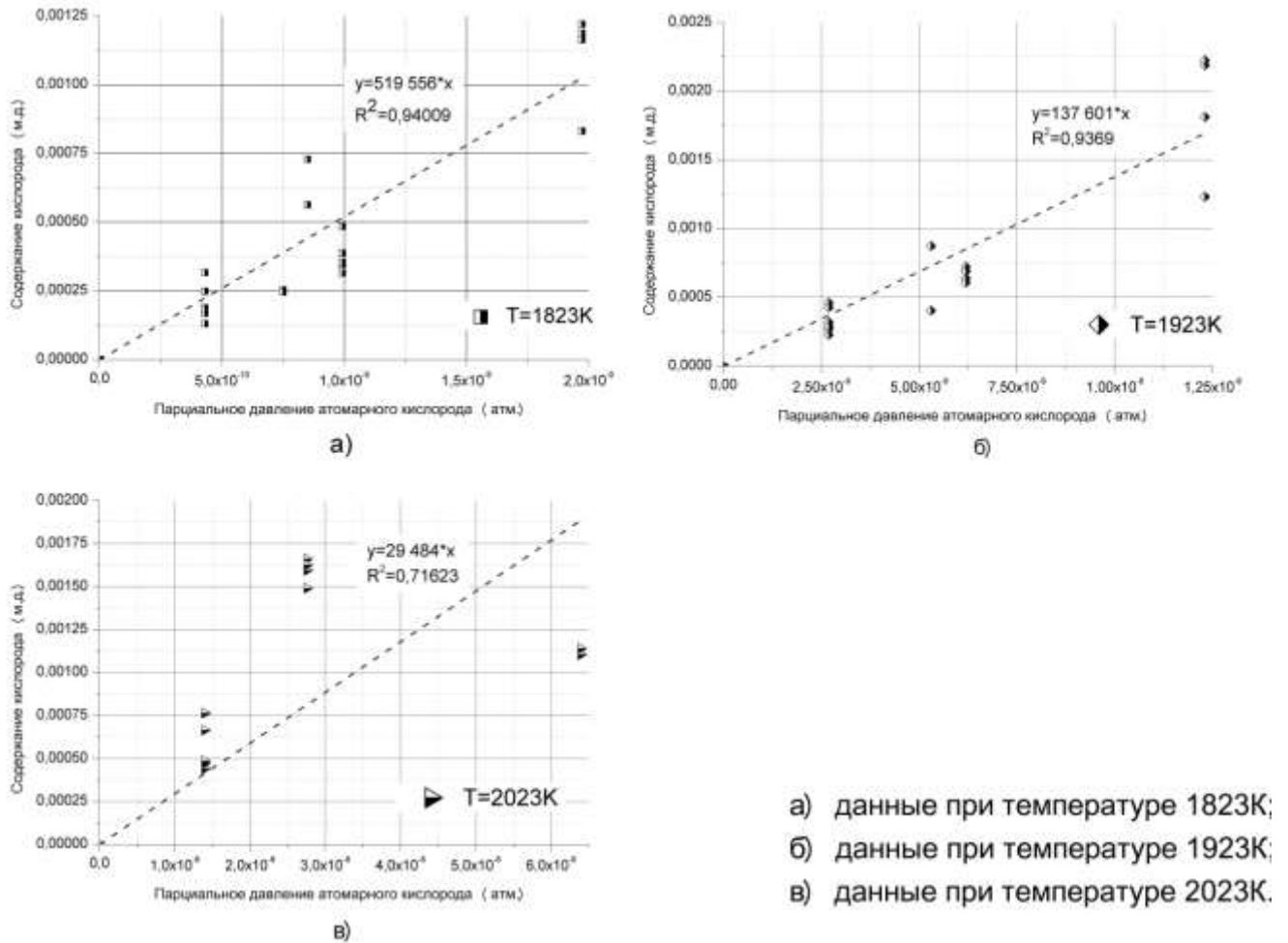


Рисунок 3.18. Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работ [81, 204]



а) данные при температуре 1823К;
 б) данные при температуре 1923К;
 в) данные при температуре 2023К.

Рисунок 3.19. Зависимость концентрации кислорода в железе от парциального давления атомарного кислорода по экспериментальным данным работы [213]

Таблица 3.6. Результаты линейной аппроксимации экспериментальных данных растворимости кислорода в жидком железе при равновесии с газовой смесью

CO–CO₂

| Источник данных, авторы | Температура, К | Значение коэффициента b | Стандартная ошибка определения значения коэффициента b | Коэффициент корреляции r |
|-------------------------------|----------------|---------------------------|--|----------------------------|
| [81], Marshall Sh, Chipman J. | 1813 | 937168 | 22030 | 0,98913 |
| [204], Gokcen A. | 1823 | 922109 | 21159 | 0,99842 |
| | 1873 | 444238 | 17688 | 0,99842 |
| | 1888 | 401234 | 4467 | 0,99981 |
| | 1923 | 234187 | 9762 | 0,99827 |
| | 1973 | 145499 | 1991 | 0,99963 |

| Источник данных, авторы | Температура, К | Значение коэффициента b | Стандартная ошибка определения значения коэффициента b | Коэффициент корреляции r |
|---|----------------|---------------------------|--|----------------------------|
| [213], El-Kaddah N.H., Robertson D.G.C. | 1823 | 519556 | 29282 | 0,96958 |
| | 1923 | 137601 | 7971 | 0,96794 |
| | 2023 | 29484 | 5071 | 0,84630 |

Следует отметить значительный разброс значений содержания кислорода в железе при анализе данных работы [213], что, на наш взгляд, могло быть вызвано с протеканием реакции окисления углерода при снижении температуры металла.

В работе Эль-Каддаха и Робертсона [213] эксперименты опыты проводили при повышенном давлении в системе, обуславливая тем самым повышенное содержание углерода в металле в некоторых экспериментах близкое к пределу растворимости углерода в железе. Численные значения коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе, определённые по данным равновесия в системе Fe–H₂–H₂O и в системе Fe–CO–CO₂ близки между собой за исключением значений, определённых по данным работы [213]. Это можно увидеть на графике зависимости $k_H^{(o)} = f(T)$ (рис.3.20). Поэтому окончательный вид температурной зависимости коэффициента Генри определяем по данным о равновесном состоянии обеих рассматриваемых систем (рис.3.21).

Результаты работы [213] мы предлагаем рассматривать отдельно ввиду резкого отличия получаемых результатов анализа. В таблице 3.7 приведены результаты аппроксимации численных значений коэффициентов Генри для кислорода, определённых по данным о равновесии в различных системах.

Судя по значениям ошибок определения коэффициентов в уравнении температурной зависимости (табл.3.7), учёт результатов работ [81, 203, 204, 209, 211] ведёт к уточнению гипотезы, определённой на этапе анализа данных по системе Fe–H₂–H₂O.

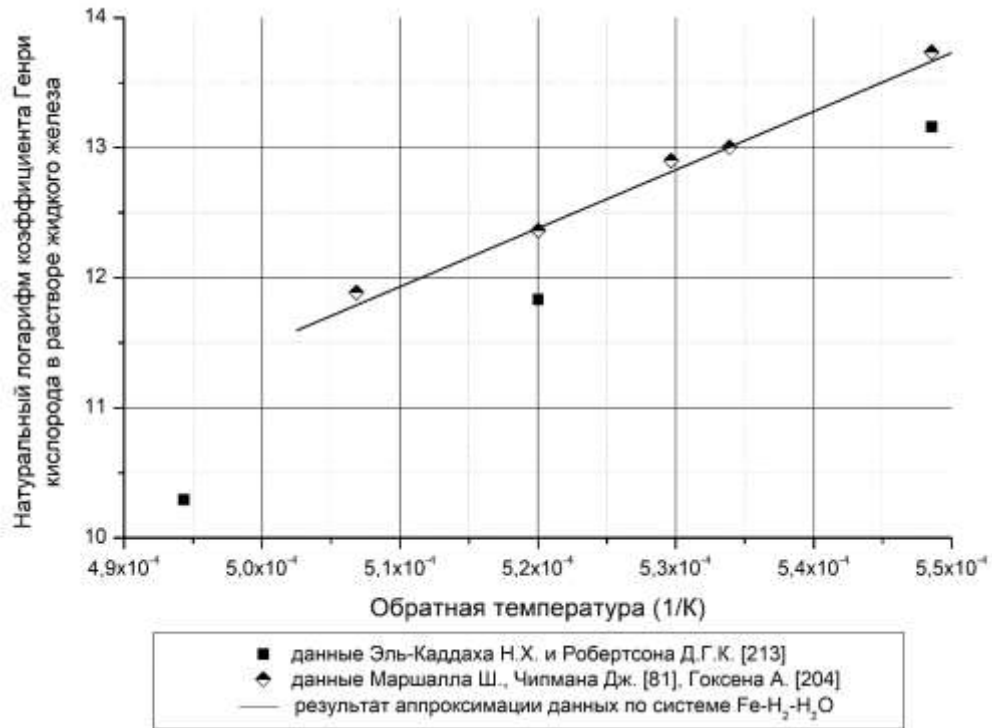


Рисунок 3.20. Сравнение результатов расчёта коэффициента Генри для кислорода по данным о равновесном состоянии систем Fe-H₂-H₂O [81, 204] и Fe-CO-CO₂ [213]

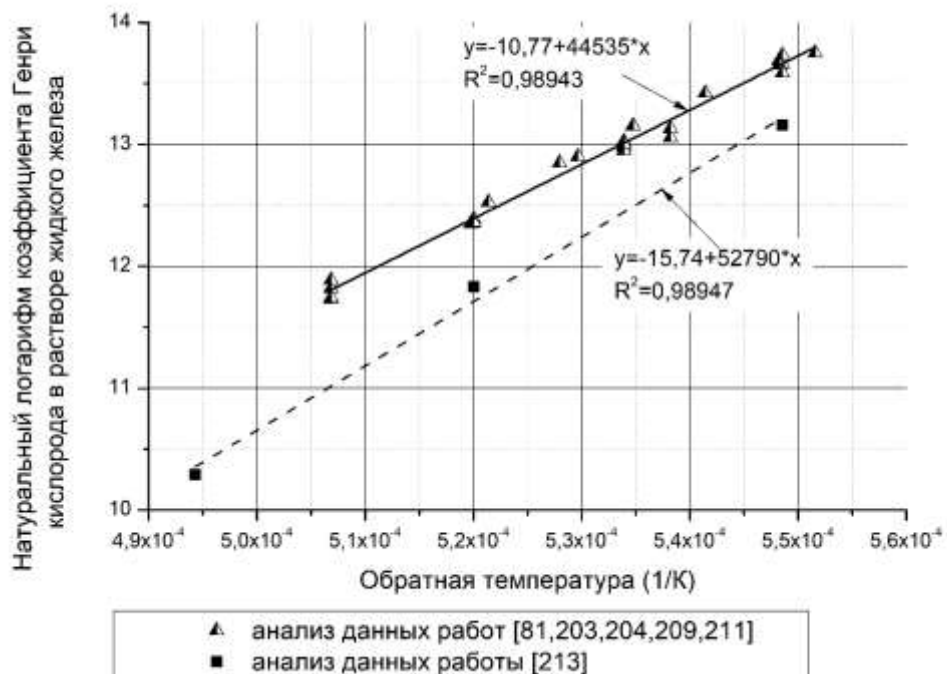


Рисунок 3.21. Результат расчёта температурной зависимости коэффициента Генри для кислорода по данным о равновесном состоянии систем Fe-H₂-H₂O [81, 203, 204, 209, 211] и Fe-CO-CO₂ [213]

Таблица 3.7. Результаты линейной аппроксимации при исследовании зависимости

$$\ln k_H^{(o)} = f(1/T)$$

| Равновесная система, источник данных | Уравнение температурной зависимости коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе | Вид функции для аппроксимации $\ln k_H^{(o)} = A + \frac{B}{T}$ | | | | |
|---|--|---|-----------------------|------------------------------------|--|----------------------------|
| | | Коэффициент | Значение коэффициента | Количество точек для аппроксимации | Стандартная ошибка определения значения коэффициента | Коэффициент корреляции r |
| Fe-H ₂ -H ₂ O, [203, 204, 209, 211] | $\ln k_H^{(o)} = -10,98 + \frac{44\,923}{T}$ | A | -10,98 | 19 | 0,60 | 0,994 |
| | | B | 44923 | | 1 138 | |
| Fe-H ₂ -H ₂ O, Fe-CO-CO ₂ , [81, 203, 204, 209, 211] | $\ln k_H^{(o)} = -10,77 + \frac{44\,535}{T}$ | A | -10,77 | 25 | 0,5 | 0,992 |
| | | B | 44535 | | 940 | |
| Fe-CO-CO ₂ , [213] | $\ln k_H^{(o)} = -15,74 + \frac{52\,790}{T}$ | A | -15,74 | 3 | 2,0 | 0,995 |
| | | B | 52790 | | 3841 | |

Таким образом, по результатам анализа экспериментальных данных по изучению поведения кислорода при равновесных состояниях в системах Fe-H₂-H₂O и Fe-CO-CO₂, можно сделать следующие выводы:

- поведение кислорода, растворённого в жидком железе, подчиняется законам разбавленных растворов и, в частности, закону Генри;
- температурная зависимость коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе, описывается следующим выражением:

$$\ln k_H^{(o)} = -10,77 + 44535/T \quad (3.17)$$

- повышенное содержание углерода в растворе железа, достигнутое за счёт увеличения давления в системе Fe-CO-CO₂, приводит к отклонению от зависимости (3.17), снижая численное значение коэффициента Генри. .

Расхождение в значениях коэффициентов уравнений аппроксимации предположительно можно объяснить следующим:

- на результаты измерений содержания кислорода в железе при равновесии в системе Fe-CO-CO₂ сильное влияние оказывает содержание растворённого углерода, в то время как для металла системы Fe-H₂-H₂O растворимость могущего оказывать аналогичное влияние водорода чрезвычайно низка;
- существенное содержание углерода в железе при экспериментах в системе Fe-CO-CO₂ оказывает влияние на растворимость кислорода в железе.

На основе рассчитанной температурной зависимости коэффициента Генри кислорода в железе (3.17) определено уравнение изменения свободной энергии Гиббса реакции растворения атомарного кислорода в жидком железе (3.14):

$$\Delta G_{(3.14)} = -373488 + 91,29 \cdot T \text{ (Дж/моль)} \quad (3.18)$$

Если учесть изменение изобарно-изотермического потенциала реакции диссоциации молекулярного двухатомного кислорода с образованием атомарного кислорода, можно получить выражение изменения энергии Гиббса реакции растворения двухатомного кислорода в жидком железе. Изменение свободной энергии Гиббса для реакции



рассчитали с помощью данных [457]. Для температурного интервала T=1500÷2300К его можно описать уравнением:

$$\Delta G_{(3.19)} = 255016 - 66,69 \cdot T \text{ (Дж/моль)} \quad (3.20)$$

Складывая реакции (3.14) и (3.19), получили:



и при соответствующем сложении выражений (3.18) и (3.20) получили выражение изменения свободной энергии Гиббса реакции растворения молекулярного двухатомного кислорода в жидком железе (1.7):

$$\Delta G_{(1.7)} = -118473 + 24,6 \cdot T \text{ (Дж/моль)} \quad (3.22)$$

Отмечая совпадение полученного выражение с аналогичными, имеющимися в литературе, (табл.1.6), можно подтвердить правильность расчёта коэффициента Генри для кислорода. Результаты уточнения численных значений коэффициентов функции $\Delta G_{(1.7)} = f(T)$ опубликованы в работе [449].

3.2. Термодинамическое описание системы Fe-C-O с учётом парциального давления моноатомного углерода и моноатомного кислорода растворов углерода в железе

Для анализа поведения углерода в расплаве железа использовали опубликованные экспериментальные данные в работах [81, 213, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236]. Для вычисления значений парциального давления углерода в качестве исходных использовали следующие экспериментальные данные: температура, парциальное давление оксидов углерода, содержание углерода и кислорода в расплаве металла (например, данные работы [81], дублированные в работе [200]). В работах [225, 235] содержание кислорода в металле не определялось, поэтому и при пересчёте концентрации углерода из массовых процентов в мольные доли считали, что единственным компонентом, растворённым в металле, является только углерод. При анализе данных всех работ при пересчёте концентрации углерода содержание других примесных элементов, кроме замеренного содержания кислорода, присутствующих в исходном железе, пренебрегали.

Равновесное парциальное давление углерода определяли из выражения константы равновесия следующей реакции:



$$P_C = P_{\{CO\}}^2 / (P_{\{CO_2\}} \cdot K_{(3.23)}) \quad (3.24)$$

Значения константы равновесия $K_{(3.23)}$ определяли с помощью данных о приведенных термодинамических потенциалах (Φ) компонентов газовой фазы [457] по методике, изложенной выше. Исходные данные приведены в табл. 3.8.

Таблица 3.8. Исходные термодинамические данные для расчёта константы равновесия реакций окисления угарного газа и восстановления углекислого газа [340]

| Вещество | Коэффициенты приведенного термодинамического потенциала | | | | | | | Изменение энтальпии при T=0K | Температурный интервал | |
|------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------------------------|------------------------|------|
| | φ_1 | φ_2 | φ_3 | φ_4 | φ_5 | φ_6 | φ_7 | | Tmin | Tmax |
| CO | 267,8206 | 29,5948 | -0,003315 | 0,21826 | 27,40 | -20,97 | 8,295 | -113812 | 500 | 6000 |
| O | 214,7962 | 21,2418 | 0,0002034 | -0,0587 | -2,501 | 2,558 | -0,531 | 246783 | 500 | 6000 |
| CO ₂ | 323,4839 | 49,1852 | -0,01191 | 1,28551 | 49,04 | -40,304 | 17,797 | -393142 | 500 | 6000 |
| C _{gas} | 212,1425 | 21,5468 | -0,000373 | 0,00566 | -6,086 | 9,734 | -4,76 | 711185 | 500 | 6000 |

Используемые для дальнейших расчётов значения константы равновесия реакции (3.23) представлены в табл.3.9.

Таблица 3.9. Значения константы равновесия реакции (3.23)

| Температура, К | Значение константы $K_{(3.23)}$ | Температура, К | Значение константы $K_{(3.23)}$ |
|----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|
| 1813 | 101 482 329,00 | 1923 | 4 142 712,35 |
| 1823 | 25 835 090,84 | 1973 | 1 779 100,23 |
| 1873 | 10 094 404,98 | 2023 | 796 830,68 |
| 1888 | 7 689 162,68 | | |

При отсутствии данных по парциальному давлению оксидов углерода использовали приведенные данные об отношении парциальных давлений оксидов углерода из работ [225, 235].

Анализ имеющихся литературных данных по равновесию систем Fe-C-CO-CO₂ начали с работы [213], как наиболее полно представляющей диапазон концентраций углерода в жидком железе и считающейся наиболее достоверной работой в этой области:

- 1) в ходе экспериментов отсутствовал контакт металла с материалом тигля – опыты проводились при левитации капли жидкого металла;
- 2) за счёт изменения давления газовой фазы (от 3 до 71 атм.) авторам удалось получить широкий диапазон концентраций углерода в железе вплоть до состояния близкого к насыщению.

В ходе поиска вида аналитической зависимости, описывающей результаты экспериментов в виде функции $x_{[C]} = f(P_C)$, было определено, что наибольшими коэффициентами корреляции и наименьшими значениями отклонений коэффициентов аналитической функции обладает гипотеза вида $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$. На рис.3.22–3.24 представлен данные работы [213] в виде зависимости $x_{[C]} = f(P_C)$ и их аппроксимация экспоненциальной функцией (вид уравнения приведен выше) и линейной функцией (для сравнения).

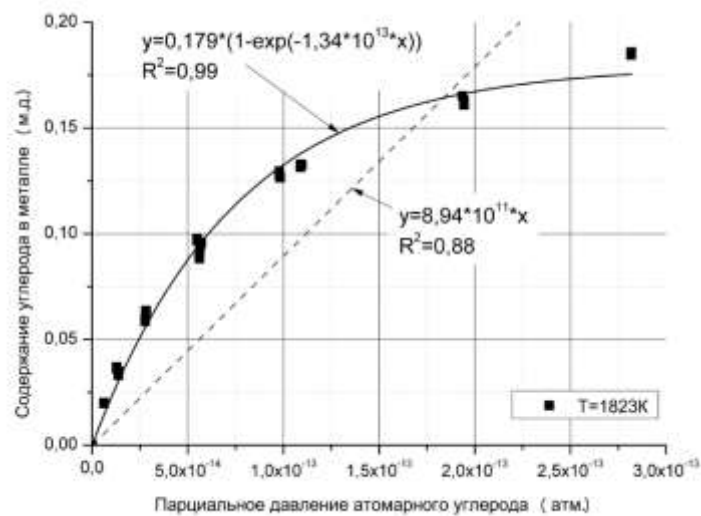


Рисунок 3.22. Зависимость концентрации углерода в железе от парциального давления атомарного углерода по данным работы [213] при $T=1823\text{K}$

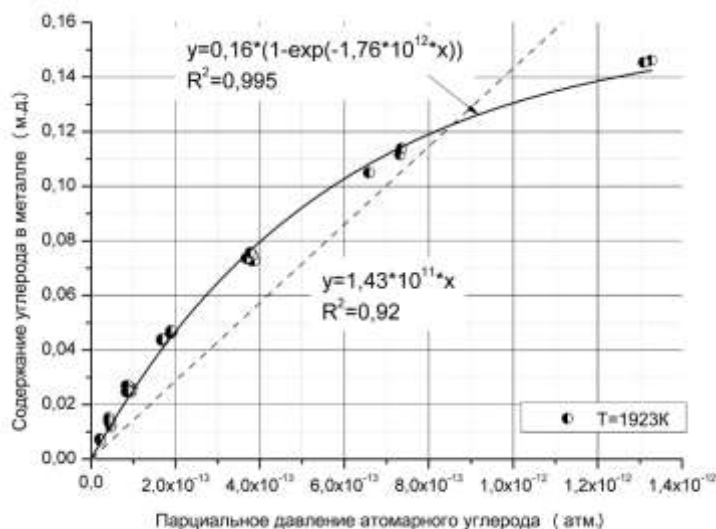


Рисунок 3.23. Зависимость концентрации углерода в железе от парциального давления атомарного углерода по данным работы [213] при $T=1923\text{K}$

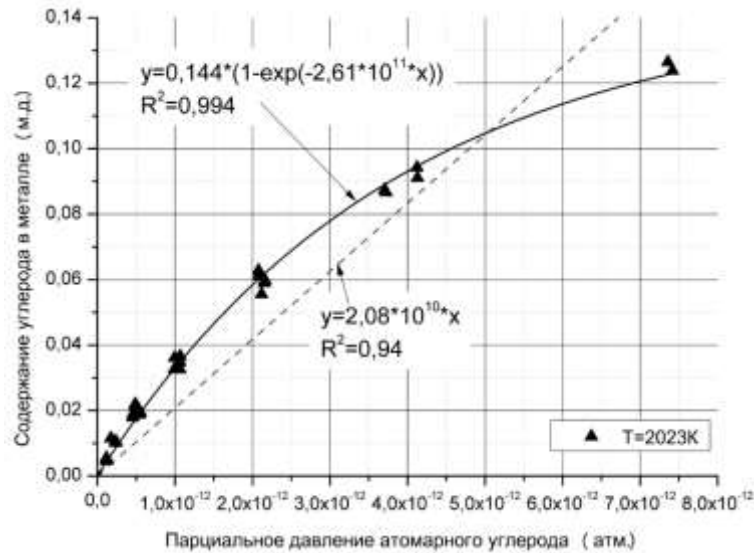


Рисунок 3.24. Зависимость концентрации углерода в железе от парциального давления атомарного углерода по данным работы [213] при $T=2023\text{K}$

Аналогичную процедуру анализа провели и для данных в работах [81, 234, 235, 236]. Результаты приведены на рис.3.25–3.28.

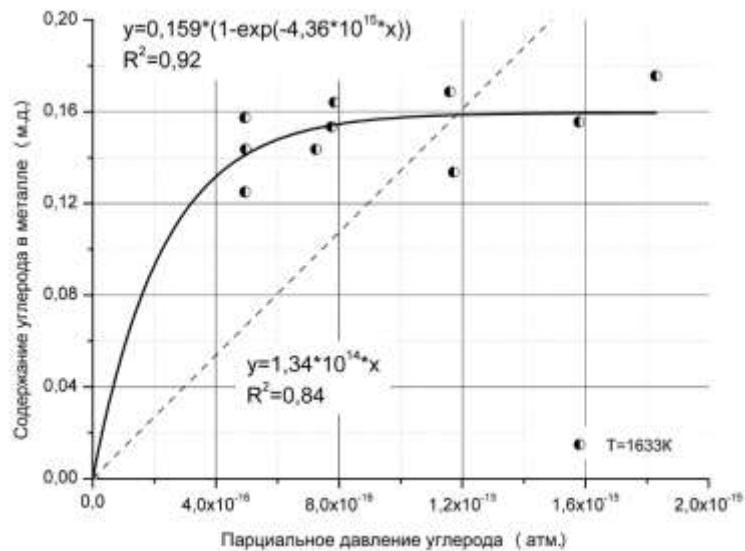


Рисунок 3.25. Зависимость концентрации углерода в железе от парциального давления атомарного углерода по данным работы [235] при $T=1633\text{K}$

При рассмотрении данных Риста и Чипмана результаты экспериментов при температуре 1533K решили не использовать ввиду малой численности экспериментов (три замера). Учёт этих данных приводит в дальнейшем к

возрастанию отклонений в определении коэффициентов температурной зависимости коэффициента Генри для углерода.

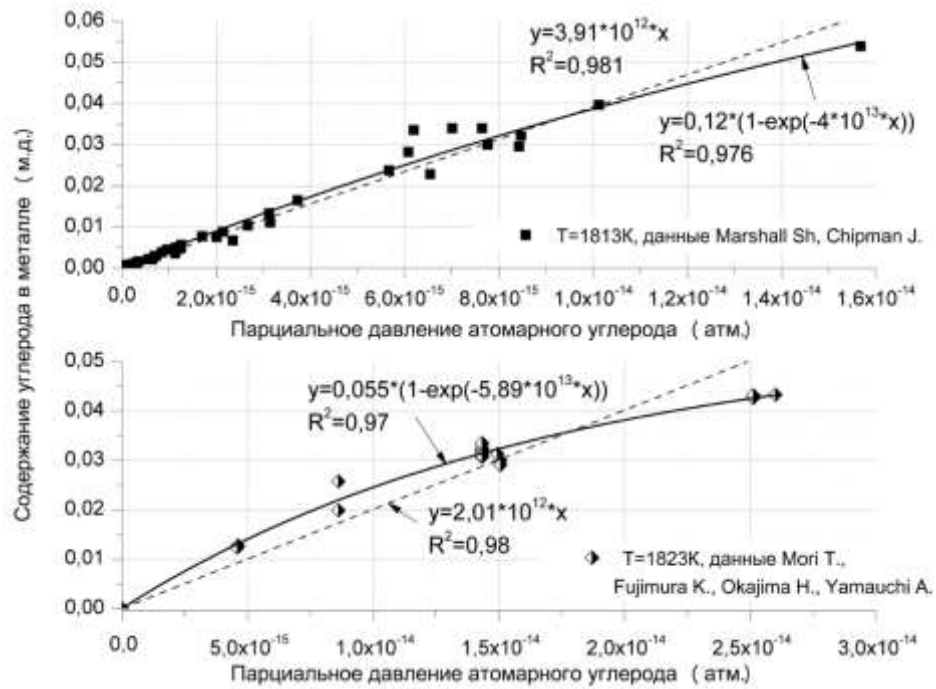


Рисунок 3.26. Зависимость концентрации углерода в железе от парциального давления атомарного углерода по экспериментальным данным работ [81, 236]

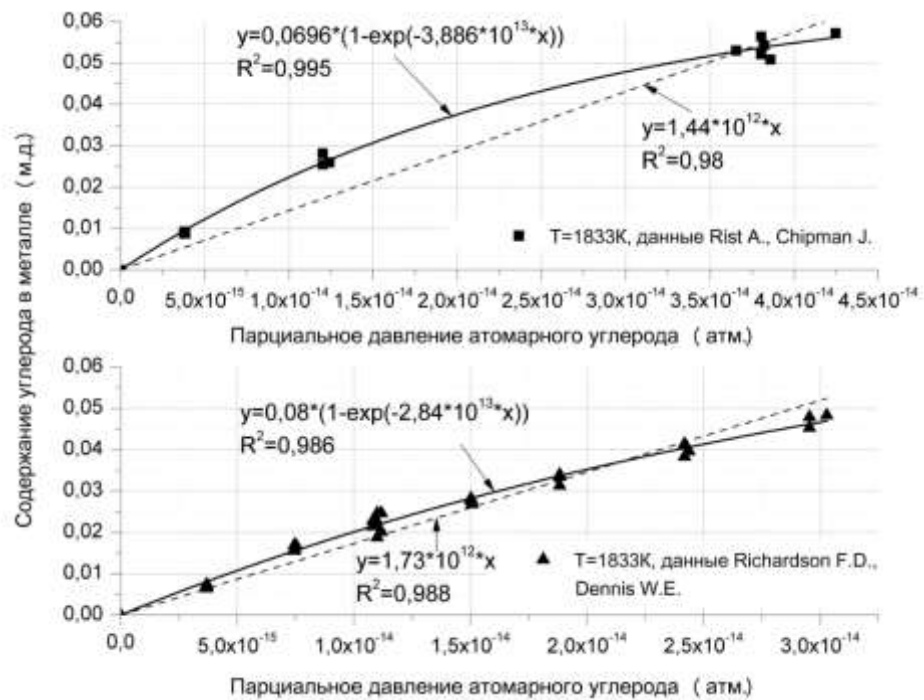


Рисунок 3.27. Зависимость концентрации углерода в железе от парциального давления атомарного углерода по данным работ [234, 235] при $T=1833\text{K}$

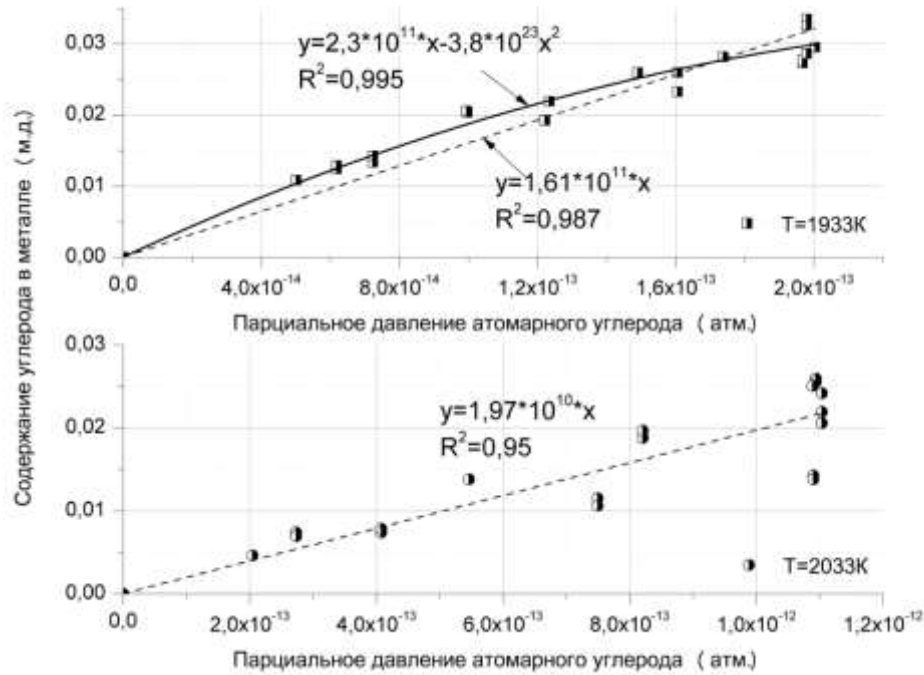


Рисунок 3.28. Зависимость концентрации углерода в железе от парциального давления атомарного углерода по экспериментальным данным работы [234]

Анализ данных Маршалла и Чипмана показал, что зависимость концентрации углерода от парциального давления атомарного углерода хорошо описывается линейной гипотезой (рис.3.26). Сравнение коэффициентов корреляции и величин ошибок определения коэффициентов зависимостей линейной и экспоненциальной гипотез показали достаточность использования для описания исследуемой зависимости линейной функции.

При анализе данных работы [236] остановили выбор на экспоненциальной гипотезе в связи с меньшими значениями отклонений коэффициентов в уравнении аппроксимации, несмотря на незначительное снижение коэффициента корреляции при переходе с линейной гипотезы на экспоненциальную (рис.3.26).

Анализ данных Ричардсона и Денниса [234] показал повышенный разброс значений, что не позволило для всех температур остановиться на гипотезе одного вида (рис.3.27, 3.28).

Результаты статистической обработки экспериментальных данных по равновесию системы Fe-C-CO-CO₂ представлены в табл.3.10.

Таблица 3.10. Результаты аппроксимации при исследовании зависимости $x_{[c]} = f(P_c)$

| Источник данных, авторы | Температура, К | Число точек | Линейная гипотеза $y = b \cdot x$ | | Экспоненциальная гипотеза $y = a \cdot (1 - \exp(-b \cdot x))$ | | | Коэффициент корреляции r | | |
|------------------------------------|----------------|-------------|-----------------------------------|--|--|--|--|---|---------------------------|--------|
| | | | Значение коэффициента b | Стандартная ошибка определения значения коэффициента b | Коэффициент корреляции r | Значение коэффициента a | Стандартная ошибка определения значения коэффициента a | | Значение коэффициента b | |
| [213], Эль-Каддах Н., Робертсон Д. | 1823 | 29 | 8,93895*10 ¹¹ | 6,14383*10 ¹⁰ | 0,9376 | 0,17948 | 0,00346 | 1,34082*10 ¹³ | 5,8237*10 ¹¹ | 0,9973 |
| | 1923 | 40 | 1,4322*10 ¹¹ | 6,5534*10 ⁹ | 0,9605 | 0,15767 | 0,00314 | 1,75709*10 ¹² | 6,06454*10 ¹⁰ | 0,9974 |
| | 2023 | 37 | 2,08456*10 ¹⁰ | 8,56333*10 ⁸ | 0,9701 | 0,14377 | 0,00383 | 2,60537*10 ¹¹ | 1,16067*10 ¹⁰ | 0,997 |
| [81], Маршалл Ш., Чипман Дж. | 1813 | 42 | 3,91196*10 ¹² | 8,49003*10 ¹⁰ | 0,9903 | 0,11913 | 0,02607 | 3,92657*10 ¹³ | 1,02408*10 ¹³ | 0,988 |
| | 1633 | 11 | 1,34252*10 ¹⁴ | 1,76683*10 ¹³ | 0,9152 | 0,15948 | 0,00683 | 4,36392*10 ¹⁵ | 1,17224*10 ¹⁵ | 0,9583 |
| | 1833 | 13 | 1,43728*10 ¹² | 1,43728*10 ¹² | 0,9908 | 0,06959 | 0,00319 | 3,88592*10 ¹³ | 3,64049*10 ¹² | 0,9973 |
| | 1823 | 22 | 2,0071*10 ¹² | 6,30206*10 ¹⁰ | 0,9893 | 0,05511 | 0,00384 | 5,89022*10 ¹³ | 6,86533*10 ¹² | 0,9854 |
| соавторы | | | | | | | | | | |
| | 1833 | 30 | 1,73022*10 ¹² | 3,52957*10 ¹⁰ | 0,9938 | 0,08121 | 0,00662 | 2,84439*10 ¹³ | 3,10448*10 ¹² | 0,9927 |
| | 1933 | 22 | 1,606*10 ¹¹ | 3,88108*10 ⁹ | 0,9936 | 1) $b_1 =$ 2,25572*10 ¹¹ | 1,23025*10 ¹⁰ | 1) $b_2 =$ -3,80327*10 ²³ | 7,04672*10 ²² | 0,9973 |
| | 2033 | 19 | 1,97351*10 ¹⁰ | 9,95684*10 ⁸ | 0,9766 | --- | --- | --- | --- | --- |

Примечание: 1) b_1, b_2 – коэффициенты в уравнении квадратичной функции $y = b_1 \cdot x + b_2 \cdot x^2$.

Таким образом, при используемой схеме анализа раствор углерода в жидком железе во всей области исследованных концентраций не подчиняется закону Генри. Экспериментальные данные [81, 234], описываемые линейной зависимостью (рис.3.26, 3.27), отличаются большим разбросом данных и получены в условиях взаимодействия металлического расплава с огнеупором.

Для определения коэффициента Генри для углерода, растворённого в железе, проанализировали состояние бесконечного разбавления углерода, при котором закон Генри выполняется. К выбранным аппроксимационным зависимостям определяли касательные в точке $x_{[C]} = 0$. Поскольку все касательные проходят через точку с координатами $(0; 0)$, то коэффициент угла наклона касательной является численным выражением константы Генри для бесконечно разбавленного раствора углерода в жидком железе

На рис.3.29 представлена зависимость коэффициента Генри углерода от температуры при бесконечно малом содержании углерода в жидком железе.

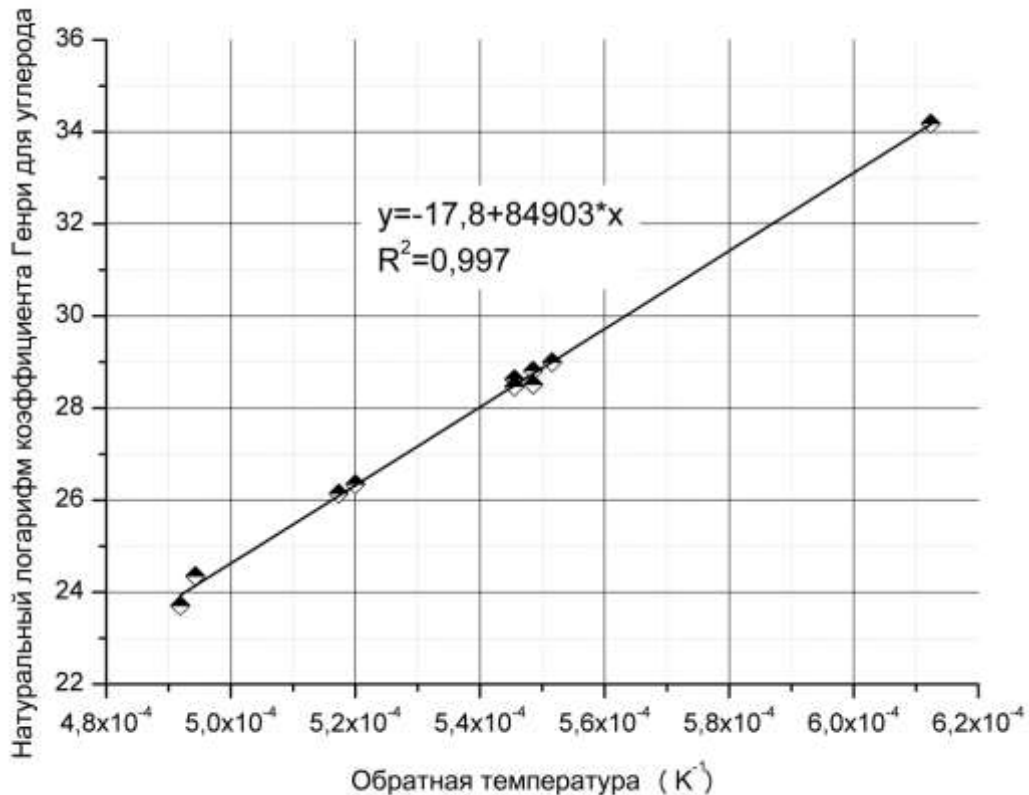


Рисунок 3.29. Температурная зависимость коэффициента Генри для раствора углерода в железе (бесконечно разбавленный раствор)

Таким образом, по результатам анализа экспериментальных данных по изучению поведения углерода при равновесном состоянии системы Fe-C-CO-CO₂, можно сделать следующие выводы:

- поведение углерода, растворённого в жидком железе подчиняется законам разбавленных растворов и, в частности, закону Генри только в области малых концентраций до 0,017 м.д. (или до ~0,37% масс.) (при таких концентрациях углерода аппроксимационные линии зависимости $x_{[C]} = f(P_C)$ имеют расхождения с касательными к ним в точке с координатами (0; 0) не более 20%);
- температурная зависимость коэффициента Генри для углерода в разбавленных растворах жидкого железа, описывается следующим выражением:

$$\ln k_H^{(C)} = -17,83 + 84903/T. \quad (3.25)$$

На основе рассчитанной температурной зависимости коэффициента Генри углерода в железе (3.25) определено уравнение изменения свободной энергии Гиббса реакции растворения атомарного углерода в жидком железе:

$$\{C\} = [C]_{x_C \rightarrow 0} \quad (3.26)$$

$$\Delta G_{(3.26)} = -705882 + 148,23 \cdot T \quad (3.27)$$

Таким образом, процесс растворения газообразного углерода в жидком железе при температурах, характерных для процессов чёрной металлургии, энергетически выгоден и протекает самопроизвольно.

Энергию испарения твёрдого углерода представили в виде изменения свободной энергии Гиббса реакции

$$C_{solid} = \{C\} \quad (3.28)$$

с использованием исходных данных в табл.3.11, по уравнению

$$\Delta G_{(3.28)} = 729033 - 209,108 \cdot T + 6,305 \cdot T \cdot \ln T - 1946100/T - 8,35 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 + 6,1 \cdot 10^{-8} \cdot T^3 + 4,76 \cdot 10^{-12} \cdot T^4. \quad (3.29)$$

Таблица 3.11. Исходные термодинамические данные для расчёта изменения свободной энергии Гиббса диссоциации молекулярного кислорода [457]

| Веще- ство | Коэффициенты приведенного термодинамического потенциала | | | | | | | Изменение энтальпии при T=0 К, Дж/моль | Температурный интервал, К | |
|--------------------|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--|---------------------------|------|
| | φ_1 | φ_2 | φ_3 | φ_4 | φ_5 | φ_6 | φ_7 | | Tmin | Tmax |
| C _{gas} | 212,1425 | 21,5468 | -0,000373 | 0,00566 | -6,086 | 9,734 | -4,76 | 711 185 | 500 | 6000 |
| C _{solid} | 61,1076 | 27,852 | -0,019834 | 1,79049 | -14,44 | 15,8333 | 0 | 0 | 500 | 6000 |

С помощью статистических расчётов уравнение (3.29) преобразовали к виду $\Delta G = A + B \cdot T$, где A и B числовые коэффициенты. В результате получено выражение:

$$\Delta G'_{(3.28)} = 717059 - 157,05 \cdot T \quad (3.30)$$

Суммируя реакции (3.26) и (3.28) и соответствующие им выражения изменений свободной энергии Гиббса (3.27) и (3.30) получили для реакции растворения твёрдого углерода в жидком железе (при образовании бесконечно разбавленного раствора):

$$C_{solid} = [C]_{x_c \rightarrow 0} \quad (3.31)$$

уравнение изменения свободной энергии Гиббса:

$$\Delta G_{(3.31)} = 11177 - 8,822 \cdot T. \quad (3.32)$$

Проведя преобразования по переходу к учёту концентрации углерода в растворе железа в массовых процентах уравнение реакции (3.31) записали в виде

$$C_{solid} = [C]_{[\% C] \rightarrow 0} \quad (3.33)$$

выражение для изменения свободной энергии Гиббса будет иметь вид:

$$\Delta G_{(3.33)} = 11177 - 34,322 \cdot T \quad (3.34)$$

Сравнивая полученные выражения (3.32) и (3.34) с аналогичными, приведенными в литературе (табл.1.7), можно отметить удовлетворительное совпадение с имеющимися данными.

Несмотря на получение уточнённого значения коэффициента Генри и уравнения изменения энергии Гиббса для раствора углерода в жидком железе, необходимо помнить, что указанные выражения действительны вблизи точки

бесконечного разбавления и не могут быть применимы для растворов с содержанием углерода выше 0,4% масс. из-за увеличивающихся расхождений с реальным поведением углерода.

Возможной причиной сильного отклонения поведения углерода в жидких растворах на основе железа является, то, что фактически мы имеем дело не растворами системы железо-углерод, а с растворами системы железо-углерод-кислород. Поскольку все опыты по изучению равновесного состояния растворов углерода в жидком железе проводились в газовой фазе, содержащей CO и CO₂, то в металле после выдержки неизбежно должно измениться содержание кислорода, как, впрочем, и в газовой фазе. Поэтому все экспериментальные данные, использованные выше для анализа поведения углерода, необходимо пересмотреть с учётом влияния кислорода.

При анализе растворов кислорода в растворе на основе железа было установлено, что выявления более чёткого влияния состава газовой фазы на концентрацию кислорода в металле целесообразнее в качестве аргумента при поиске возможной функциональной зависимости использовать парциальное давление кислорода. Поэтому при анализе растворов углерода и кислорода в жидком железе в качестве аргумента использовали парциальные давления углерода и кислорода в газовой фазе P_C и P_O .

В работах [418, 419, 420] было доказано, что на поведение примесных элементов в расплаве шлака влияет окисленность фазы, в результирующее уравнение, описывающее концентрацию примесного элемента, входит произведение парциальных давлений рассматриваемого компонента и кислорода в соответствующих степенях. Поэтому по аналогии мы приняли, что вид функции зависимости содержания углерода в растворе железа будет включать произведение парциальных давлений углерода и кислорода. Причём, парциальное давление в газовой фазе исследуемого компонента раствора должно быть в первой степени. В итоге круг поиска зависимости ограничен функцией вида:

$$x_{[C]} = k \cdot P_C \cdot (P_O)^a, \quad (3.35)$$

где k – коэффициент пропорциональности, a – показатель степени, характеризующий свойства раствора.

В работе [458] было показано, что для оксидных шлаков показатель степени a связан с валентностью компонента, растворимость которого изучается:

$$a = v_i/2. \quad (3.36)$$

В случае раствора углерода в жидком железе, если вид функции растворимости углерода в шлаке будет идентичен и для металла, то при валентности углерода $v_C = +4$, выражение (3.35) примет вид:

$$x_{[C]} = k \cdot P_C \cdot P_O^2 \quad (3.37)$$

Результат проверки соответствия предполагаемой зависимости (3.37) для рассчитанных величин парциальных давлений и соответствующих концентраций углерода в растворе железа в мольных долях по экспериментальным данным работы [213] при температуре 1823 К показан на рис.3.30.

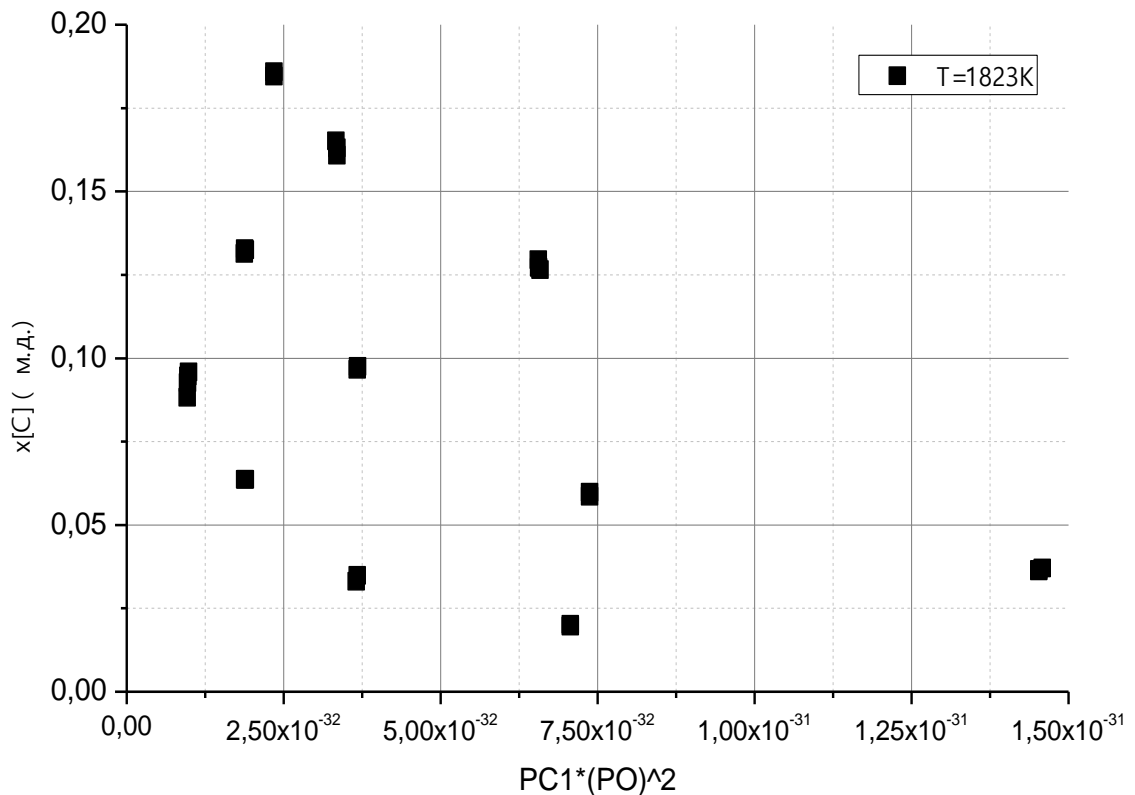


Рисунок 3.30. Исследование влияния параметра $(P_C \cdot P_O^2)$ на концентрацию углерода в жидком растворе на основе железа по данным [213] для $T=1823$ К

Как видно из рис.3.30 предполагаемая зависимость вида (3.37) не подтверждается. Рассматривая варианты целочисленных положительных значений валентности углерода (от +1 до +6), наилучшим коэффициентом корреляции обладает вариант $\nu_c = +1$ (рис.3.31).

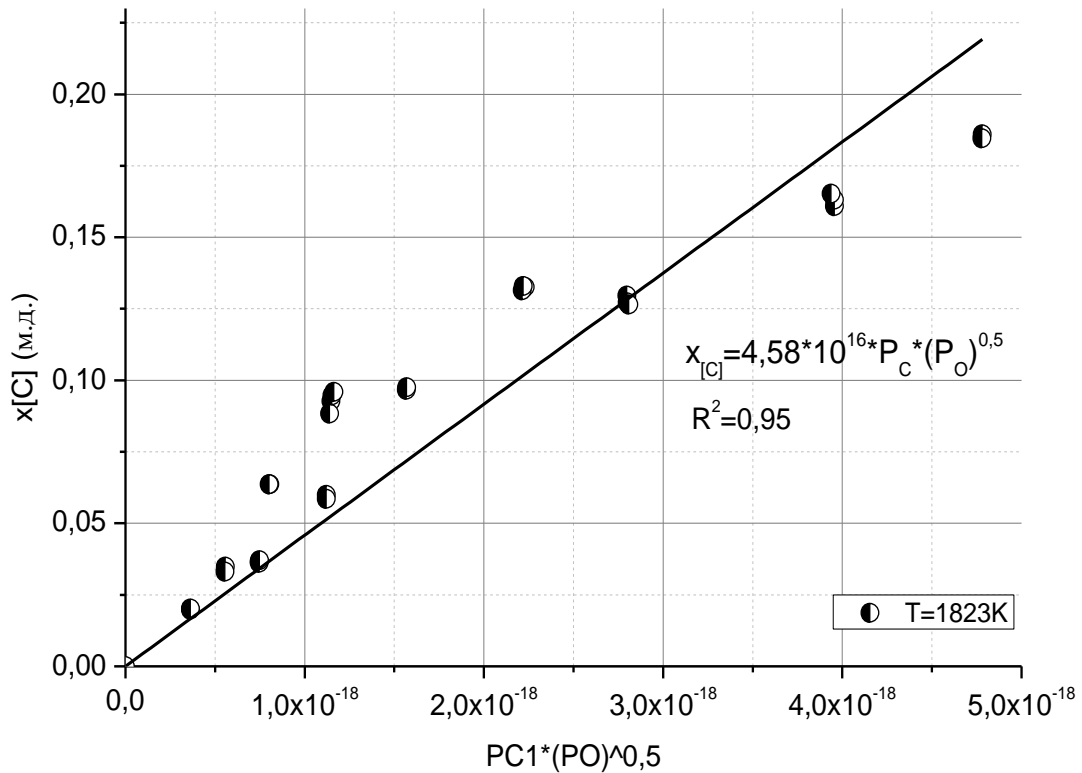


Рисунок 3.31. Исследование влияния параметра $(P_c \cdot P_o^{1/2})$ на концентрацию углерода в жидком растворе на основе железа по данным [213] для $T=1823 \text{ K}$

Проверка полученного варианта зависимости

$$x_{[C]} = k \cdot P_c \cdot P_o^{1/2} \quad (3.38)$$

с использованием данных [213] при других температурах, дала результаты с аналогично высокими коэффициентами корреляции (рис.3.32, 3.33; табл.3.12).

Учитывая высокие значения коэффициентов корреляции (R) и коэффициентов детерминации (R^2), величины которых превышают аналогичные значения для линейной гипотезы $x_{[C]} = k \cdot P_c$, то последнюю гипотезу (3.38) следует признать более верной для описания концентрационной зависимости углерода в равновесных условиях с газовой фазой, содержащей CO и CO_2 .

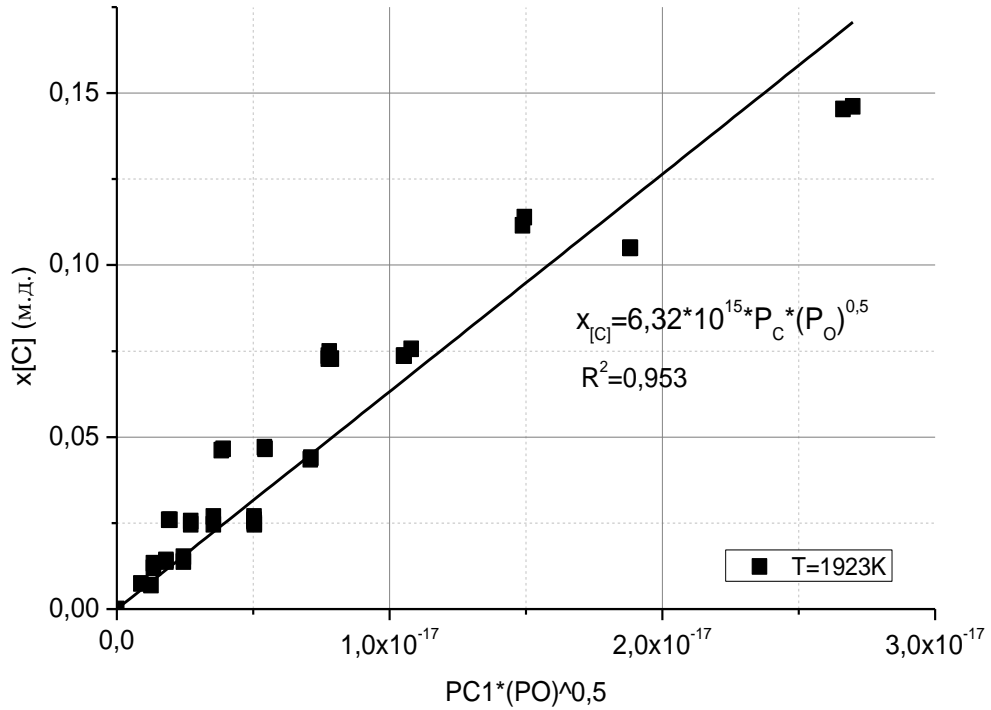


Рисунок 3.32. Исследование влияния параметра $(P_C \cdot P_O^{1/2})$ на концентрацию углерода в жидком растворе на основе железа по данным [213] для $T = 1923 K$

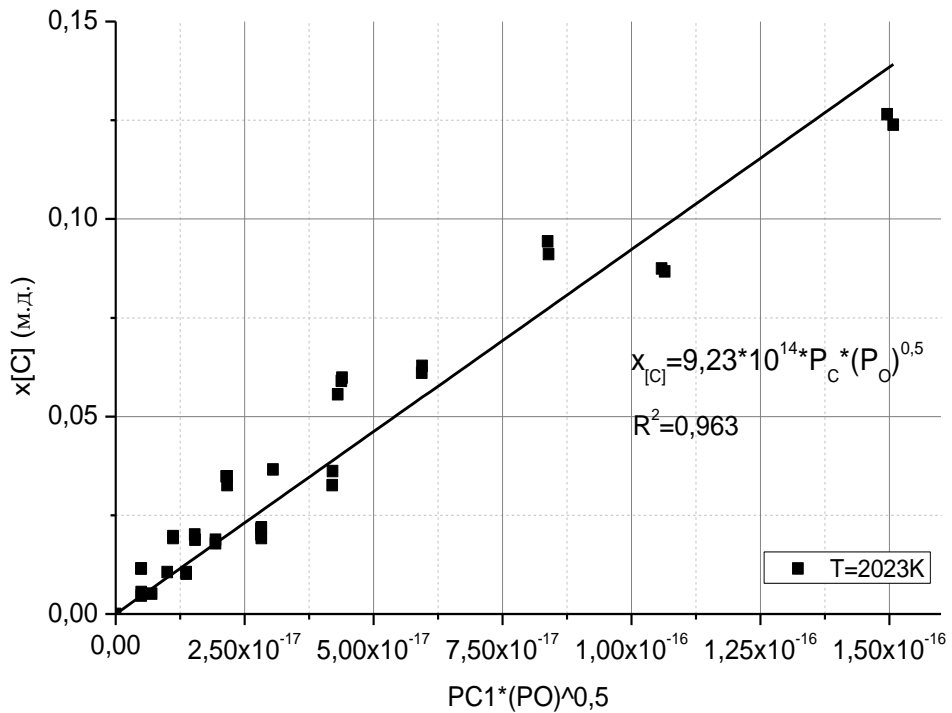


Рисунок 3.33. Исследование влияния параметра $(P_C \cdot P_O^{1/2})$ на концентрацию углерода в жидком растворе на основе железа по данным [213] для $T = 2023 K$

Таблица 3.12. Результаты аппроксимации при исследовании зависимости

$$x_{[C]} = f(P_C, P_O) \text{ по экспериментальным данным работы [213]}$$

| Температура, К | Число точек | Линейная гипотеза $x_{[C]} = k \cdot P_C \cdot P_O^{1/2}$ | | |
|----------------|-------------|---|--|--------------------------------|
| | | Значение коэффициента k | Стандартная ошибка определения значения коэффициента k | Коэффициент детерминации R^2 |
| 1823 | 29 | $4,58294 \times 10^{16}$ | $1,94083 \times 10^{15}$ | 0,95048 |
| 1923 | 40 | $6,32193 \times 10^{15}$ | $2,20756 \times 10^{14}$ | 0,95344 |
| 2023 | 37 | $9,23104 \times 10^{14}$ | $2,95907 \times 10^{13}$ | 0,96334 |

Применение выражения (3.38) для анализа всех имеющихся данных по изучению равновесия в системе Fe-CO-CO₂ показало аналогичные с приведёнными выше результатами для данных работы [213]. Поэтому можно признать, что на содержание углерода в расплаве железа влияет не только содержание углерода в газовой фазе, но и окисленность газовой фазы. Для системы Fe-C (в отсутствии кислорода в системе) весьма вероятно выполнение закона Генри для углерода, растворённого в жидком железе.

Основываясь на рассчитанных величинах коэффициента пропорциональности k в зависимости (3.38) получили температурную зависимость (рис.3.34).

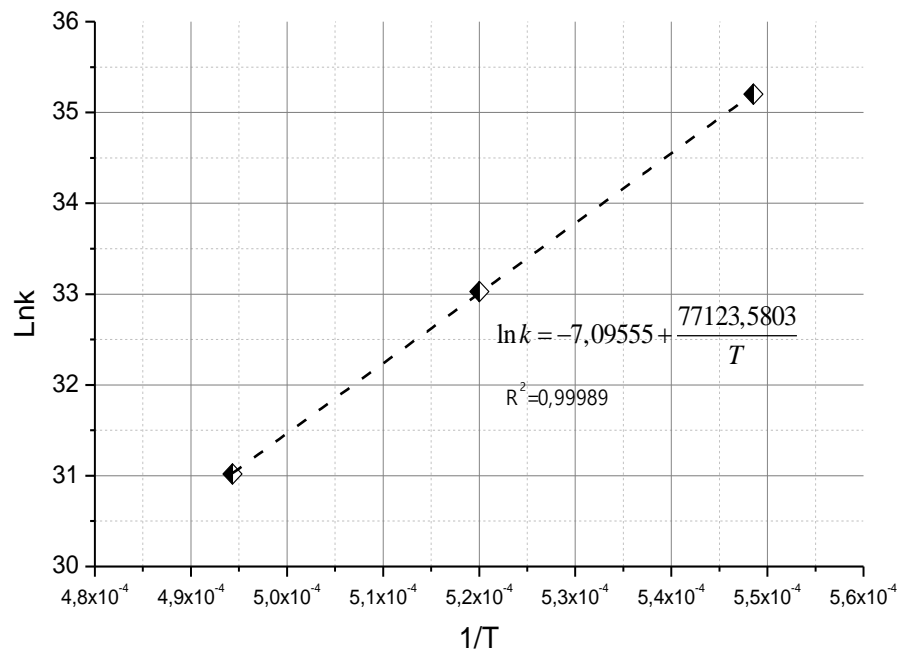
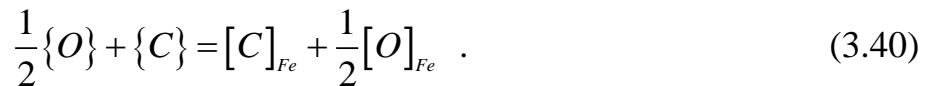


Рисунок 3.34. Определение температурной зависимости коэффициента k в зависимости (3.38)

Тогда содержание углерода в жидком металле системы Fe-CO-CO₂ можно описать следующим уравнением:

$$\ln x_{[C]} = 77124/T + \ln P_C + 0,5 \cdot \ln P_O - 7,096. \quad (3.39)$$

Коэффициент пропорциональности в зависимости (3.38) можно представить как константу равновесия следующей псевдореакции:



Соответствующая константа равновесия псевдореакции (3.40):

$$K = \frac{x_{[C]} \cdot x_{[O]}^{1/2}}{P_C \cdot P_O^{1/2}} \quad (3.41)$$

Зная температурную зависимость (3.39) определили изменение свободной энергии Гиббса для псевдореакции (3.40)

$$\Delta G_{(3.40)} = -641209 + 59 \cdot T \quad (3.42)$$

Для преобразования уравнения псевдореакции (3.40) в уравнение межфазного распределения углерода:

$$\{C\} = [C]_{Fe} \quad (3.43)$$

вычтем из выражения (3.40) реакцию растворения атомарного кислорода, а для получения соответствующего уравнения изменения свободной энергии Гиббса реакции (3.43) из уравнения (3.42) вычитаем половину свободной энергии Гиббса реакции растворения моноатомного кислорода (3.18), в итоге получаем :

$$G_{(3.43)} = -454\,465 + 13,355 \cdot T \quad (3.44)$$

Тогда константа Генри при растворении газообразного моноуглерода в жидком железе будет равна

$$\ln k_{C_{gas}}^{(H)} = -\frac{\Delta G_{(3.43)}}{RT} = \frac{54\,663}{T} - 1,606 \quad (3.45)$$

Для получения соответствующих уравнений, характеризующих межфазное распределение углерода между твёрдым углеродом и железоуглеродистым расплавом, к уравнению (3.43) добавили выражение (3.28)

$$C_{solid} = [C]_{Fe} \quad (3.46)$$

$$\begin{aligned} \Delta G_{(3.46)} &= \Delta G_{(3.43)} + \Delta G'_{(2.28)} = -454\,465 + 13,355 \cdot T + 717\,059 - 157,05 \cdot T = \\ &= 262\,594 - 143,695 \cdot T \end{aligned} \quad (3.47)$$

Таким образом, уточнённое уравнение коэффициента Генри для углерода, растворённого в расплаве железа, имеет вид:

$$\ln k_{C_{solid}}^{(H)} = -31\,585/T + 17,283. \quad (3.48)$$

Сравнивая полученные данные с имеющимися в литературе (табл.1.7) можно отметить, что значение свободной энергии Гиббса реакции растворения углерода в жидком железе, полученное по уравнению (3.47) – $\Delta G_{(3/46)} \Big|_{T=1873} = -6547$ (Дж/моль) – близко к соответствующей величине в работах [90, 240, 242] (см. табл.1.7).

3.3. Активность компонентов в газовых фазах

Для учёта влияния газовой фазы на концентрацию растворённого в металле кислорода оценивают её окислительные свойства. При этом поведение кислорода в различных фазах равновесной системы имеет диаметрально разный характер: идеальный в газовой фазе и неидеальный в металле и шлаке [34, 57, 220, 434]. Для анализа и расчёта равновесного состава газовой фазы металлургической системы ограничиваются применением модели идеальных газовых смесей [34, 57, 409, 410, 459, 460, 461, 462, 463, 464] с использованием следующих параметров: температура и давление в системе, парциальное давление компонента и величина константы равновесия реакции в газовой фазе. Считается, что отклонения от идеальности при металлургических температурах в диапазоне давлений, наблюдаемых в агрегате, ниже десятых долей процента, что достаточно для точности прогнозных оценок. Если в состав атмосферы входит кислород, то при написании химических реакций и в дальнейших термодинамических расчётах всегда фигурирует двухатомный кислород O_2 [374, 462, 463, 464], так как "в пределах температур, характеризующих металлургические процессы, элементарный кислород является всегда двухатомным. Диссоциацией его на атомы, а также образованием озона (O_3) при

существующих условиях можно пренебречь" [96]. И только при температурах более 2500°C рекомендуется учитывать присутствие в газовой фазе заметных количеств атомарных частиц и радикалов [463].

В качестве параметра окислительных свойств кислородсодержащей газовой фазы металлургической системы предлагается окислительный потенциал π_o [462, 463, 464], определяющийся из выражения

$$\pi_o = RT \ln P_{O_2} \quad (3.49)$$

где R – универсальная газовая постоянная, 8,314 Дж/моль×К; T – температура, К; P_{O_2} - парциальное давление двухатомного кислорода, Па.

Как видно из выражения (3.49) окислительные свойства газовой фазы определяются только содержанием двухатомного кислорода. Однако, в восстановительных металлургических процессах и процессах раскисления равновесное парциальное давление двухатомного кислорода уменьшается на порядки (до величин ниже 10^{-4} Па) в сравнении с составом окислительной атмосферы агрегатов. В этом случае, согласно принципу Ле-Шателье – Брауна, в газовой фазе должно возрасти парциальное давление атомарного кислорода и его концентрацией пренебрегать нельзя. Тогда и оценивать кислородный потенциал газовой фазы только по значению парциального давления двухатомного кислорода нельзя. То есть для восстановительных условий выражение (3.49) может быть давать ошибку в оценке окислительности газовой фазы.

Для разработки методики расчёта термодинамических функций компонентов газовой фазы с уточнением оценки её окислительных свойств и способа учёта концентрации атомарного кислорода в газе на его поведение в металлургической системе введем следующие основные понятия.

Компонентами (независимыми переменными) всех фаз гетерогенной системы считаются химические элементы Периодической системы. При этом все фазы высокотемпературной гетерогенной системы имеют качественно одинаковый состав: все элементы (компоненты) присутствуют во всех фазах. Такой выбор

компонентов Гиббс назвал конечным (finite), а определённые таким образом компоненты – элементарными.

Стандартное состояние компонентов. Принимается единое стандартное состояние компонентов для всех фаз системы – гипотетическое состояние атомарного газа конечного компонента с давлением равным единице при температуре исследования. С учётом этого условием равновесия в системе вместо равенства химических потенциалов становится равенство активностей компонентов в сосуществующих фазах (см. напр. [465]):

$$a_{\{i\}} = a_{[i]} = a_{(i)} \quad (3.50)$$

Необходимо отметить, что предложенное стандартное состояние относится не к чистому веществу при давлении равном единице и заданной температуре, а к конечному компоненту – химическому элементу.

Переход к единому стандарту "автоматически" приводит к исключению (обращению в единицу) всех констант ЗДМ гетерогенных реакций и единственным эмпирически определяемым параметром становится коэффициент активности.

Химические потенциалы компонентов во всех фазах гетерогенной системы (включая газовую) выражаются через активности (по Льюису): $\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i$,

$$a_i = x_i \cdot \gamma_i.$$

Концентрация конечного компонента в фазе x_i определяется как отношение количества атомов выбранного компонента N_i к количеству атомов всех k видов в

этой фазе $\sum_{j=1}^k N_j$:

$$x_i = N_i / \sum_{j=1}^k N_j, \quad (3.51)$$

где k – количество конечных компонентов в фазе.

Активность конечного компонента a_i это отношение парциального давления конечного компонента в газовой фазе равновесной системы P_i к парциальному давлению этого компонента в стандартном состоянии P_i^{st} :

$$a_i = P_i / P_i^{st} \quad (3.52)$$

P_i^{st} – произвольно выбираемая единица измерения давления.

Предлагаемый вариант определения активности приводит к понятию абсолютной активности, численное значение которой может превышать единицу в отличие от применяемой сейчас относительной активности.

Анализ активности кислорода в различных газовых металлургических системах производился путём расчёта равновесного состава фазы на основе использования термодинамических данных справочника [466, 467].

3.3.1. Гомогенная система чистый кислород

Один конечный компонент – химический элемент кислород – образует три устойчивых газовых соединения – атомарный кислород O, двухатомный кислород O₂, озон O₃ и ряд ионов и электроны [468].

Общее давление газовой фазы P_{sum}^{Ox} рассчитывается как сумма парциальных давлений компонентов (пренебрегая парциальными давлениями ионов и электронов):

$$P_{sum}^{Ox} = P_O + P_{O_2} + P_{O_3}, \quad (3.53)$$

где P_O , P_{O_2} , P_{O_3} – парциальные давления атомарного, двухатомного кислорода и озона соответственно.

Концентрация конечного компонента в газовой фазе чистого кислорода будет постоянна и равна единице:

$$x_{\{O\}} = \frac{N_{\{O\}}}{\sum_{j=1}^3 N_{\{j\}}} = \frac{P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3}}{P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3}} = 1. \quad (3.54)$$

Если исходить из известного определения активности, то активность химически свободного кислорода равна отношению парциального давления атомарного кислорода к его же парциальному давлению в стандартном состоянии

$P_O^{st} = 1$ Па:

$$a_{\{O\}} = P_o / P_o^{st} \quad (3.55)$$

Задавая общее давление P_{sum}^{Ox} и температуру системы, и вычисляя значения констант диссоциации многоатомных молекул кислорода K_{O_2} и K_{O_3} (по данным [466]) определяем парциальное давление атомарного кислорода из уравнения:

$$P_o + P_o^2 / K_{O_2} + P_o^3 / K_{O_3} = P_{sum}^{Ox} . \quad (3.56)$$

Таким образом, при постоянной температуре парциальное давление атомарного кислорода (и его активность) зависит только от давления газовой фазы $a_{\{O\}} = f(P_{sum}^{Ox})$.

На рис. 3.35 приведены результаты расчета активности кислорода в чистом газообразном кислороде при температуре 1873К как функции общего давления в системе.

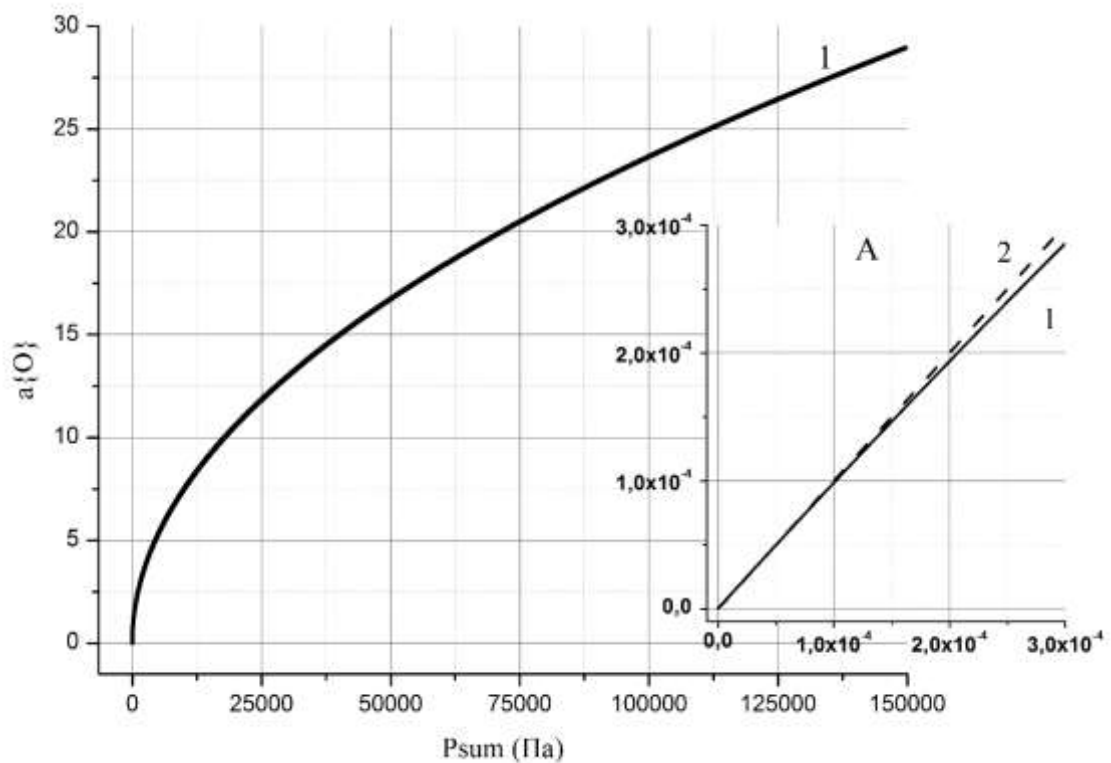


Рисунок 3.35. Зависимость активности кислорода в чистом газообразном кислороде от общего давления при температуре 1873К:

- 1 – кривая расчётной зависимости; 2 – прямая, отображающая характеристику идеального газа; А – укрупнённый участок вблизи начала координат.

Расчётная кривая активности вблизи к точке начала координат превращается в прямую вида $y=x$ (рис. 3.35 (А)). То есть, при стремлении давления в системе к нулю характеристики чистого кислорода приближаются к характеристикам идеального газа:

$$P_O = P_{sum}^{Ox} \quad (3.57)$$

При увеличении давления в системе наблюдаются отрицательные отклонения от поведения идеального газа, связанные с образованием молекул двухатомного кислорода и озона и соответствующей им энтальпией образования ΔH_{O_2} и ΔH_{O_3} .

3.3.2. Гомогенная система инертный газ – кислород

Газовая фаза состоит из двух конечных компонентов – гелия и кислорода, поэтому её характеристики будут определяться тремя параметрами: температурой, давлением в системе и составом (концентрацией конечных компонентов).

Общее давление газовой фазы P_{sum}^{He-O} рассчитывается как сумма парциальных давлений компонентов:

$$P_{sum}^{He-O} = P_O + P_{O_2} + P_{O_3} + P_{He} \quad (3.58)$$

Концентрация конечных компонентов определяется выражениями:

$$x_{\{O\}} = \frac{N_{\{O\}}}{\sum N_{\{J\}}} = \frac{P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3}}{P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3} + P_{He}}, \quad (3.59)$$

$$x_{\{He\}} = \frac{N_{\{He\}}}{\sum N_{\{J\}}} = \frac{P_{He}}{P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3} + P_{He}} \quad (3.60)$$

Активности конечных компонентов определяются по выражению (3.52) при $P_j^{st} = 1$ Па. Результаты расчёта представлены на рис. 3.36.

Как видно из рисунка активность кислорода в двухкомпонентной газовой фазе существенно ниже прямой линии идеального газа, что объясняется способностью кислорода к образованию устойчивых многоатомных молекул.

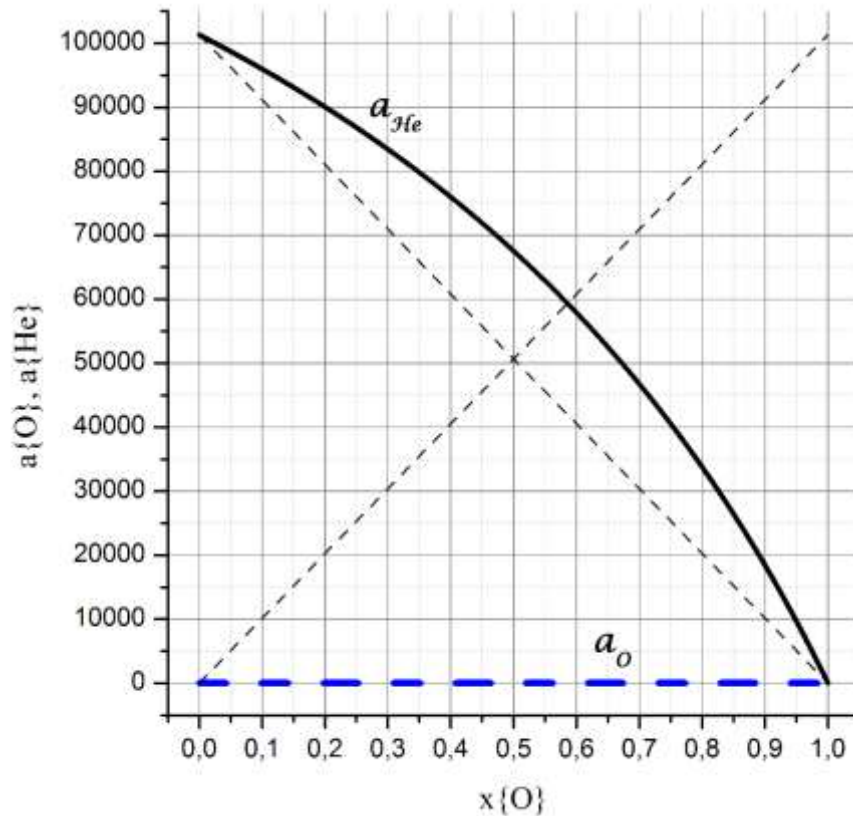


Рисунок 3.36 – Активность конечных компонентов в газовой фазе гелий – кислород при $T=1873\text{K}$ и $P=101325\text{ Па}$:

--- – прямые линии, отображающие поведение компонентов в идеальном газе.

3.3.3. Гомогенная система водород – кислород

Как и в предыдущей системе в рассматриваемой два конечных компонента, при этом эти компоненты могут образовывать девять различных молекулярных форм – H , H_2 , O , O_2 , O_3 , OH , HO_2 , H_2O , H_2O_2 . Образованием ионов и электронов пренебрегаем ввиду малых их концентраций в сравнении с молекулярными формами.

Общее давление газовой фазы P_{sum}^{H-O} рассчитывается как сумма парциальных давлений компонентов:

$$P_{sum}^{H-O} = P_O + P_{O_2} + P_{O_3} + P_H + P_{OH} + P_{HO_2} + P_{H_2O} + P_{H_2O_2} \quad (3.61)$$

Концентрация водорода и кислорода определялась как

$$x_{\{H\}} = \frac{P_H + 2P_{H_2} + P_{OH} + P_{HO_2} + 2P_{H_2O} + 2P_{H_2O_2}}{P_H + 2P_{H_2} + 2P_{OH} + 3P_{HO_2} + 3P_{H_2O} + 4P_{H_2O_2} + P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3}} \quad (3.62)$$

$$x_{\{O\}} = \frac{P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3} + P_{OH} + 2P_{HO_2} + P_{H_2O} + 2P_{H_2O_2}}{P_H + 2P_{H_2} + 2P_{OH} + 3P_{HO_2} + 3P_{H_2O} + 4P_{H_2O_2} + P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3}} \quad (3.63)$$

Результаты расчёта активности компонентов в системе водород – кислород при температуре 1873К и давлении 101325 Па показаны на рис. 3.37.

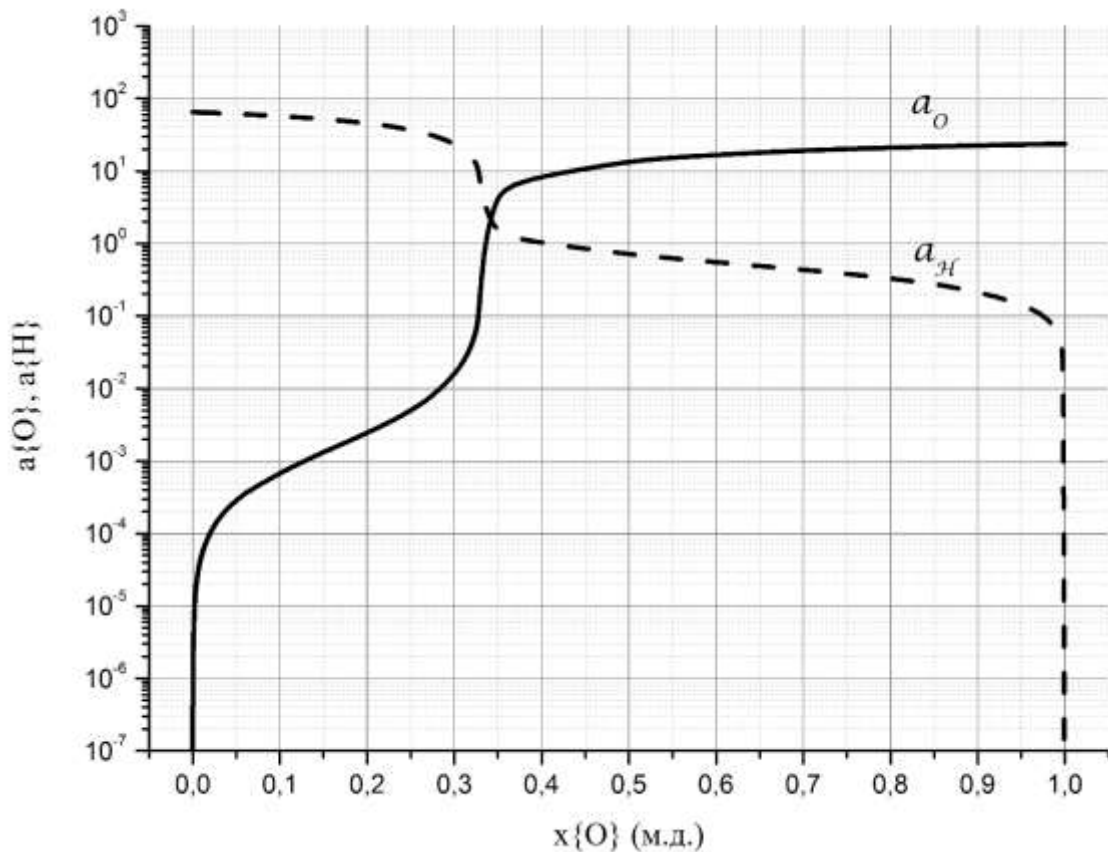


Рисунок 3.37. Активность компонентов в системе Н-О при температуре 1873К и давлении 101325 Па

Сравнивая результаты расчёта активности кислорода в системах Н-О и Не-О, видно, что на активность кислорода при малых концентрациях влияет его химическая активность с водородом, ведущая к образованию устойчивых соединений (рис. 3.38).

Большинство экспериментов по определению физико-химических особенностей раствора кислорода в жидком железе проводились с использованием

газовой смеси водород – водяной пар, либо водород – водяной пар – инертный газ (аргон) [203, 204, 209, 211, 218].

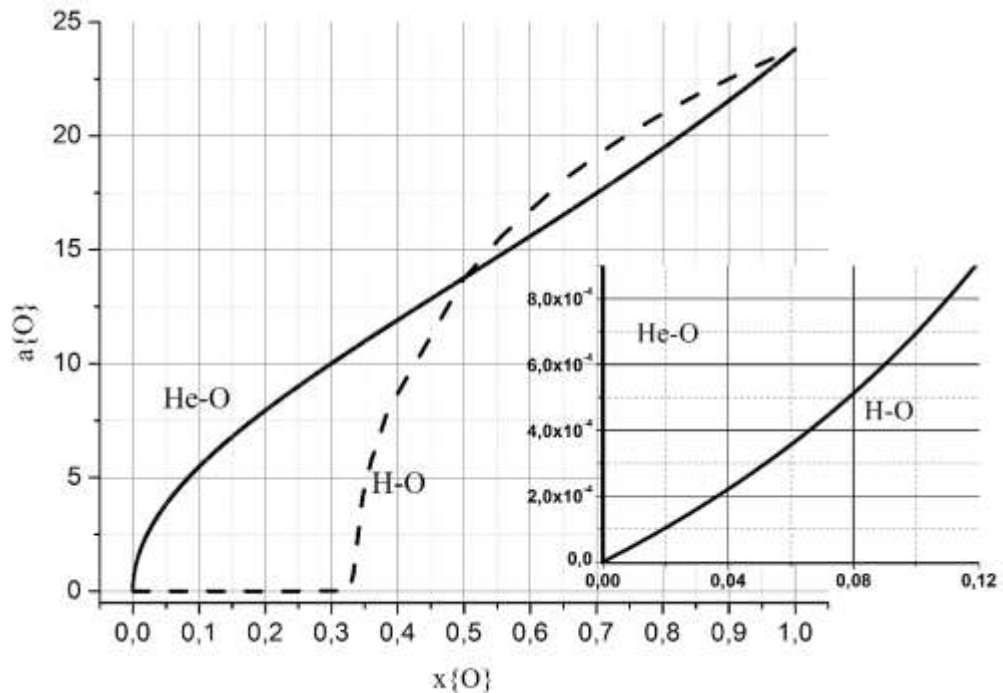


Рисунок 3.38. Сравнение активности кислорода в системах Н–О и He–О при 1873 К и давлении в системах 101325 Па

Ввод инертного газа в систему водород – водяной пар без изменения давления газовой фазы равносителен снижению общего давления для исходной системы. Поэтому мы проанализировали влияние изменения давления в газе на активность её компонентов. При этом рассматривали такое соотношение частиц водорода и кислорода в системе, которое соответствует граничным составам фаз в экспериментальных работах. Анализ результатов экспериментов, приведённых в работах [203, 204, 209, 211, 218], показал, что соотношение парциальных давлений водяного пара и водорода находилось в диапазоне от $P_{H_2O}/P_{H_2} = 0,006$ [211] до $P_{H_2O}/P_{H_2} = 0,703$ [209].

Расчёт проводили так, чтобы выполнялось условие постоянства количества вещества конечных компонентов (или постоянства отношения N_H/N_O , где N_H , N_O – количество атомов водорода и кислорода в рассматриваемой системе). Результаты представлены на рис. 3.39 и рис. 3.40.

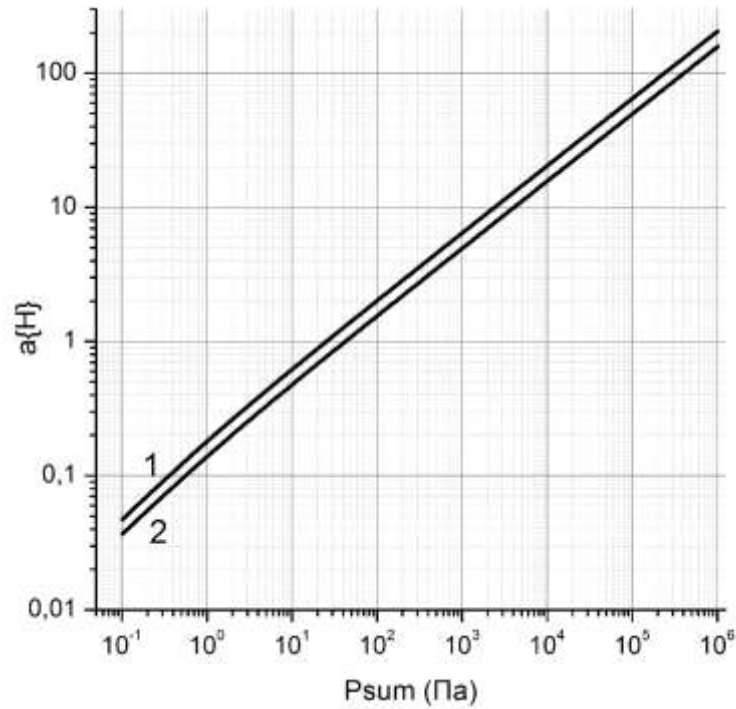


Рисунок 3.39. Влияние изменения давления в системе Н–О на активность водорода при $T=1873\text{K}$

- 1 – массы компонентов системы обеспечивают соотношение $P_{H_2O}/P_{H_2} = 0,0063$;
 2 – массы компонентов системы обеспечивают соотношение $P_{H_2O}/P_{H_2} = 0,702$.

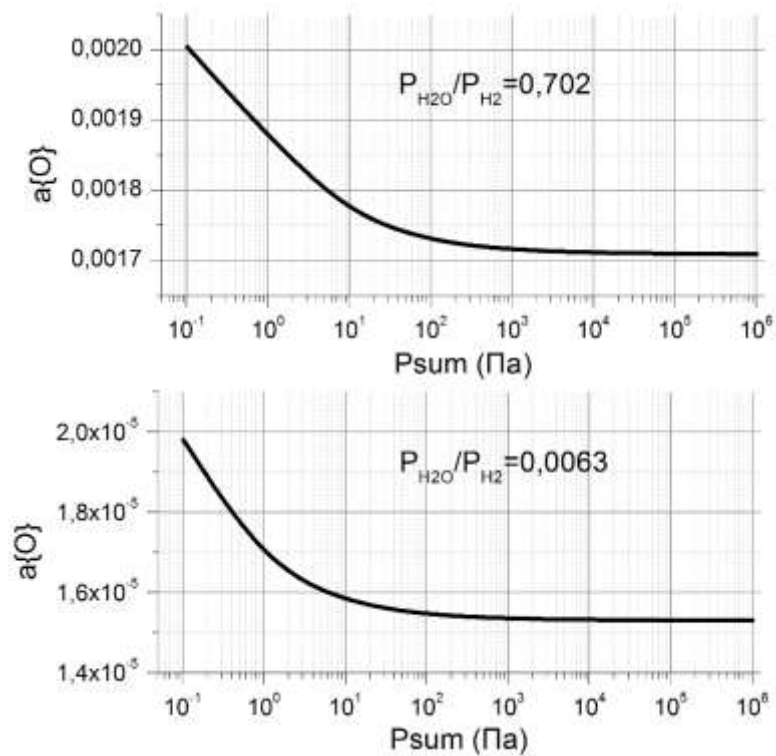


Рисунок 3.40. Влияние изменения давления в системе Н–О на активность кислорода ($T=1873\text{K}$)

Видно, что снижение давления в системе ведёт к уменьшению активности водорода (рис. 3.39) и небольшому увеличению активности кислорода (рис. 3.40). Таким образом, ввод в систему инертного газа при сохранении неизменного общего давления газовой фазы ведёт к снижению активности водорода при постоянстве активности кислорода, что может исказить интерпретацию результатов экспериментов по определению взаимодействия кислорода с жидким железом.

Ввод в состав рассматриваемой системы водород – кислород второй фазы – жидкого железа не меняет зависимость активности кислорода от концентрации в газовой фазе до момента полного окисления железа. Однако присутствие железа влияет на характер изменения активности кислорода при изменении давления в системе (рис. 3.41) и практически не влияет на характер изменения активности водорода (рис. 3.42).

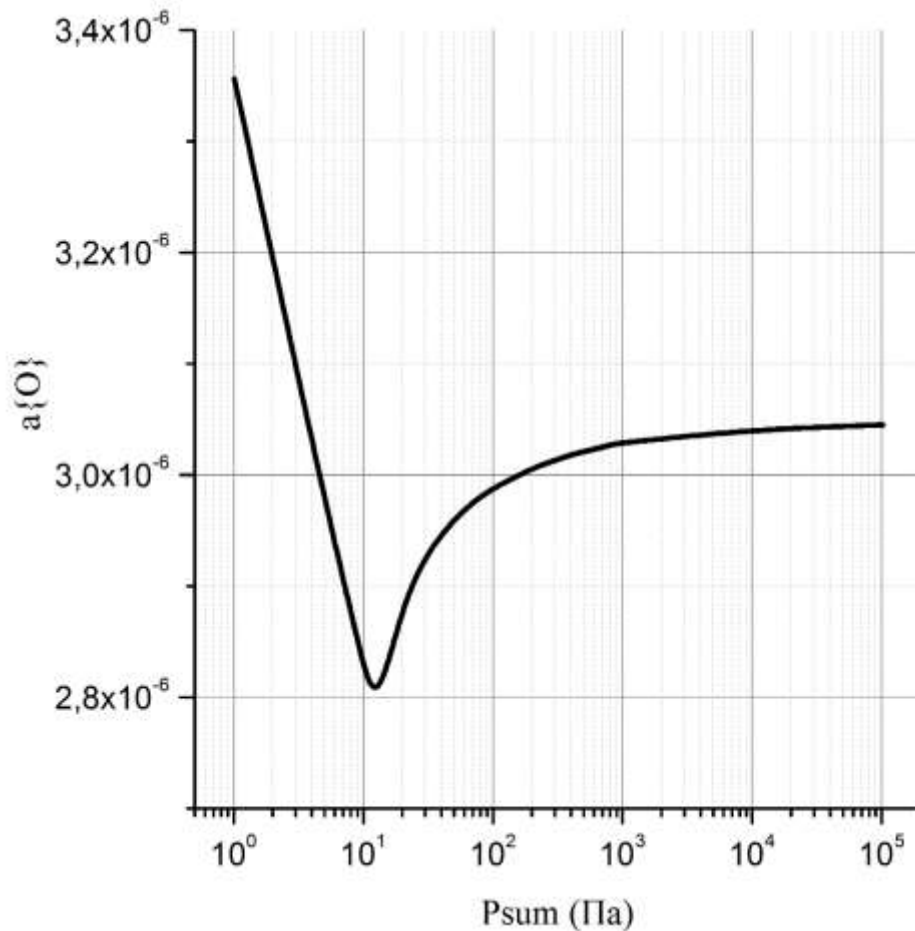


Рисунок 3.41. Влияние изменения давления в системе Н–О–Fe_{cond} на активность кислорода при 1873К

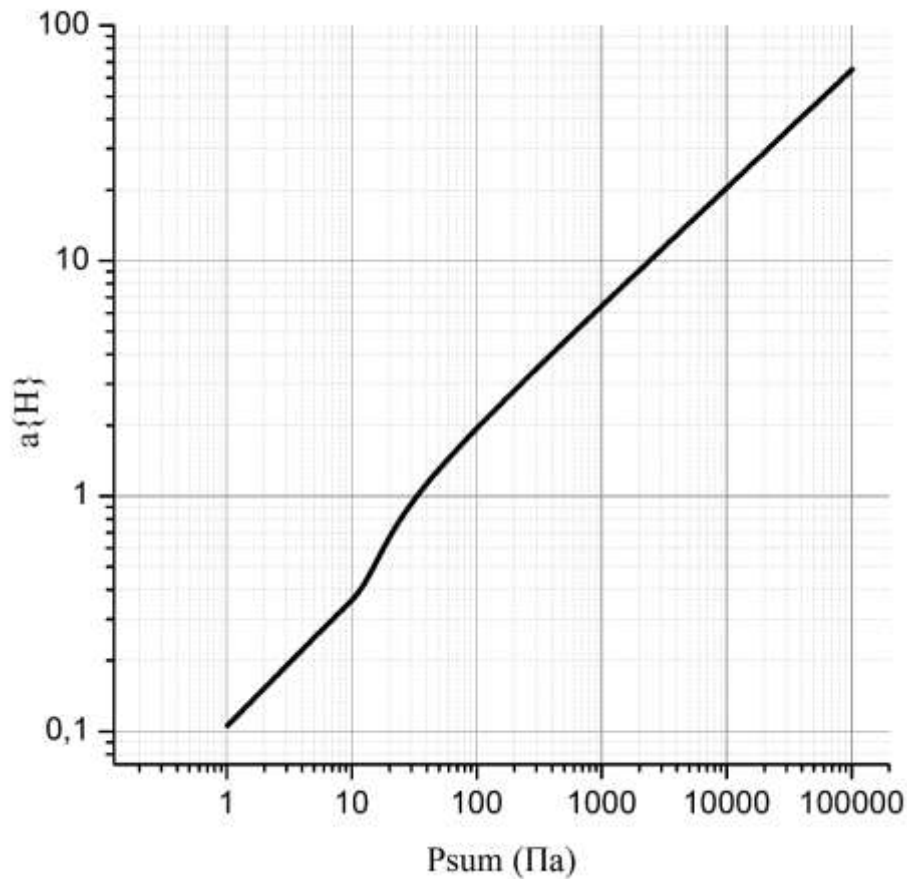


Рисунок 3.42. Влияние изменения давления в системе Н–О–Fe_{cond} на активность водорода при 1873К

Резкое снижение активности кислорода наблюдается в области, где общее давление становится равным давлению пара железа.

Таким образом, присутствие паров железа в системе водород – кислород вызывает снижение активности кислорода в сравнении с чистой системой Н–О. При снижении общего давления в системе Н–О–Fe_{cond} до уровня давления в промышленных вакууматорах (100 Па) активность кислорода остаётся практически постоянной.

3.3.4. Гомогенная газовая система углерод – кислород

Система состоит из двух компонентов, однако в отличие от рассмотренных выше двухкомпонентных систем система углерод – кислород при металлургических температурах (1773–2173К) и концентрациях углерода выше 0,5

переходит из однофазной (газовая фаза) в двухфазную (в системе появляется конденсат углерода). Паровая фаза чистого углерода согласно данным [469] представлена пятью видами молекул – C, C₂, C₃, C₄ и C₅. Общее давление газовой фазы P_{sum}^{C-O} рассчитывается как сумма парциальных давлений компонентов

$$P_{sum}^{C-O} = P_O + P_{O_2} + P_{O_3} + P_{CO} + P_{CO_2} + P_{C_2O} + P_{C_3O_2} + \\ + P_C + P_{C_2} + P_{C_3} + P_{C_4} + P_{C_5} \quad (3.64)$$

Концентрация компонентов определялась как

$$x_{\{C\}} = \frac{\left(P_{CO} + P_{CO_2} + 2P_{C_2O} + 3P_{C_3O_2} + \right. \\ \left. + P_C + 2P_{C_2} + 3P_{C_3} + 4P_{C_4} + 5P_{C_5} \right)}{\left(2P_{CO} + 3P_{CO_2} + 3P_{C_2O} + 5P_{C_3O_2} + P_C + 2P_{C_2} + \right. \\ \left. + 3P_{C_3} + 4P_{C_4} + 5P_{C_5} + P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3} \right)}, \quad (3.65)$$

$$x_{\{O\}} = \frac{\left(P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3} + P_{CO} + 2P_{CO_2} + P_{C_2O} + 2P_{C_3O_2} \right)}{\left(2P_{CO} + 3P_{CO_2} + 3P_{C_2O} + 5P_{C_3O_2} + P_C + 2P_{C_2} + \right. \\ \left. + 3P_{C_3} + 4P_{C_4} + 5P_{C_5} + P_O + 2P_{O_2} + 3P_{O_3} \right)}. \quad (3.66)$$

На рис. 3.43 показаны результаты расчёта зависимости активности компонентов от концентрации. Видно, что при практически постоянной концентрации кислорода в системе $x_{\{O\}} = 0,5$ активность кислорода может меняться на 10 порядков. В промышленных условиях это приводит к тому, что незначительные изменения соотношения концентраций CO и CO₂ в атмосфере агрегата могут вызывать изменения процесса от восстановительного к окислительному.

Влияние изменения общего давления в системе углерод – кислород на активность компонентов зависит от выбранного соотношения концентрации компонентов. Соотношения компонентов при этом подбирали такими, которые бы перекрывали весь диапазон изменений этой величины, наблюдаемой в экспериментах по изучению растворимости кислорода в жидком железе при равновесии с газовой фазой системы CO–CO₂, по изучению раствора углерода в

жидком железе, по изучению процесса обезуглероживания расплавов на основе железа.

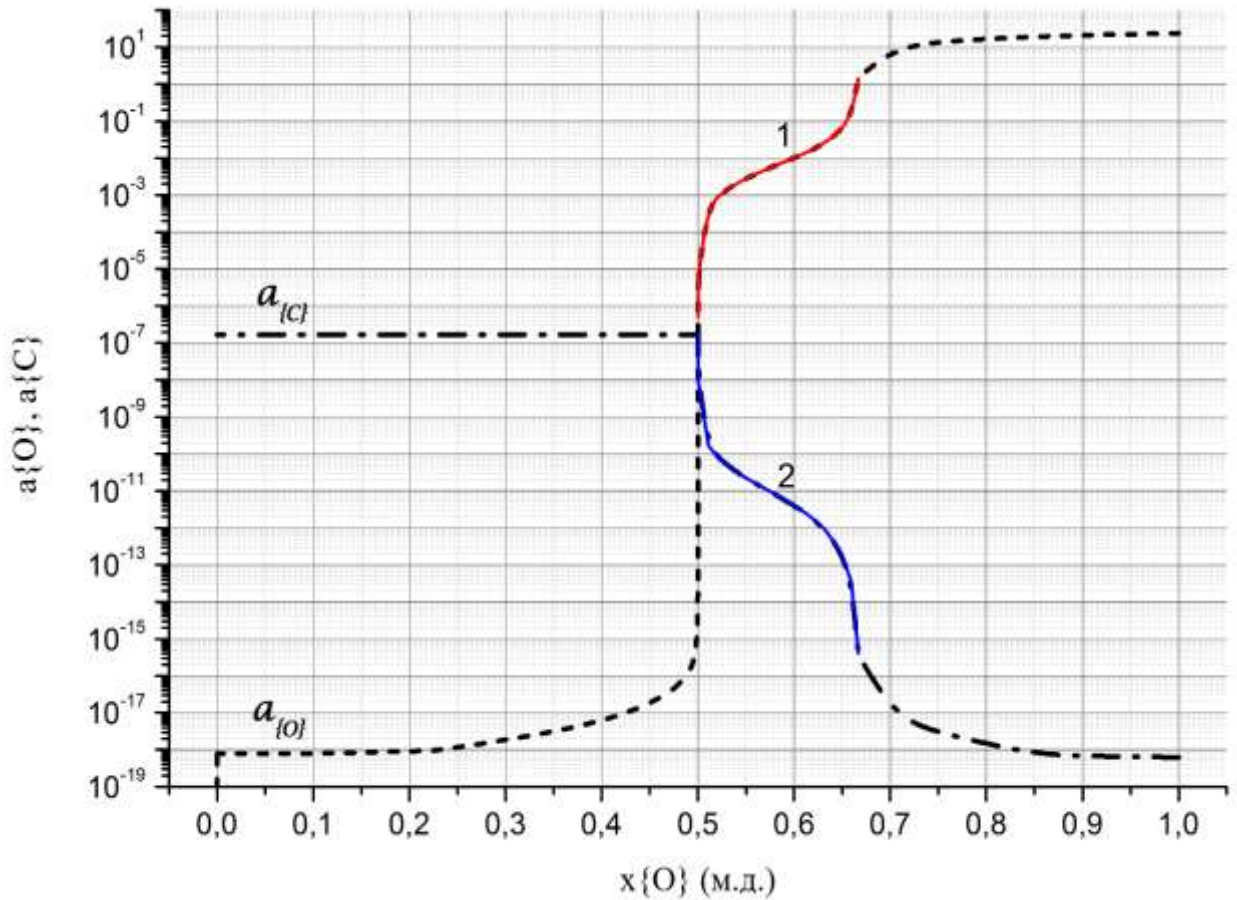


Рисунок 3.43. Зависимость активности компонентов от концентрации в газовой фазе системы углерод – кислород при $T=1873\text{K}$ и давлении 101325 Па :

1,2 – участки, соответствующие активности кислорода и углерода в системе $\text{CO}-\text{CO}_2$.

Выбраны для примера четыре варианта соотношения концентрации углерода и кислорода:

1 – газовая фаза, образованная из чистого CO взятого при комнатной температуре и нагретого до температуры эксперимента 1873K , соотношение компонентов при $T=1873\text{K}$ и $P=101325\text{ Па}$ $x_{\text{C}}/x_{\text{O}} = 0,99995$, что соответствует соотношению

$$P_{\text{CO}}/P_{\text{CO}_2} = 20\,055;$$

2 – газовая фаза, образованная из смеси CO и CO_2 с соотношением $P_{\text{CO}}/P_{\text{CO}_2} = 4\,998$ (соответствует условиям экспериментов работы [470]) при нагреве от комнатной

температуры до температуры эксперимента 1873К, соотношение компонентов при $T=1873\text{К}$ и $P=101325\text{ Па}$ составляет $x_{\{C\}}/x_{\{O\}} = 0,9998$;

3 – газовая фаза, образованная из смеси CO и CO₂ с соотношением $P_{CO}/P_{CO_2} = 801$ (соответствует условиям экспериментов работы [225]) при нагреве от комнатной температуры до температуры эксперимента 1873К, соотношение компонентов при $T=1873\text{К}$ и $P=101325\text{ Па}$ $x_{\{C\}}/x_{\{O\}} = 0,99876$;

4 – газовая фаза, образованная из смеси CO и CO₂ с соотношением $P_{CO}/P_{CO_2} = 1,6$ (соответствует условиям экспериментов работы [225]) при нагреве от комнатной температуры до температуры эксперимента 1873К, соотношение компонентов при $T=1873\text{К}$ и $P=101325\text{ Па}$ $x_{\{C\}}/x_{\{O\}} = 0,72361$.

Как видно из результатов расчёта (рис. 3.44, 3.45) при снижении давления в системе, состоящей практически из CO (вариант 1) происходит снижение активности кислорода, в то время как активность углерода остаётся постоянной.

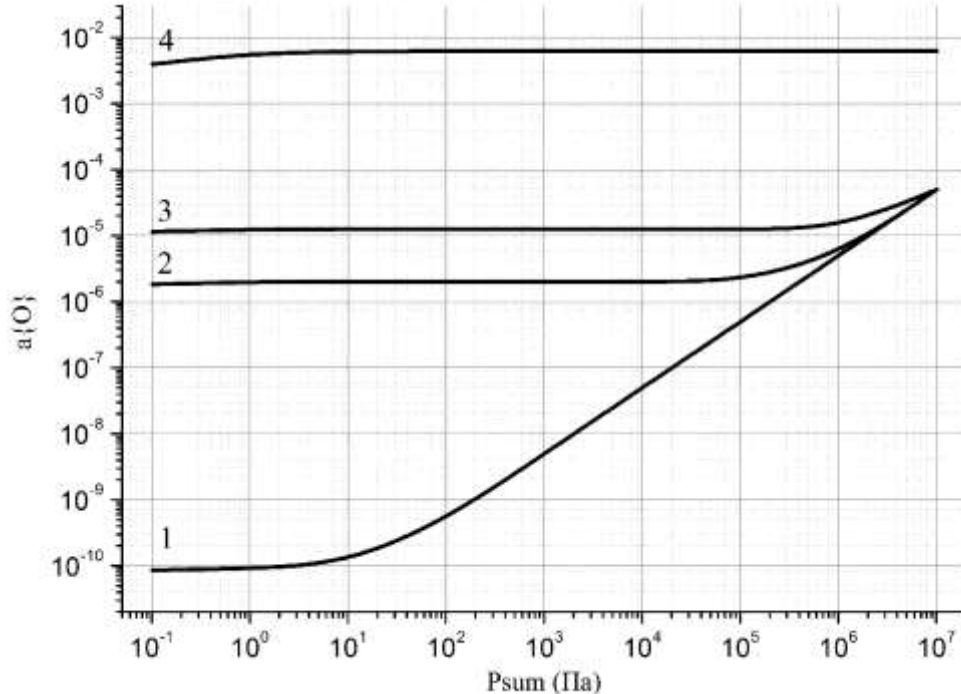


Рисунок 3.44. Влияние изменения давления на активность кислорода в системе углерод – кислород при $T=1873\text{К}$ (номера у кривых соответствуют варианту соотношения компонентов системы)

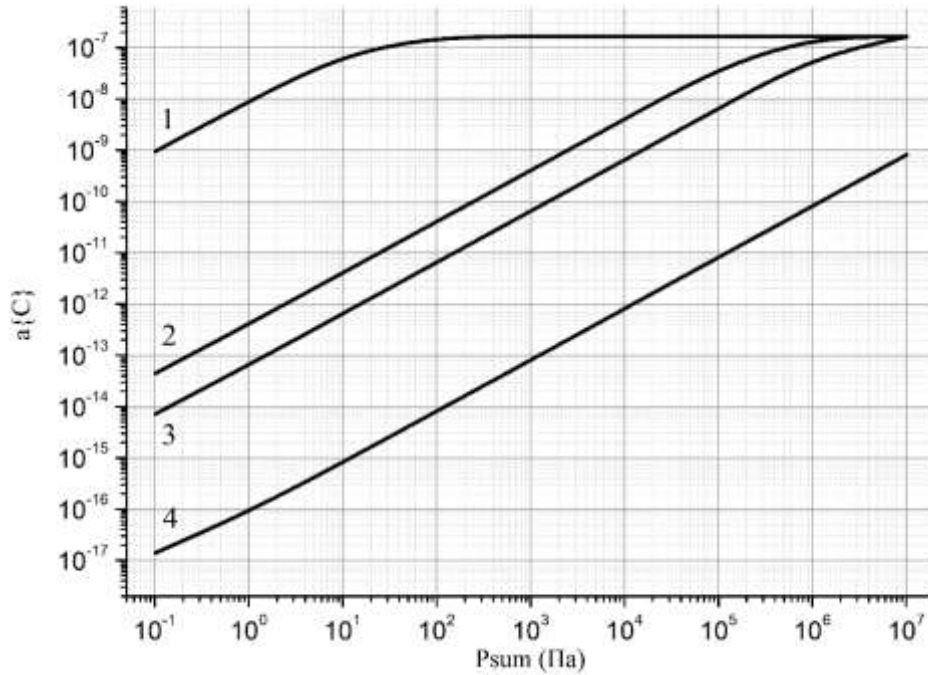


Рисунок 3.45. Влияние изменения давления на активность углерода в системе углерод – кислород при $T=1873\text{K}$ (номера у кривых соответствуют варианту соотношения компонентов системы)

Постоянство активности углерода объясняется наличием небольшого количества второй фазы в системе: твёрдого углерода. И только её исчезновение при малых давлениях в системе ведёт к незначительному снижению активности углерода.

Введение в систему небольшого количества кислорода (даже в виде CO_2) ведёт к тому, что при снижении давления в системе активность кислорода перестаёт изменяться – варианты 2 – 4, а активность углерода наоборот уменьшается.

Из практики вакуумного обезуглероживания стали известно, что достижение низких концентраций углерода в расплаве возможно только при совмещении продувки кислородом и процесса вакуумирования (VOD, RH–OB). При этом содержание кислорода в расплаве практически не меняется.

Такая асимметричная зависимость активности компонентов от давления в системе С–О в зависимости от соотношения компонентов обуславливает

естественный барьер в одновременном достижении низких концентраций кислорода и углерода, растворённых в металле.

Ход кривой 1 на рис. 3.44 показывает, что в восстановительных условиях металлургического процесса (атмосфера – практически чистый CO) существует предел активности кислорода и соответствующий ему минимум содержания кислорода, растворённого в металле, что зафиксировано экспериментально в работе [470].

На результат исследования раскислительной возможности углерода влияет не только давление в системе, а и соотношение концентрации углерода и кислорода в газовой фазе. Учитывая то, что изменение этого соотношения в довольно узких пределах (варианты 1 – 3) ведёт к получению различного характера изменения активности компонентов, можно сказать, что отсутствие эффективного и точного способа контролирования и поддержания такого соотношения в ходе эксперимента повлияло на заключение утверждения об ограниченной раскислительной способности углерода в условиях среднего и высокого вакуума [73].

Если рассмотреть зависимость активности кислорода от активности углерода (рис. 3.46), то можно отметить нелинейный характер этой зависимости в логарифмических координатах.

Особенно интересен участок, характеризующийся низкими значениями активности кислорода – здесь есть точка перегиба: в системе появляется вторая фаза.

В пределах этого участка активность кислорода в системе меняется в широких пределах без изменения активности углерода, что может приводить к постоянству содержания углерода в металле при проведении экспериментов с расплавом железа, находящемуся в этих условиях.

Таким образом,

1. Кислород в газовой фазе не является идеальным компонентом. Из-за образования молекулярных соединений, как между собой, так и с другими компонентами активность кислорода всегда ниже его концентрации. Кривая

активности кислорода в газовой фазе лежит всегда ниже линии, характеризующей поведение идеального газа.

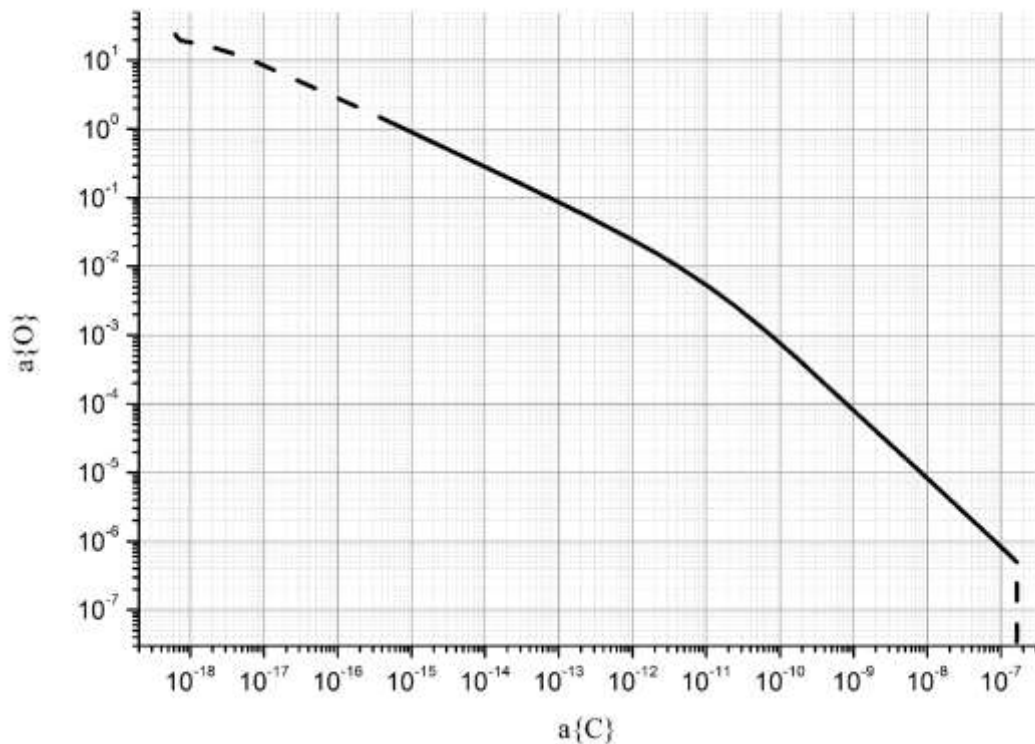


Рисунок 3.46. Зависимость активности кислорода от активности углерода в системе углерод – кислород при $P=101325$ Па и $T=1873$ К: сплошная линия – участок, соответствующий всем комбинациям системы CO–CO₂, штриховая линия – система C–O

2. При снижении активности кислорода в газовой фазе ниже $a_{[O]}=0,0001$ поведение его приближается к поведению идеального компонента газовой смеси. В процессах чёрной металлургии активность кислорода в газовой фазе, за исключением продувки кислородом, находится всегда ниже указанной величины. Для равновесных гетерогенных систем с участием расплава железа или сплавов на его основе активность кислорода в газовой фазе ниже 0,0001 и поэтому поведение кислорода можно описывать как поведение идеального компонента газовой смеси.

3. Снижение давления в системе водород – кислород при температуре 1873К и соотношении парциальных давлений водяного пара и водорода в диапазоне от $P_{H_2O}/P_{H_2}=0,006$ до $P_{H_2O}/P_{H_2}=0,703$ ведёт к адекватному уменьшению активности

водорода и небольшому увеличению активности кислорода. Аналогичное снижение давления в системе $\text{H-O-Fe}_{\text{cond}}$ при тех же значениях соотношения парциальных давлений водяного пара и кислорода и той же температуре практически не влияет на характер изменения активности водорода. Активность кислорода в этой системе при снижении давления практически не изменяется, отмечается резкое снижение в области, где общее давление становится равным давлению пара железа.

4. Асимметричный характер зависимостей активности компонентов от давления в системе углерод – кислород в зависимости от соотношения компонентов обуславливает естественный барьер в одновременном достижении низких концентраций кислорода и углерода, растворённых в металле. На раскислительную способность углерода влияет не только давление в системе, а и соотношение концентрации углерода и кислорода в газовой фазе.

3.4. Совершенствование термодинамического описания распределения азота между газовой фазой и расплавом на основе железа

Расчёт равновесного состава газовых металлургических фаз проводился с использованием термодинамических данных справочника [466, 467] и компьютерной программы моделирования фазовых и химических равновесий "Терра" версии 5.3.

3.4.1. Гомогенная газовая система чистый азот

Согласно принятой выше концепции рассматривали чистый газообразный азот как раствор в газовой фазе всех форм существования газовых азотных молекул, атомов азота, различных ионов азота, образованных из атомов и молекул азота, а также свободных электронов [466].

Анализ полученных результатов расчёта показал, что равновесные парциальные давления ионов и свободных электронов более чем на десять порядков ниже парциального давления любой молекулярной формы веществ.

Поэтому в дальнейших расчётах состав равновесной газовой смеси рассчитывался без учёта образования ионов и свободных электронов, т.е. равновесный состав чистого азота будем рассматривать как раствор трех компонентов: атомарный азот N , двухатомный азот N_2 , и трёхатомный азот N_3 . Общее давление газовой фазы P_{sum}^{Nit} рассчитывается как сумма парциальных давлений компонентов:

$$P_{sum}^{Nit} = P_N + P_{N_2} + P_{N_3}, \quad (3.67)$$

где P_N , P_{N_2} , P_{N_3} – парциальные давления атомарного, двухатомного и трёхатомного азота соответственно.

Концентрация конечного компонента в изолированной фазе чистого азота будет постоянна и равна единице:

$$x_{\{N\}} = N_{\{N\}} / \sum_{j=1}^k N_{\{j\}} = \frac{P_N + 2P_{N_2} + 3P_{N_3}}{P_N + 2P_{N_2} + 3P_{N_3}} = 1. \quad (3.68)$$

Исходя из выражения (3.52), а также учитывая, что конечным компонентом для газообразного азота является атомарный азот, активность азота запишем как отношение парциального давления атомарного азота к его же парциальному давлению в стандартном состоянии:

$$P_N + P_N^2 / K_{N_2} + P_N^3 / K_{N_3} = P_{sum}^{Nit}. \quad (3.69)$$

Тогда, при постоянной температуре парциальное давление атомарного азота (и его активность) зависит только от давления газовой фазы $a_{\{N\}} = f(P_{sum}^{Nit})$. На рис. 3.47 приведены результаты расчёта активности азота в чистом газообразном азоте при температуре 1873К как функции общего давления в системе.

Расчётная кривая активности вблизи к точке начала координат приближается к виду линейной зависимости $y = x$ (рис. 3.47 (А)). То есть, при стремлении давления в системе к нулю парциальное давление атомарного азота приближается к общему давлению в системе:

$$P_N = P_{sum}^{Nit}. \quad (3.70)$$

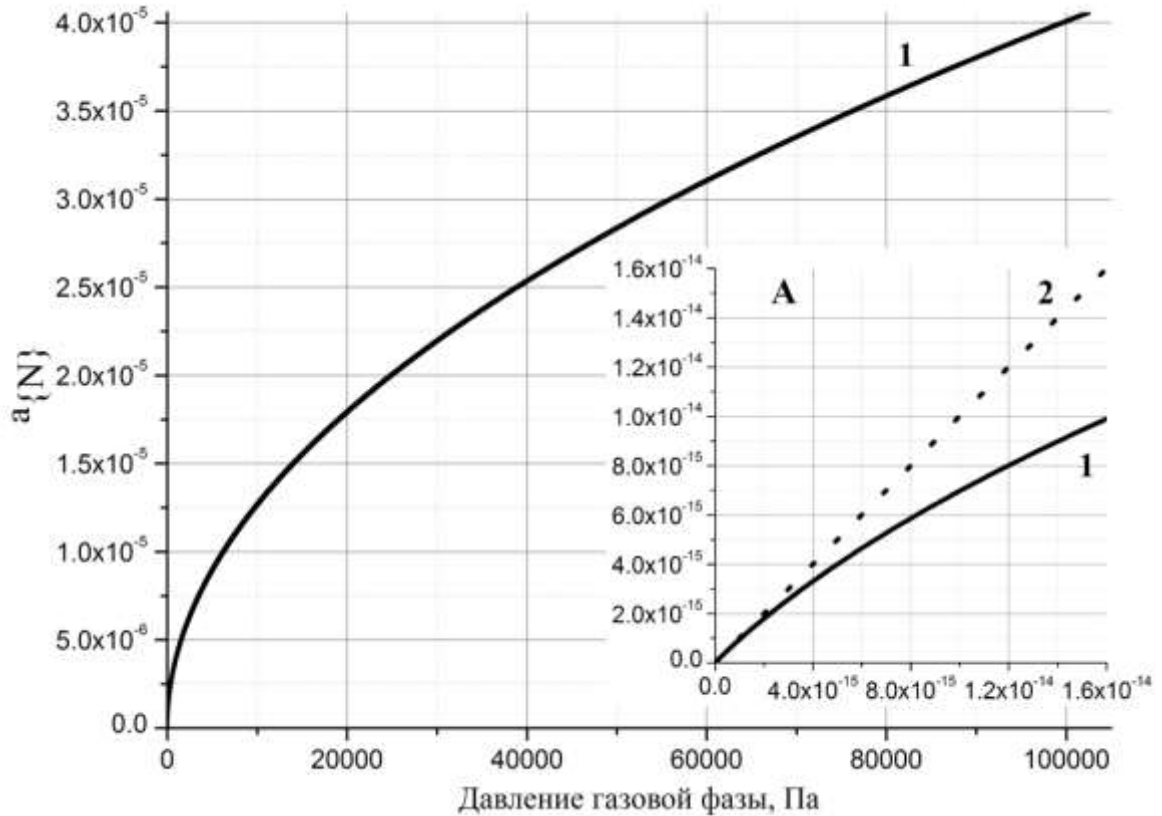


Рисунок 3.47. Зависимость активности азота в чистом газообразном азоте от общего давления при температуре 1873К:

1 – кривая расчётной зависимости; 2 – прямая, отображающая характеристику идеального газа; А – укрупнённый участок вблизи начала координат.

При увеличении давления в системе наблюдаются отрицательные отклонения от закона Рауля, связанные, в основном, с образованием молекул двухатомного азота.

3.4.2. Гомогенная газовая система азот - аргон

В качестве исходных величин в расчете равновесного состава газовой фазы в программном комплексе "Терра" задались температура и давление в системе, набор исходных компонентов и их массы и набор веществ, могущих существовать в системе при заданных температуре и давлении. Результатом расчёта является состав равновесной газовой смеси в виде парциальных давлений всех заданных

веществ. При задании веществ, существующих в равновесной системе в первых расчётах, задавали полный список, отвечающий справочнику [466]. Для системы азот – аргон список веществ включал все формы существования азота – N , N_2 , N_3 , N^+ , N^{+2} , N_2^+ , все формы существования аргона – Ar , Ar^+ и свободные электроны – e^{-1} . Анализ полученных результатов показал, что равновесные парциальные давления ионов и свободных электронов более чем на десять порядков ниже парциального давления любой молекулярной формы веществ. Поэтому в дальнейших расчётах состав равновесной газовой смеси рассчитывался без учёта образования ионов и свободных электронов. В этом случае для системы азот – аргон общее давление газовой фазы P_{sum} рассматривалось как сумма парциальных давлений четырёх компонентов:

$$P_{sum} = P_N + P_{N_2} + P_{N_3} + P_{Ar} . \quad (3.71)$$

Концентрация азота как конечного компонента в газовой фазе определялась выражением:

$$x_{\{N\}} = \frac{N_{\{N\}}}{\sum_{j=1}^k N_{\{j\}}} = \frac{P_N + 2P_{N_2} + 3P_{N_3}}{P_N + 2P_{N_2} + 3P_{N_3} + P_{Ar}} . \quad (3.72)$$

Активность азота определялась по выражению (3.52) при $P_N^{st} = 1 \text{ Па}$.

По аналогичной схеме были проанализированы активности азота в двойных системах водород – азот, кислород – азот и двух частных случаев тройной системы углерод – кислород – азот, соответствующим двойным системам азот – CO и азот – CO₂. В программе "Терра" рассчитывались равновесные парциальные давления всех молекулярных соединений и атомарных газов, которые затем использовались в приведённой выше методике оценки активности азота. Результаты расчёта показаны на рис. 3.48.

Как видно из результатов расчёта при одинаковой концентрации азота в равновесной газовой смеси наивысшей активностью азот обладает в тройной системе углерод – кислород – азот, в которой концентрация кислорода превышает концентрацию углерода.

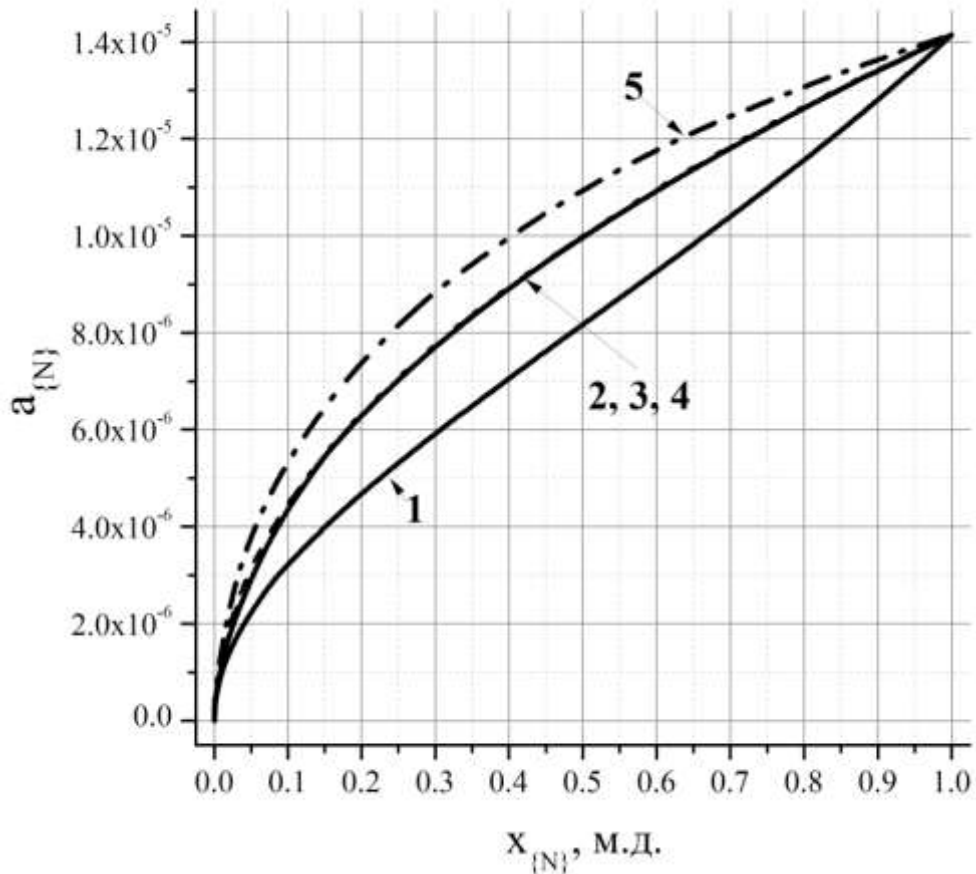


Рисунок 3.48. Зависимость активности азота в чистом газообразном азоте от концентрации азота в различных системах при $T=1879\text{K}$ и $P_{sum}=101325\text{ Па}$:

- 1 – активность азота в системе азот – аргон,
 2, 3, 4 – активность азота в системах водород – азот, кислород – азот и системе азот – оксид углерода (II),
 5 – активность азота в системе азот – оксид углерода (IV).

Наименьшей активностью азот обладает в газовой смеси с благородными газами. Малейшие примеси как восстановительного (водород, CO) так и окислительного (кислород) компонента в газовой смеси приводит к росту активности азота.

Повышение активности азота при взаимодействии газовых систем с металлом с появлением и увеличением концентрации кислорода в газе подтверждается экспериментами, например, [394].

На практике это может приводить к замедлению процесса деазотации металла при продувке его инертным газом, содержащем примеси кислорода. Или к росту концентрации кислорода в жидком металле, находящемся в равновесии с газовой системой азот – CO_2 , по сравнению с металлом, находящемся в равновесии с системой азот – инертный газ, при одинаковых концентрациях азота в газе.

3.4.3. Распределение азота между газовой фазой и металлическим расплавом на основе железа

Под коэффициентом распределения азота между газовой фазой и металлом L_N будем понимать отношение концентраций азота в газе $x_{\{N\}}$ к концентрации азота в металле $x_{[N]}$:

$$L_N = x_{\{N\}} / x_{[N]} . \quad (3.73)$$

Для исследования величин коэффициента распределения азота между газовой фазой и жидким железом при взаимодействии последнего с различными газовыми смесями использовали опубликованные экспериментальные данные [280, 472, 473, 474]. Среди многочисленных работ по изучению растворимости азота в жидком железе отбирали такие, в которых для исследований использовали газовые смеси при постоянном общем давлении в установке. Как правило, во всех рассмотренных работах результаты экспериментов приводили в виде зависимостей содержания азота в железе [%N] от корня квадратного парциального давления молекулярного азота $\sqrt{P_{N_2}}$. Поэтому для анализа этих данных проводили по следующему алгоритму:

- 1) определение парциальных давлений компонентов исходной газовой смеси, используемой для экспериментов;
- 2) определение масс исходных компонентов газовой смеси;
- 3) расчёт равновесного состава газовой фазы в условиях описанного в источнике эксперимента;
- 4) определение концентрации азота в газовой фазе в атомных долях.

Массу газовых компонентов исходной газовой смеси m_i определяли из выражения закона Менделеева-Клапейрона, допуская, что компоненты газовых смесей при металлургических температурах ведут себя как идеальные газы:

$$m_i = P_i \cdot M_i \cdot V / RT = P_i \cdot M_i \cdot a \quad , \quad (3.74)$$

где P_i - парциальное давление компонента, МПа; M_i - молекулярная масса компонента газовой смеси, кг/кмоль; $a=V/RT$ – условная постоянная, имеющая одно значение для одной серии опытов (параметр условий эксперимента).

Массы исходных газовых компонентов, массу конденсированного железа, температуру эксперимента и давление в системе вводили в качестве исходных данных в программу "Терра" для определения парциальных давлений компонентов равновесной газовой смеси в условиях эксперимента. Затем, по формулам (3.51) и (3.52) определяли концентрацию конечных компонентов равновесной газовой смеси в атомных долях и активность конечного компонента. Расчёт заканчивали определением коэффициента распределения азота по уравнению (3.73).

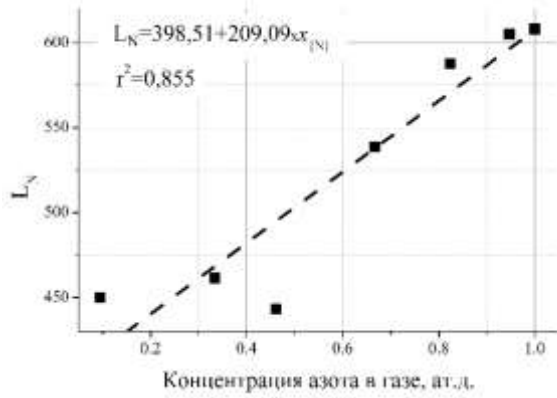
На рис.3.49, 3.50 представлено влияние концентрации азота в газовой фазе и его активности на коэффициент распределения азота при использовании газовых смесей азот – инертный газ (рис.3.49) и аммиак-инертный газ (рис. 3.50).

Учитывая зависимость коэффициента распределения от активности азота, его концентрации в газовой фазе и температуры, провели множественный регрессионный анализ влияния указанных параметров на величину L_N . В результате получены две регрессионные зависимости коэффициента распределения азота между газовой фазой и жидким железом:

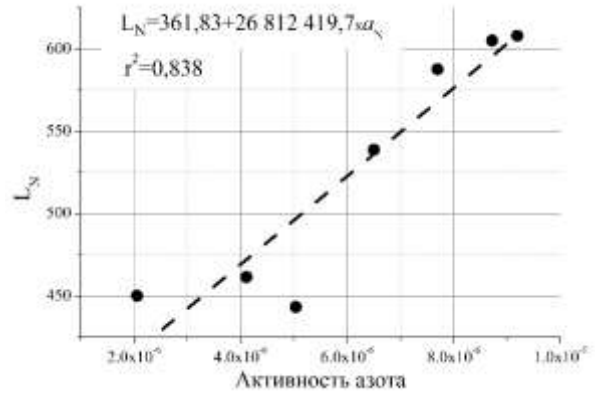
– при использовании газовых смесей азот – инертный газ (гелий или аргон) при атмосферном давлении, в температурном интервале 1853÷2273К и любом соотношении исходных компонентов газовой смеси:

$$L_N = 296 \cdot x_{\{N\}} + 2236 \cdot a_N + 1161717/T - 282 \quad , \quad (3.75)$$

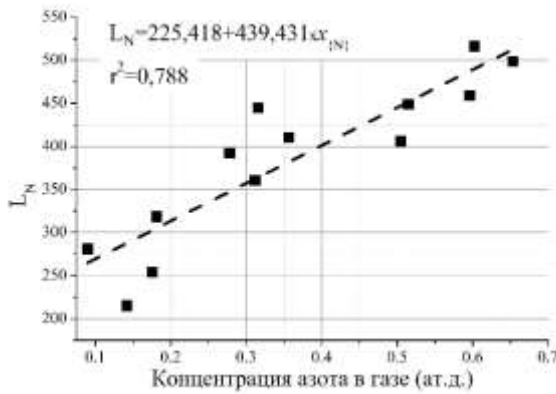
коэффициент детерминации регрессионной зависимости $r^2=0,829$;



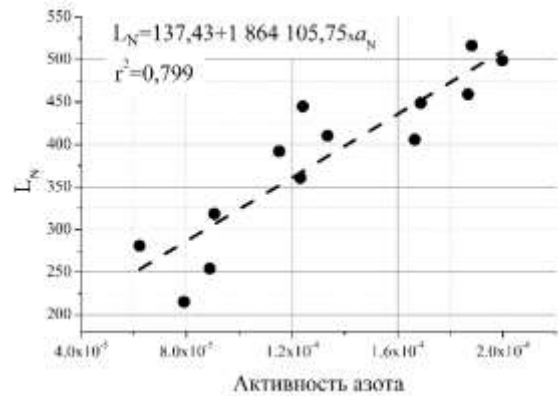
а



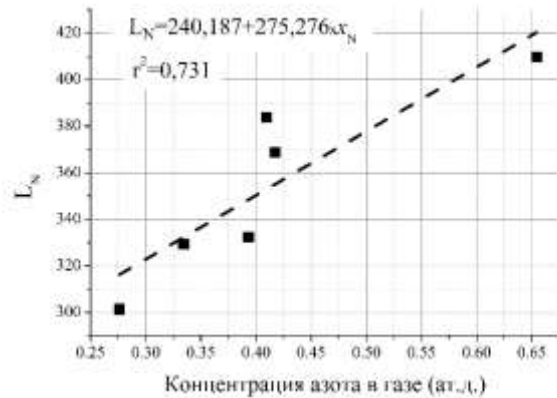
б



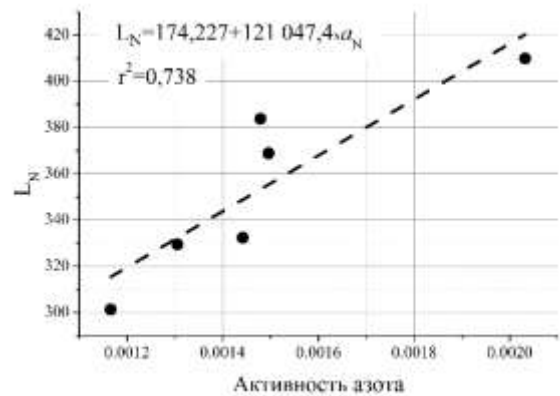
в



г



д



е

Рисунок 3.49. Влияние концентрации азота и его активности в газовой фазе на величину коэффициента распределения азота между газовой фазой и жидким

железом при использовании газовых смесей азот – инертный газ:

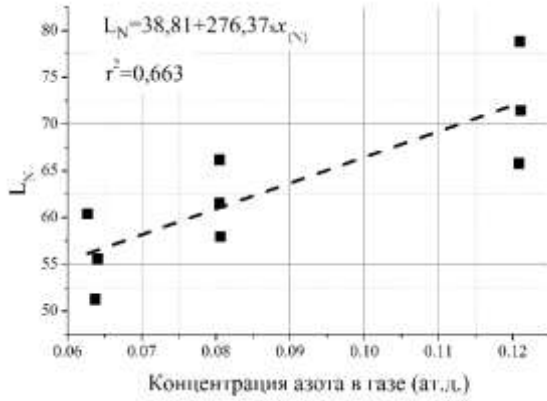
а, в, д – влияние концентрации азота в газовой смеси;

б, г, е – влияние активности азота;

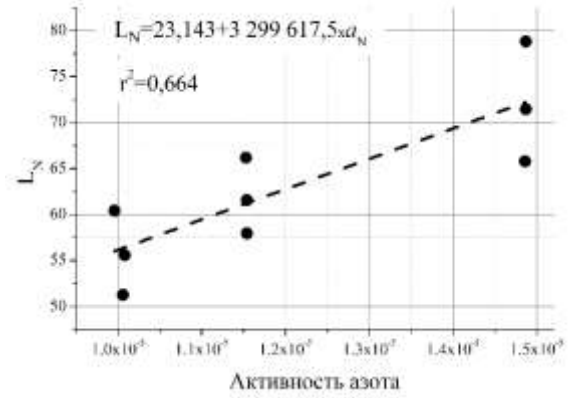
а, б – 1853К, по данным экспериментов [472];

в, г – 2083К, по данным экспериментов [280];

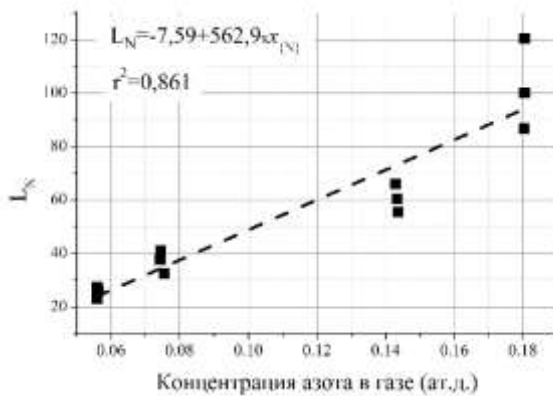
д, е – 2273К, по данным экспериментов [280].



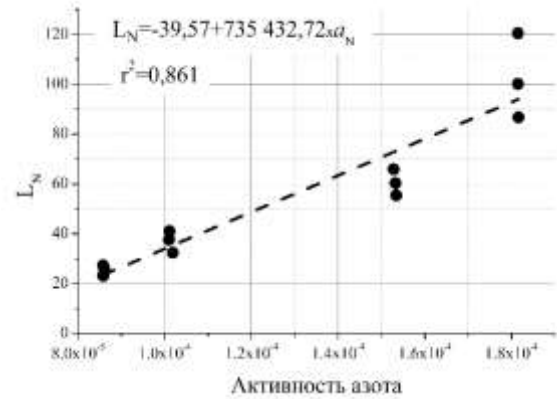
а



б



в



г

Рисунок 3.50. Влияние концентрации азота и его активности в газовой фазе на величину коэффициента распределения азота между газовой фазой и жидким железом при использовании газовых смесей аммиак – инертный газ (по экспериментальным данным [474]):

а, в – влияние концентрации азота в газовой смеси;

б, г – влияние активности азота;

а, б – 1963К;

в, г – 2123К.

– при использовании газовых смесей аммиак – инертный газ (гелий или аргон) при атмосферном давлении, в температурном интервале 1963÷2123К и содержании аммиака в исходной газовой смеси до 40% об.:

$$L_N = 242 \cdot x_{\{N\}} + 419781 \cdot a_N + 1631212/T - 794, \quad (3.76)$$

коэффициент детерминации регрессионной зависимости $r^2=0,845$.

Из сравнения полученных уравнений (3.75) и (3.76) видно, что при одинаковых значениях параметров (концентрация, активность, температура) при использовании газовых смесей с аммиаком коэффициент распределения азота получается гораздо ниже, чем при использовании газовых смесей азот – инертный газ. Это подтверждает теоретические расчёты с результатом о повышенной активности азота при переходе от смесей с азотом к смесям с аммиаком, полученный выше.

Таким образом, значение коэффициента распределения азота между газовой фазой и расплавленным железом зависит от давления в системе, температуры и состава газовой фазы. В равновесных условиях в системе азот – инертный газ – железо коэффициент распределения азота описывается уравнением (3.75). В системе аммиак – инертный газ – железо коэффициент распределения азота может быть оценён по уравнению (3.76). Анализ экспериментальных данных подтверждает вывод теоретического расчёта об увеличении активности азота в газовых смесях с азот – водород – инертный газ (система аммиак – инертный газ частный случай этой системы) по сравнению с газовыми смесями азот – инертный газ. Результаты анализа опубликованы в работе [453].

3.5. Разработка термодинамической модели описания свойств металлических растворов, учитывающей валентные электроны как компонент фазы

Состояние термодинамической системы без учёта внешних полей и поверхностных явлений полностью определяется заданием $k+2$ переменных. Например, значениями энтропии, объёма и k масс образующих систему компонентов (или числа их молей) и в состоянии равновесия эта функция состояния равна нулю:

$$U = f(S, V, n_1, n_2, \dots, n_k) = 0 . \quad (3.77)$$

Запишем выражение для полного дифференциала внутренней энергии сложной системы:

$$dU = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, n_{1..k}} dS + \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, n_{1..k}} dV + \sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{S, V, n_{j \neq i}} dn_i \quad (3.78)$$

Частные производные в выражении (3.78), определяют как температуру, давление и химические потенциалы компонентов системы:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, n_{1..k}} = T; \quad \left(\frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, n_{1..k}} = -P; \quad \left(\frac{\partial U}{\partial n_i} \right)_{S, V, n_{j \neq i}} = \mu_i. \quad (3.79)$$

Таким образом, выражение (3.78) принимает вид

$$dU = TdS - PdV + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i \quad (3.80)$$

или в интегральном виде на основании теоремы Эйлера об интегрировании однородных функций и того, что все переменные в выражении (3.80) являются экстенсивными величинами, пропорциональными количеству вещества:

$$U = ST - PV + \sum_{i=1}^k \mu_i n_i \quad (3.81)$$

При повторном дифференцировании выражения для внутренней энергии системы (выражение (3.81)) получим

$$dU = SdT - Vdp + \sum_{i=1}^k n_i d\mu_i + TdS - pdV + \sum_{i=1}^k \mu_i dn_i. \quad (3.82)$$

Сравнивая выражение (3.82) и выражение (3.80) получим известное выражение Гиббса-Дюгема:

$$SdT - Vdp + \sum_{i=1}^k n_i d\mu_i = 0 \quad (3.83)$$

Многие свойства растворов (теплоёмкость, электропроводность и др.) определяются так называемыми свободными электронами. Электрон можно рассматривать как частицу вещества, поскольку он имеет массу покоя. Поэтому состояние совокупности валентных электронов фазы предлагается учитывать в термодинамических функциях фазы. Подсистему валентных электронов можно рассматривать как дополнительный компонент фазы [458]. Тогда, к сумме произведений химических потенциалов компонентов и их количеств молей в выражении (3.81) должно быть добавлено ещё одно произведение $\mu_e n_e$:

$$U = ST - pV + \sum_{i=1}^k \mu_i n_i + \mu_e n_e , \quad (3.84)$$

где μ_e - химический потенциал подсистемы валентных электронов фазы; n_e - масса валентных электронов фазы, моль.

Однако, число валентных электронов N_e нельзя считать независимым параметром, поскольку оно при постоянных температуре и объёме системы может изменяться, поэтому его следует определить как функцию других переменных:

$$n_e = f(n_1, n_2, \dots, n_k) \quad (3.85)$$

где n_1, n_2, \dots, n_k – количества молей компонентов фазы.

Если рассматриваемую систему (конденсированную фазу) представить в двух состояниях:

- 1) разделённые друг от друга группы атомов по их видам и
- 2) соединённые в одну фазу,

то при переходе системы из состояния 1) в состояние 2) общее число электронов остаётся неизменным, а выделяемая при этом энергия является следствием их перехода на более низкий энергетический уровень. При гетерополярной (ионной) связи происходит переход валентных электронов с орбиталей атомов – доноров на более низкие (не занятые) уровни атомов – акцепторов. При гомеополярной ковалентной связи одиночные внешние (валентные) электроны образуют так называемые "электронные пары", приводящие к понижению общей энергии фазы. Т.е. n_e – это полное число электронов, участвующих в образовании химических связей.

Таким образом, можно утверждать, что для закрытой системы всегда выполняется условие

$$dn_e = 0 . \quad (3.86)$$

Выражение производной количества электронов можно записать в виде

$$dn_e = \left(\frac{\partial n_e}{\partial n_1} \right) dn_1 + \left(\frac{\partial n_e}{\partial n_2} \right) dn_2 + \dots + \left(\frac{\partial n_e}{\partial n_k} \right) dn_k , \quad (3.87)$$

где частные производные $(\partial n_e / \partial n_i) = v_i$ являются термодинамическими валентностями компонентов раствора V_i .

Тогда, комбинируя выражения (3.86) и (3.87) получим:

$$dn_e = \sum_{i=1}^k v_i dn_i = 0 . \quad (3.88)$$

Или в интегральном виде:

$$n_e = \sum_{i=1}^k v_i n_i = 0 \quad (3.89)$$

Последнее выражение (3.89) принято называть условием электронейтральности фазы.

В отличие от используемой в химии целочисленной валентности (степени окисления) термодинамическая валентность может быть нецелочисленной и, тем самым, может учитывать отклонения состава реальных фаз от стехиометрического.

Величину химического потенциала электронов μ_e также как и число молей свободных электронов n_e нельзя считать независимым параметром, поскольку она может изменяться в зависимости от состава фазы, с учётом того, что химический потенциал по определению величина парциальная, т.е. относящаяся к одному молю вещества, аналогично выражению (3.85) запишем:

$$\mu_e = f(x_1, x_2, \dots, x_k) , \quad (3.90)$$

$$d\mu_e = \frac{\partial \mu_e}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial \mu_e}{\partial x_2} dx_2 + \dots + \frac{\partial \mu_e}{\partial x_k} dx_k . \quad (3.91)$$

Производную $\frac{\partial \mu_e}{\partial x_i}$ определим как μ_{e_i} - химический потенциал электронов компонента i . Физический смысл частной производной $\partial \mu_e / \partial x_i$ - это изменение положения химического потенциала электрона в энергетическом спектре фазы при добавлении одного моля компонента i . Тогда

$$\mu_e = \sum_{j=1}^k \mu_{e_j} x_j \quad (3.92)$$

Из уравнения (3.84) получим выражение для химического потенциала компонента i :

$$\mu'_i = \frac{\partial U}{\partial n_i} = \frac{\partial \left(\sum_{i=1}^k \mu_i n_e \right)}{\partial n_i} + \frac{\partial (\mu_e n_e)}{\partial n_i} = \mu_i + \frac{\partial \mu_e}{\partial n_i} n_e + \frac{\partial n_e}{\partial n_i} \mu_e \quad (3.93)$$

С учётом (3.89) выражение (3.93) примет вид

$$\mu'_i = \mu_i + \frac{\partial n_e}{\partial n_i} \mu_e \quad (3.94)$$

или

$$\mu'_i = \mu_i + v_i \left(\sum_{j=1}^k \mu_{e_j} x_j \right). \quad (3.95)$$

Учитывая, что химический потенциал компонента конденсированной фазы при образовании раствора имеет вид [21]:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln x_i + RT \ln \gamma_i \quad (3.96)$$

тогда, с учётом (3.95) можно записать следующее выражение химического потенциала:

$$\mu'_i = \mu_i^0 + RT \ln x_i + RT \ln \gamma_i + v_i \left(\sum_{j=1}^k \mu_{e_j} x_j \right) \quad (3.97)$$

Последнее слагаемое в выражении (3.97) объединили с коэффициентом активности компонента γ_i , чтобы получить выражение для изменённого коэффициента активности i в виде:

$$\gamma'_i = \gamma_i \cdot \exp \left(v_i \left(\sum_{j=1}^k \mu_{e_j} x_j \right) / RT \right). \quad (3.98)$$

Для дальнейшего вывода выражений термодинамических функций компонентов раствора и самого раствора воспользуемся представлениями статистической физики.

Основные положения предлагаемой модели металлического раствора:

- компонентами раствора являются химические элементы периодической таблицы элементов Д.И. Менделеева;

- на распределение частиц в растворе влияет межчастичное взаимодействие, которое предлагается учитывать в виде распределения Гиббса;
- на поведение компонента раствора оказывает действие электронная подсистема валентных электронов компонентов раствора (электронная подсистема «свободных» электронов фазы).

Для каждого компонента раствора, находящегося в равновесии, можно записать его долю в конфигурационной составляющей потенциальной энергии раствора e_i :

$$e_i = N_i \cdot \exp(\xi_i/k_B T) \quad (3.99)$$

где N_i – количество частиц сорта i ; ξ_i – энергия взаимодействия между частицами сорта i , Дж/частица; k_B – постоянная Больцмана; T – температура.

Выражение для конфигурационной составляющей потенциальной энергии раствора E_C будет иметь вид суммы:

$$E_C = \sum_{j=1}^K e_j = \sum_{j=1}^K (N_j \cdot \exp(\xi_j/k_B T)) , \quad (3.100)$$

где j - сорт частиц раствора, изменяется от 1 до K ; ξ_j – энергия взаимодействия между частицами сорта j , Дж/частица.

Вероятность нахождения частицы сорта i в растворе W_i можно найти как частное доли конфигурационной составляющей потенциальной энергии раствора ко всей конфигурационной составляющей энергии раствора:

$$W_i = \frac{e_i}{E_C} = \frac{N_i \cdot \exp(\xi_i/k_B T)}{\sum_{j=1}^K (N_j \cdot \exp(\xi_j/k_B T))} \quad (3.101)$$

Разделим числитель и знаменатель выражения (3.101) на общее количество частиц раствора N , а затем разделим и числитель и знаменатель на выражение $\exp(\xi_i/k_B T)$:

$$W_i = \frac{\frac{N_i}{N} \cdot \exp(\xi_i/k_B T)}{\sum_{j=1}^{\kappa} \left(\frac{N_j}{N} \cdot \exp(\xi_j/k_B T) \right)} = \frac{x_i \cdot \exp(\xi_i/k_B T)}{\sum_{j=1}^{\kappa} (x_j \cdot \exp(\xi_j/k_B T))} =$$

$$= x_i \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{\kappa} (x_j \cdot \exp((\xi_j - \xi_i)/k_B T))} = x_i \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{\kappa} (x_j \cdot \exp(\xi_{ji}/k_B T))}, \quad (3.102)$$

где $\xi_{ji} = \xi_j - \xi_i$ - разница энергий взаимодействия между частицами сорта i и частицами сорта j , Дж/частица.

При переходе от учёта частичного взаимодействия к учёту энергии взаимодействия молей частиц, выражение (3.102) примет вид:

$$W_i = x_i \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{\kappa} (x_j \cdot \exp(\varepsilon_{ji}/RT))} \quad (3.103)$$

где ε_{ji} - разница мольных энергий взаимодействия между частицами сорта i и частицами сорта j , Дж/моль.

Если разница мольных энергий взаимодействия между частицами сорта i и частицами сорта j равна нулю, т.е. частицы разных сортов взаимодействуют друг с другом так же, как и частицы одного сорта, то вероятность нахождения частиц равна их концентрации:

$$W_i|_{\varepsilon_{ji}=0} = x_i \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{\kappa} (x_j \cdot \exp(\varepsilon_{ji}/RT))} = x_i \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{\kappa} (x_j \cdot \exp(0/RT))} = x_i \cdot \frac{1}{\sum_{j=1}^{\kappa} x_j} = x_i \quad (3.104)$$

Таким образом, в общем виде вероятность состояния частиц определённого сорта в растворе есть ничто иное, как концентрация в случае идеальных растворов или активность во всех остальных случаях:

$$W_i = a_i = x_i \cdot \gamma_i \quad (3.105)$$

где γ_i - коэффициент активности компонента i , который определяется выражением

$$\gamma_i = 1 / \sum_{j=1}^{\kappa} (x_j \cdot \exp(\varepsilon_{ji}/RT)) \quad (3.106)$$

С учётом полученной выше поправки к коэффициенту активности (3.98) можно записать итоговое уравнение коэффициента активности компонента раствора:

$$\gamma'_i = 1 / \sum_{j=1}^{\kappa} \left(x_j \cdot \exp \left(\left(\varepsilon_{ji} - v_i \left(\sum_{t=1}^{\kappa} \mu_{e_t} x_t \right) \right) / RT \right) \right). \quad (3.107)$$

Проверка применимости выражения (3.107) к описанию свойств металлических растворов на выполнимость краевых условий.

1. Идеальный раствор - $\varepsilon_{ji} = 0$, $v_i \left(\sum_{t=1}^{\kappa} \mu_{e_t} x_t \right) = 0$, коэффициент активности равен единице во всём диапазоне концентраций $\gamma_i = 1$ и активность равна концентрации компонента.
2. Бесконечно разбавленный раствор компонента i , $x_i \rightarrow 0$, коэффициент активности компонента стремится к постоянному значению.
3. Приближение к абсолютно чистому компоненту i , $x_i \rightarrow 1$, коэффициент активности компонента стремится к единице $\gamma_i = 1$.

При приближении фазы по составу к чистому компоненту $x_i \rightarrow 1$ значение коэффициента активности этого компонента должно быть равно единице. Это возможно при выполнении равенства

$$\varepsilon_{ii} = v_i \mu_{e_i}. \quad (3.108)$$

Проверку применимости выражения (3.107) к описанию различных отклонений значений активности компонентов от законов идеальных растворов в двухкомпонентной системе провели с использованием прикладного математического пакета Mathcad. Результаты расчетов при произвольных параметрах модели (валентность компонента, химический потенциал "свободных электронов" компонента) представлены на рис.3.51. Как видно из него модель может описывать как положительные, так и отрицательные отклонения от закона Рауля.

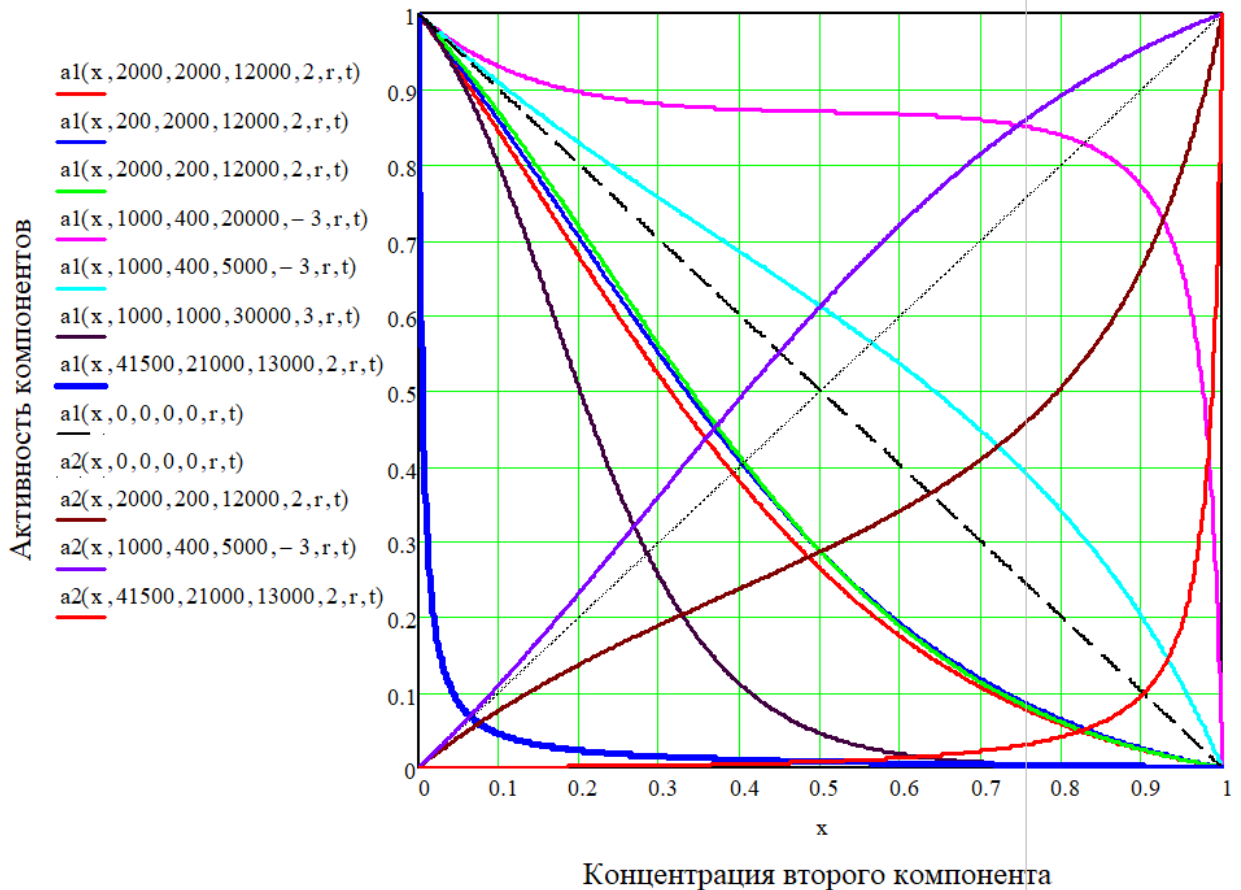


Рисунок 3.51. Результаты расчета активности двухкомпонентной металлической системы по предлагаемой модели в программе Mathcad

3.5.1. Применимость модели описания свойств металлических растворов, учитывающей валентные электроны как компонент фазы, для описания гетерогенных равновесных систем металл – газ

3.5.1.1. Система железо-кислород

Предложенная выше модель равновесной системы металл-газ использует одно стандартное состояние для компонентов газа и металла. В этом случае третье условие термодинамического равновесия, помимо термического и барического равновесия, можно записать в виде равенства активностей компонентов в разных фазах [465]:

$$a_{\{i\}} = a_{[i]} . \quad (3.109)$$

С учётом того, что в принятой модели активность компонента газовой фазы определяется уравнением (3.52) равновесное состояние в системе железо – кислород описывается выражением

$$a_o = P_o / P_o^{st} = x_{[O]} / \left(x_{[O]} + x_{Fe} \cdot \exp \left(\left(\varepsilon_{Fe-O} - v_o \left(\mu_{e_{Fe}} x_{Fe} + \mu_{e_O} x_{[O]} \right) \right) / RT \right) \right). \quad (3.110)$$

Для проверки предлагаемой модели описания равновесного состояния в системе газ-металл представим анализ экспериментальных данных работ [81, 203, 204, 206, 209, 211, 213, 217, 218], который проведен выше (см. раздел 3.1), в виде графика зависимости активности кислорода от температуры и содержания его в железе (рис.3.52).

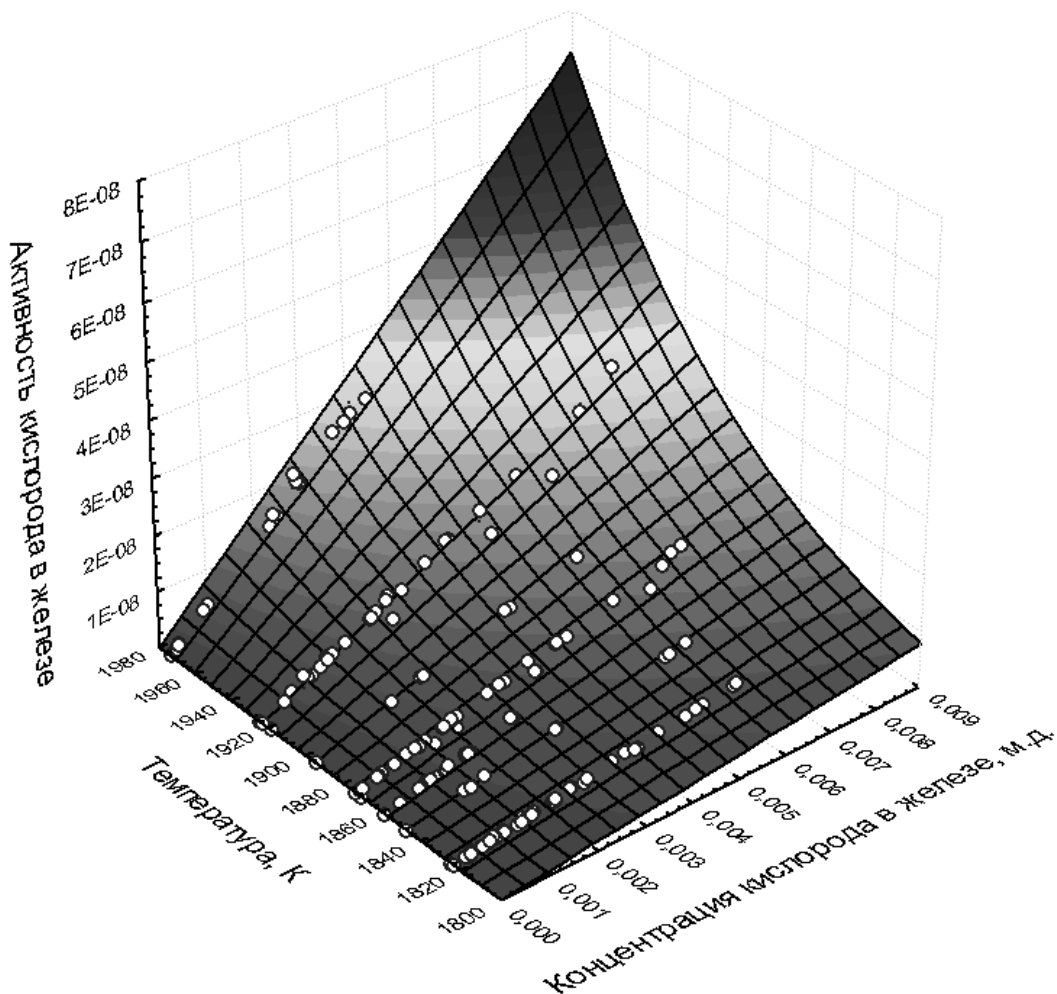


Рисунок 3.52. Зависимость активности кислорода в железе от концентрации кислорода и температуры:

точки – экспериментальные значения по результатам работ [81, 203, 204, 206, 209, 211, 213, 217, 218]; поверхность – визуализация зависимости (3.111)

На этом же рисунке построена поверхность расчётных величин активности кислорода, описываемая выражением, которое вытекает из уравнения (3.17):

$$a_{[O]} = x_{[O]} \cdot \exp(10,77 - 44535/T) \quad (3.111)$$

По экспериментальным данным работ [81, 203, 204, 206, 209, 211, 213, 217, 218] с помощью уравнения (3.110) определили параметры предлагаемой термодинамической модели для раствора кислорода в жидком железе (первый компонент металла – железо, второй – кислород). Поскольку количество неизвестных параметров модели (валентности компонентов, энергетические уровни взаимодействия валентных электронов, энергия обмена кислорода и железа) превышает число уравнений связи, численные значения параметров находили методом подбора с использованием стандартных процедур пакета электронных таблиц Excel, задаваясь исходными значениями валентности компонентов. При заданных значениях валентности железа $v_{Fe} = +3$ и кислорода $v_O = -2$ численные значения остальных параметров модели следующие: $\mu_{e_{Fe}} = 42\,632$, $\mu_{e_O} = 202\,320$ (Дж/моль).

По найденным параметрам была построена поверхность в координатах $(a_{[O]}, x_{[O]}, T)$ и проведена оценка соответствия модели и экспериментальных данных (рис.3.53).

Несмотря на визуально определяемые значительные расхождения расчётных значений активности по предлагаемой модели и экспериментальных данных на границах исследуемого температурного интервала 1813-1823К и 1923-1973К множественный коэффициент корреляции составляет $r=0,96$. Это позволяет утверждать, что предложенная модель адекватно описывает бинарные жидкие растворы железо-кислород.

3.5.1.2. Система железо-азот

Проверку предлагаемой модели описания равновесного состояния в системе азот – расплав железа провели с использованием экспериментальных данных Пелке и Эллиота [320].

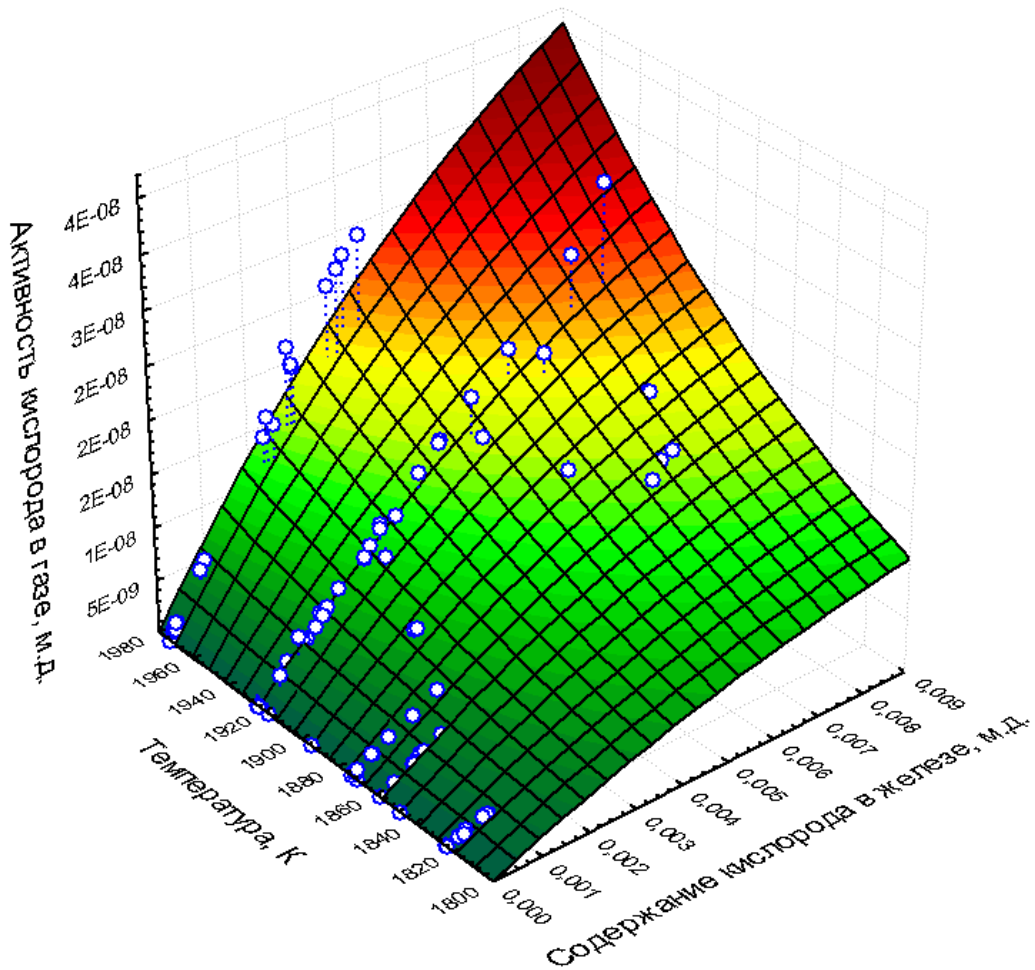


Рисунок 3.53. Аппроксимация экспериментальных данных для растворов кислорода в жидком железе по предложенной термодинамической модели: точки – экспериментальные значения по результатам работ [81, 203, 204, 206, 209, 211, 213, 217, 218]

На рис. 3.54 изображены результаты расчета концентрации азота в жидком железе при температуре 1879К при парциальном давлении моноатомного азота, соответствующему параметрам эксперимента, и данными самого эксперимента.

Поскольку количество неизвестных параметров модели (валентность азота, энергетические уровни взаимодействия валентных электронов азота и железа, энергия обмена азота и железа) как и в случае моделирования раствора кислорода в железе превышает число уравнений связи, численные значения параметров находили методом подбора с использованием стандартных процедур пакета электронных таблиц Excel, задаваясь исходными значениями валентности компонентов.

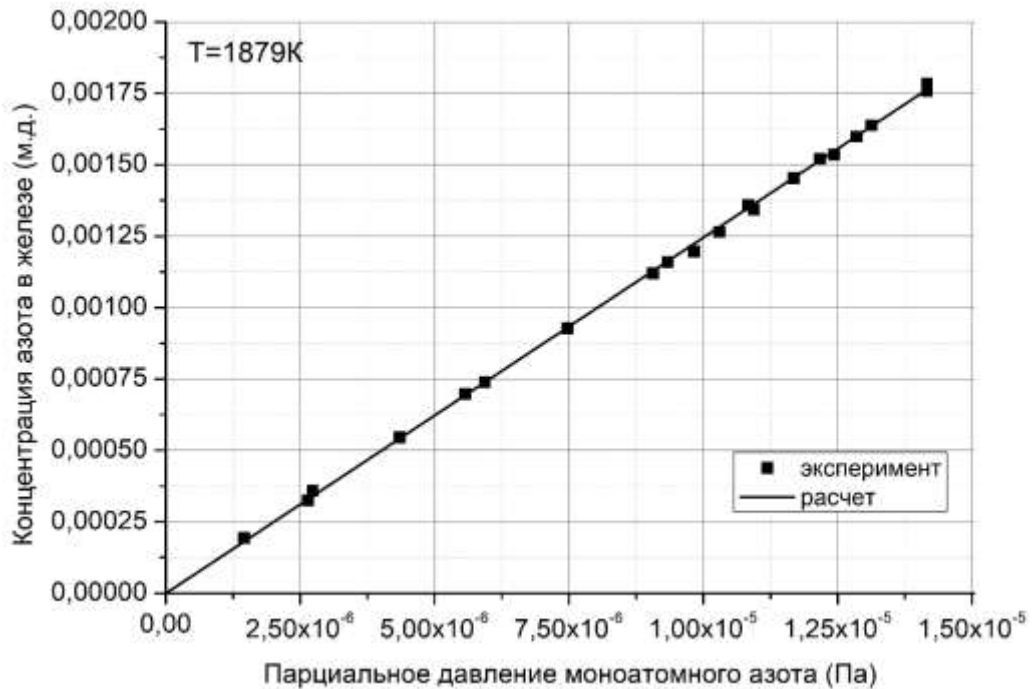


Рисунок 3.54. Сравнение расчета растворимости азота в жидком железе по предложенной модели и экспериментальных данных работы [320]

При заданных значениях валентности азота $v_N = -3$ и энергия обмена азота и железа, вычисленной по методике А.Г. Пономаренко [21, 458] и равной 38303 Дж/моль, численные значения остальных параметров модели следующие: $\mu_{e_{Fe}} = 12\,384$ Дж/моль, $\mu_{e_N} = 17$ Дж/моль.

Исходя из полученных результатов моделирования можно отметить, что предложенная модель адекватно описывает растворы системы железо – азот.

3.5.1.3. Система железо-хром-азот

Проверка предлагаемой модели описания равновесного состояния в системе азот – расплавы системы железо - хром провели с использованием экспериментальных данных работ [279, 320, 331]. На рис. 3.55 изображены результаты расчета концентрации азота в жидких сплавах Fe-Cr при температуре 1873 К при парциальном давлении моноатомного азота, соответствующему одной атмосфере давления газообразного азота.

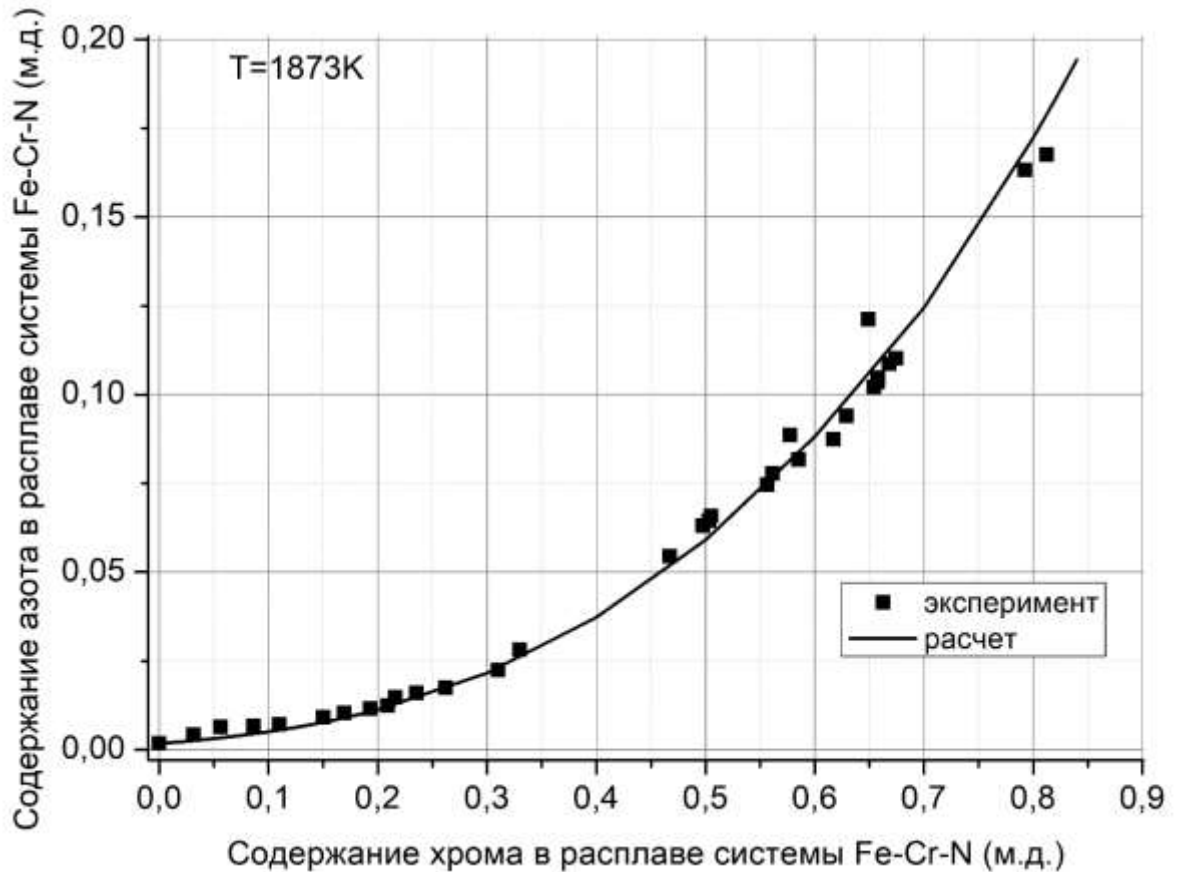


Рисунок 3.55. Сравнение расчета растворимости азота в жидких сплавах Fe-Cr по предложенной модели и экспериментальных данных работ [279, 320, 331]

Численные значения параметров находили методом подбора с использованием стандартных процедур пакета электронных таблиц Excel, задаваясь исходным значением валентности азота $v_N = -3$.

Расчётная кривая, хорошо описывающая точки экспериментальных данных работ [279, 320, 331], получена по предложенной модели с использованием следующих числовых значений параметров модели: $\varepsilon_{Fe-N} = 41385$ Дж/моль, $\varepsilon_{Cr-N} = 23275$ Дж/моль, $\mu_{e_{Fe}} = 83939$ Дж/моль, $\mu_{e_{Cr}} = 127123$ Дж/моль, $\mu_{e_N} = 36050$ Дж/моль.

Таким образом, предлагаемая модель хорошо описывает равновесие в системах металл – газ с единых позиций в выборе компонента фазы.

3.6. Термодинамическое описание изменения содержания азота в металле в плавильных процессах

Как уже было отмечено в разделе 1.1 (табл. 1.1), в настоящее время для многих групп марок сталей и сплавов на никелевой основе жёстко оговаривается требование по содержанию азота.

Обычный уровень концентрации азота на разных стадиях выплавки в различных агрегатах показан в табл.1.2 и 1.3. Каждая последующая технологическая операция от выпуска, внепечной обработки (кроме вакуумирования) и до разливки, при которой жидкий металл может контактировать с воздухом, лишь увеличивает содержание азота, обычно на 20–40 ppm [17]. Предельно достигаемый уровень деазотации при внепечной обработке сталей массового сортамента составляет 20–34 ppm [197], а при исходной концентрации в 13–38 ppm содержания азота в процессе обработки может даже повышаться [198].

В работе [133], основанной, на обширном фактическом материале показано, что при производстве низколегированных марок сталей уровень содержания азота ниже 25 ppm вообще недостижим современными способами внепечной дегазации. Причину этой недостижимости указал ещё Геллер [475] с помощью простого термодинамического расчёта. Приняв, что содержание азота в жидком металле [%N] следует закону Сивертса (1.28) и учитывая, что суммарное давление в пузырьке газа при продувке металла и в камере над сталеразливочным ковшом в агрегатах внепечной обработки P_{sum} складывается из давления газа – носителя P_g (аргон, CO, пары металла и пр.) и давления азота P_{N_2} :

$$P_{sum} = P_g + P_{N_2} . \quad (3.112)$$

Исключение давления азота совместным решением уравнений (1.28) и (3.112) даёт зависимость содержания азота в металле от общего давления, а закон Дальтона:

$$P_i/P_{sum} = V_i/V_{sum} , \quad (3.113)$$

где P_i – парциальное давление компонента i газовой смеси, V_i – парциальный объём компонента i газовой смеси, V_{sum} – объём газовой смеси, позволяет найти связь между расходом несущего газа и уровнем содержания азота после возможной дегазации [%N]:

$$V_g = \frac{22,4 \cdot ([\%N]_r - [\%N]) \cdot m}{100 \cdot M_{N_2}} \cdot \left(\frac{P_{sum}}{([\%N]/K_N)^2} - 1 \right), \quad (3.114)$$

где 22,4 – объём одного киломоля газа, м³, M_{N_2} – масса одного киломоля азота, кг, [%N] – максимальное содержание азота в металле, % масс., m – масса металла, кг.

Зная производительность вакуумных насосов или допустимую интенсивность продувки инертным газом в тех или иных конкретных производственных условиях, можно рассчитать предельные возможности процесса при «идеальной» его организации – когда пузырьки успевают полностью насыщаться азотом, отсутствуют источники его поступления в агрегат и др. Примеры подобных расчётов можно найти в работе [19].

На рис.3.56 (кривая 1) показан термодинамический предел "пузырьковой" деазотации, полученный таким расчётом, в сопоставлении с кривыми (2) усреднённых данных поведения азота при продувке в кислородном конвертере и (3) аппроксимации результатов экспериментов в индукционной печи [354].

Из рис.3.56 видно, что глубокая деазотация путём непосредственного перехода азота в газовую фазу теоретически возможна, однако, требует нереально больших расходов газа и времени обработки. В действительности дегазация прекращается значительно раньше (кривые 2, 3) и определяется такими факторами, как герметичность вакуумной аппаратуры, уровень азота в продувочном кислороде и др. Поэтому способы дегазации, основанные на непосредственном удалении азота из металла в газовую фазу, в реальных условиях не могут обеспечить устойчивого его с содержанием 25 ppm и менее; содержание азота в конвертерном металле определяется его уровнем в продувочном кислороде.

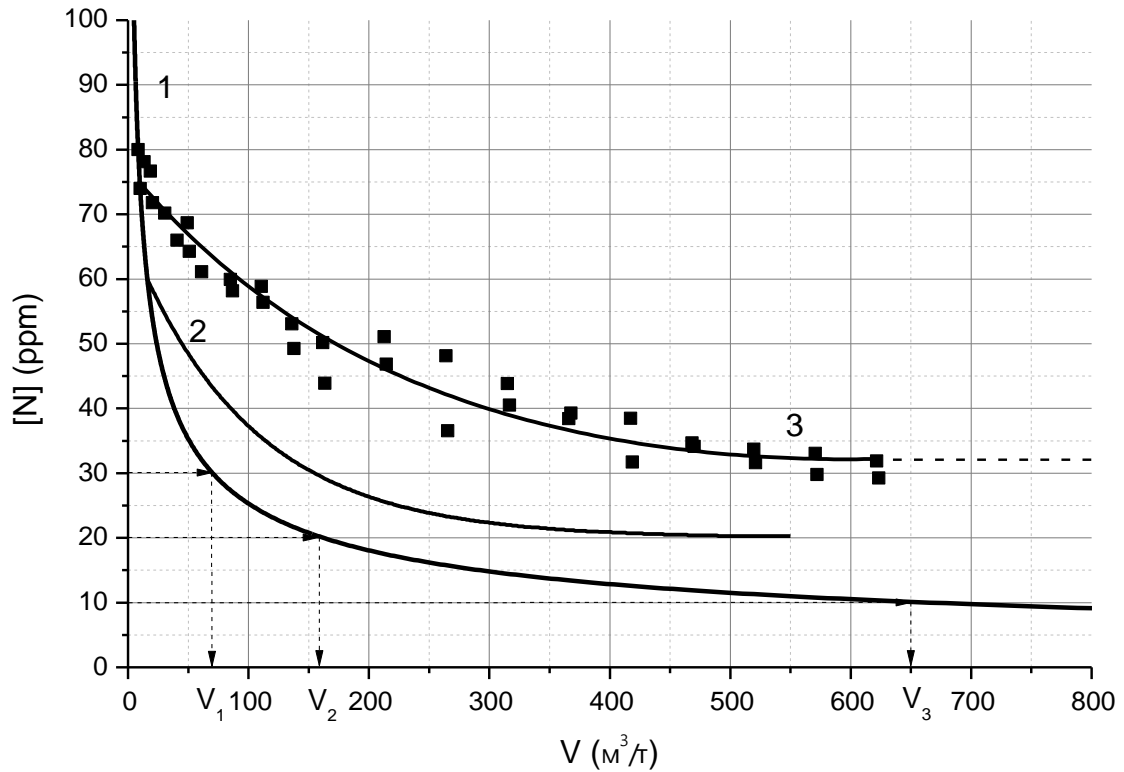


Рисунок 3.56. Зависимость содержания азота в металле от удельного объёма продувочного газа:

1 – термодинамический предел; 2, 3 – фактически достигаемый уровень в кислородном конвертере и при пузырьковой продувке металла в индукционной печи, соответственно; ■- результаты экспериментов в индукционной печи [354].

Вместе с тем известно, что при всех видах выплавки стали содержание азота в металле всегда существенно ниже равновесного с атмосферой сталеплавильного агрегата и при выдержке под слоем шлака непрерывно снижается. Уровень 10–15 ppm является обычным для мартеновской плавки на жидкой завалке (процесс Тальбота) или для кислого мартеновского процесса, т.е. для процессов с максимальным временем пребывания жидкого металла в печном агрегате под слоем жидкого шлака.

При выдержке чугуна в миксере в течение 60 часов зафиксировано снижение концентрации азота с 45–52 ppm до 20–37 ppm [476]. Удлинение пребывания жидкого металла под шлаком в дуговой печи при использовании в шихте

продуктов прямого восстановления железа приводит к снижению уровня содержания азота в полупродукте до 7–12 ppm.

Ввод шлакообразующих в камеру циркуляционного вакууматора резко ускоряет процесс деазотации и обеспечивает конечное его содержания в стали на уровне 11–14 ppm всего за 13 мин обработки [477].

Таким образом, при рассмотрении вопросов деазотации в сталеплавильных процессах необходимо учитывать влияние шлака.

Массоперенос азота из металла в газовую фазу через шлак происходит без увеличения среднего содержания азота в шлаке. То есть процесс является стационарным. Для стационарного состояния фазы выполняется уравнение Гиббса-Дюгема:

$$SdT - VdP + \sum_{i=1}^{\kappa} n_i d\mu_i = 0 . \quad (3.115)$$

При выдержке расплава на основе железа в кислородсодержащей атмосфере в металл всегда направлен поток кислорода. При этом концентрация азота в шлаке, покрывающем металл, остаётся на одном уровне для широкого диапазона составов сталеплавильных шлаков.

Таким образом, при выдержке расплава на основе железа под слоем шлака в кислородсодержащей атмосфере в изобарно-изотермических условиях через шлак осуществляется массоперенос двух компонентов – кислорода и азота. В этом случае уравнение (3.115) для азота и кислорода как компонентов шлака примет вид:

$$n_{(O)} d\mu_{(O)} + n_{(N)} d\mu_{(N)} = 0 . \quad (3.116)$$

Разделим уравнение (3.116) на сумму молей компонентов шлака $\sum_{i=1}^{\kappa} n_i$ и на изменение координаты dl вдоль направления L , перпендикулярного границам раздела газовая фаза – шлак и шлак – металл:

$$x_{(O)} \cdot d\mu_{(O)} / dl + x_{(N)} \cdot d\mu_{(N)} / dl = 0 . \quad (3.117)$$

Движущей силой массопереноса является градиент химического потенциала [478]. Поток компонента i вдоль выбранной координаты записали в виде:

$$J_i \equiv k_i \frac{d\mu_i}{dl}, \quad (3.118)$$

где k_i – коэффициент пропорциональности компонента i , μ_i – химический потенциал i в точке вычисления потока.

Сравнивая слагаемые левой части уравнения (3.117) с выражением потока (3.118), получаем:

$$-J_{(o)}/B_{(o)} - J_{(n)}/B_{(n)} = 0 \quad (3.119)$$

Учитывая, что все сталеплавильные процессы характеризуются наличием потока кислорода, направленного в металл, и уравнение (3.119), получили, что в стационарных условиях в системе металл – шлак – газ потоки кислорода и азота направлены в противоположную сторону и интенсивность потока азота через шлак в металл напрямую зависит от интенсивности потока кислорода.

Учитывая, общее выражение для химического потенциала компонента i согласно модели шлака, как фазы с коллективизированной электронной системой [21],

$$\mu_{(i)} = \mu_{(i)}^0 + RT \cdot \ln a_{(i)} = \mu_{(i)}^0 + RT \cdot \ln x_{(i)} + RT \cdot \ln \psi_{(i)} + \mu_e \nu_{(i)}, \quad (3.120)$$

где $\psi_{(i)}$ – атомная составляющая коэффициента активности компонента i ; $\mu_e \nu_{(i)}$ – электронная составляющая коэффициента активности компонента i , μ_e – химический потенциал электронов электронной подсистемы шлаковой фазы, $\nu_{(i)}$ – термодинамическая валентность компонента i , получили уравнение потока компонента i , в шлаке:

$$J_{(i)} \equiv -k_{(i)} \frac{d\mu_{(i)}}{dl} = -D_{(i)} \frac{dx_{(i)}}{dl} - D_{(i)} x_{(i)} \frac{d(\ln \psi_{(i)})}{dl} - \frac{D_{(i)} x_{(i)}}{RT} \cdot \frac{d(\mu_e \nu_{(i)})}{dl}. \quad (3.121)$$

При рассмотрении активности примесных элементов (в нашем случае азот) и основного компонента шлака (кислород) атомные коэффициенты активности являются постоянными для каждого вида шлака (известковый, магнезиальный и

т.п.). Поэтому, в первом приближении второе слагаемое уравнения (3.121) можно приравнять нулю. Градиент электронной составляющей коэффициента активности компонента i записали в виде

$$\frac{d(\mu_e \nu_{(i)})}{dl} = \nu_{(i)} \frac{d\mu_e}{dl} \quad (3.122)$$

поскольку для большинства элементов валентность в шлаке является постоянной. Величину μ_e для оксидных шлаков выразили через парциальное давление кислорода [21, 458]

$$\mu_e = \mu_e^0 + RT \cdot \ln P_{O_2}^{-1/4} = \mu_e^0 + RT \cdot \ln P_O^{-1/2} . \quad (3.123)$$

Тогда, выражение потока для компонента i в шлаковой фазе (3.121) примет вид

$$\begin{aligned} J_{(i)} &= -D_{(i)} \frac{dx_{(i)}}{dl} - D_{(i)} x_{(i)} \frac{d(\ln P_{O_2}^{-v_i/4})}{dl} = \\ &= -D_{(i)} \frac{dx_{(i)}}{dl} - D_{(i)} x_{(i)} \frac{d(\ln P_O^{-v_i/2})}{dl} \end{aligned} \quad (3.124)$$

Как показано Пономаренко А.Г. [479, С.222], в отсутствии градиента окисленности шлака (например, выдержка шлака в атмосфере с постоянным значением парциального давления кислорода) уравнение переходит в закон Фика $J_{(i)} = -D_{(i)} \cdot dx_{(i)} / dl$.

С учётом того, что растворимость азота в шлаке при постоянном уровне окисленности шлака подчиняется закону Сивертса и термодинамическая валентность азота, растворённого в сталеплавильных шлаках, в широком диапазоне активности кислорода (или значений парциального его давления в атмосфере) равна -3, выражение (3.124) записали в виде

$$\begin{aligned} J_{(N)} &= -K_{(N)} D_{(N)} \frac{d(\sqrt{P_{N_2}})}{dl} - K_{(N)} D_{(N)} \sqrt{P_{N_2}} \frac{d(\ln(P_{O_2})^{-3/4})}{dl} = \\ &= -K_{(N)} D_{(N)} \frac{d(P_N)}{dl} - K_{(N)} D_{(N)} \sqrt{P_{N_2}} \frac{d(\ln(P_O)^{-3/2})}{dl} \end{aligned} \quad (3.125)$$

Переход от дифференциальной формы записи к конечным разностям с одновременной заменой отношения $D_{(N)}/dl$ величиной коэффициента массопереноса азота в шлаке $\beta_{(N)}$, привёл выражение (3.125) к следующему виду:

$$J_{(N)} = -K_{(N)}\beta_{(N)}\left(\sqrt{P_{N_2}^e} - \sqrt{P_{N_2}^s}\right) - K_{(N)}\beta_{(N)}\sqrt{P_{N_2}^s}\left(\ln\left(P_{O_2}^e\right)^{\frac{-3}{4}} - \ln\left(P_{O_2}^s\right)^{\frac{-3}{4}}\right) = \\ = -K'_{(N)}\beta_{(N)}\left(P_N^e - P_N^s\right) - K'_{(N)}\beta_{(N)}P_N^s\left(\ln\left(P_O^e\right)^{-3/2} - \ln\left(P_O^s\right)^{-3/2}\right) \quad (3.126)$$

где s, e - индексы, обозначающие начальное и конечное значение величины.

Поскольку численные значения коэффициента массопереноса и константы равновесия реакции растворения азота в шлаке зависят от многих факторов, то для определения степени влияния градиента концентраций и градиента окисленности шлака на величину потока азота определили отношение этих составляющих при следующих начальных условиях:

- температура системы 1873К;
- давление в системе 101325 Па = 1 атм.;
- значение парциальных давлений газа на границе газ-шлак:
 - азота $P_{N_2}^{(s)}=0,79$ атм.;
 - кислорода $P_{O_2}^{(s)}=0,21$ атм.;
- значение парциальных давлений газа на границе шлак-металл:
 - азота $P_{N_2}^{(e)} = \left(\frac{\%N}{K_{(N)}}\right)^2 = (10^{-5}/0,0043)^2 = 5,4 \cdot 10^{-6}$ атм.;
 - кислорода $P_{O_2}^{(e)} = 10^{-9}$ атм.

Тогда, подставляя числовые значения, получили:

$$\frac{\left(\sqrt{P_{N_2}^{(e)}} - \sqrt{P_{N_2}^{(s)}}\right)}{\sqrt{P_{N_2}^{(s)}} \cdot \left(\ln\left(P_{O_2}^{(e)}\right)^{\frac{-3}{4}} - \ln\left(P_{O_2}^{(s)}\right)^{\frac{-3}{4}}\right)} = 6,94 \cdot 10^{-2} \quad (3.127)$$

Таким образом, градиент окисленности шлака обуславливает поток азота через шлак из металла в газовую фазу, который по интенсивности превышает более

чем в четырнадцать раз поток азота, вызываемый градиентом концентраций азота в условиях постоянной окисленности.

Такой анализ показывает причину того, что в металле, находящимся под слоем шлака в кислородсодержащей среде с течением времени содержание азота будет снижаться. Процесс этот обусловлен наличием градиента окисленности в шлаке и будет продолжаться до момента ликвидации такого градиента, либо до момента смены знака градиента окисленности. При таком изменении азот из газовой фазы начнёт поступать в металл.

Рассмотрение структуры уравнения (3.126) позволяет определить основные условия благоприятствующие процессу деазотации:

- 1) наличие шлака на поверхности жидкого металла для обеспечения градиента окисленности как движущей силы процесса деазотации;
- 2) высокое значение коэффициента массопереноса – обеспечивается наличием жидкоподвижного шлака и дополнительными мерами, усиливающими перемешивание шлака (например, продувка инертным газом под уровень шлака, добавка вспенивающих реагентов и т.п.);
- 3) поддержание высокого значения градиента окисленности шлака - обеспечивается обдувом поверхности шлака кислородом и глубоким раскислением металла;
- 4) поддержание низкого значения разницы равновесных парциальных давлений азота в системе.

Часть третьего условия, касающаяся раскисления, в современных сталеплавильных технологиях реализуется только во внепечной обработке. Четвёртое условие реализуется при вакуумировании.

3.6.1. Оценка соотношения составляющих потока азота при использовании фторидных и металлофторидных шлаков

В электрошлаковых процессах в основном применяют фторидно-оксидные и фторидные шлаки, в экспериментальных установках – металл-галогенидные шлаки

[480, 481, 482, 483, 484, 485]. Для фторидной системы или фторидно-оксидной, с преобладанием фторидной части, по аналогии с закономерностью, установленной для оксидных фаз [418, 419, 420] с большой долей вероятности, можно предположить, что активность компонента в шлаке зависит не только от его концентрации, но и от парциального давления фтора над шлаковым расплавом

$$(I) = k' \cdot P_i \cdot P_{F_2}^{v_i/4} = k'' \cdot P_i \cdot P_F^{v_i/2} . \quad (3.128)$$

Для азота выражение (3.128) принимает вид

$$(\% N) = k_N \cdot P_{N_2}^{1/2} \cdot P_{F_2}^{-3/4} = k'_N \cdot P_N \cdot P_F^{-3/2} \quad (3.129)$$

В работе [447] автором определено, что поток азота, обусловленный эффектом "накачки" фторидных шлаков, совпадает по направлению с потоком азота из печной атмосферы изначально состоящей из азота.

Для условий, характерных в случае применения шлаков системы $\text{CaF}_2\text{-Ca}$, определённых в работе [447]: температура системы 1873К; давление в системе 101325 Па = 1 атм.; парциальное давление двухатомного азота на границе газ-шлак 101325Па=1атм.; парциальное давление двухатомного фтора на границе газ – шлак $1,1 \cdot 10^{-17}$ Па= $1,09 \cdot 10^{-22}$ атм.; парциальное давление двухатомного азота на границе раздела металл – шлак $5,4 \cdot 10^{-6}$ атм.; парциальное давление двухатомного фтора на границе раздела металл – шлак составляет $5,6 \cdot 10^{-11}$ Па = $5,53 \cdot 10^{-16}$ атм. (рис.3.57).

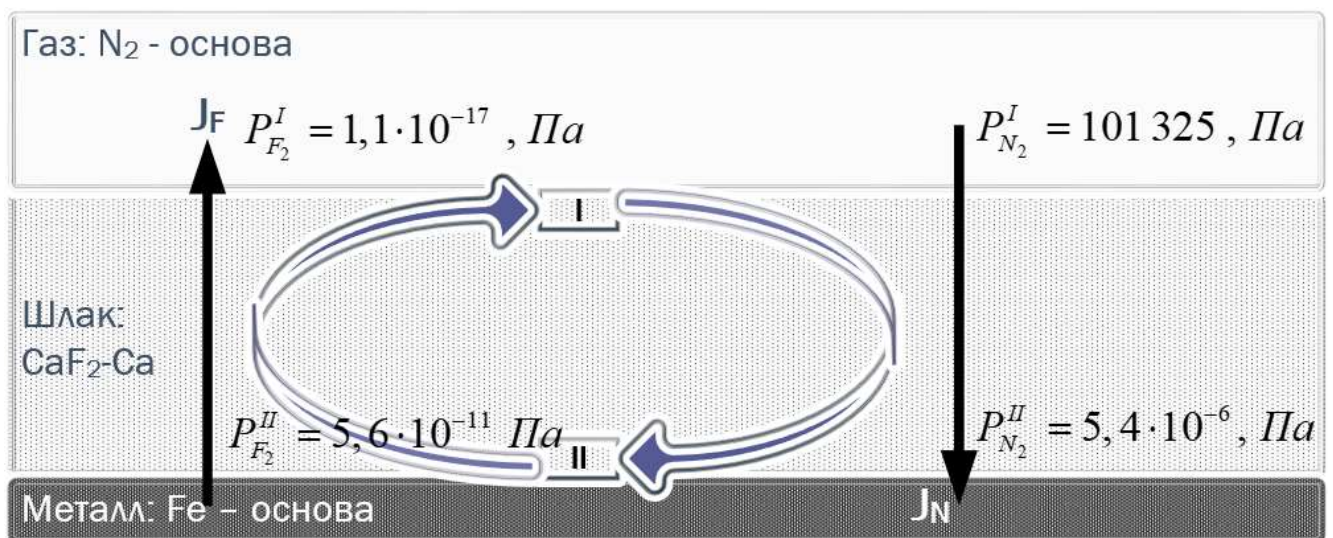


Рисунок 3.57. Схема реализации эффекта "накачки" азота в металл в условиях электрошлакового переплава с использованием шлаков системы $\text{CaF}_2\text{-Ca}$

Записав по аналогии с (3.126) уравнение потока азота в системе металл – шлак – газ при использовании активных шлаков системы $\text{CaF}_2\text{-Ca}$ в виде уравнения

$$J_{(N)} = -K_{(N)}\beta_{(N)}\left(\sqrt{P_{N_2}^e} - \sqrt{P_{N_2}^s}\right) - K_{(N)}\beta_{(N)}\sqrt{P_{N_2}^s}\left(\ln\left(P_{F_2}^e\right)^{\frac{-3}{4}} - \ln\left(P_{F_2}^s\right)^{\frac{-3}{4}}\right) = \\ = -K'_{(N)}\beta_{(N)}\left(P_N^e - P_N^s\right) - K'_{(N)}\beta_{(N)}P_N^s\left(\ln\left(P_F^e\right)^{-3/2} - \ln\left(P_F^s\right)^{-3/2}\right) \quad (3.130)$$

получили следующее соотношение частей потока азота

$$\frac{\left(\sqrt{P_{N_2}^{(e)}} - \sqrt{P_{N_2}^{(s)}}\right)}{\sqrt{P_{N_2}^{(s)}} \cdot \left(\ln\left(P_{F_2}^{(e)}\right)^{\frac{-3}{4}} - \ln\left(P_{F_2}^{(s)}\right)^{\frac{-3}{4}}\right)} = 8,61 \cdot 10^{-2}. \quad (3.131)$$

Таким образом, градиент "окисленности" фторидного шлака, который можно выразить через соответствующие значения парциального давления фтора на разных межфазовых границах, обуславливает поток азота через шлак из газовой фазы в металл, который по интенсивности превышает более чем в одиннадцать раз поток азота, вызываемый градиентом концентраций азота.

В случае применения для ЭШП чистого фторида кальция часть граничных условий для расчета соотношения частей потока определяли расчётом в программе "Терра" (парциальное давление фтора и азота на границе шлак – газ) и имеют следующие значения: температура системы 1873К; давление в системе 101325 Па = 1 атм.; парциальное давление двухатомного азота на границе газ-шлак 99880 Па=0,99 атм.; парциальное давление двухатомного фтора на границе газ – шлак $3,608 \cdot 10^{-11}$ Па= $3,56 \cdot 10^{-16}$ атм.; парциальное давление двухатомного азота на границе раздела металл – шлак $5,4 \cdot 10^{-6}$ атм. (см. работу [447]); парциальное давление двухатомного фтора на границе раздела металл – шлак составляет $5,6 \cdot 10^{-11}$ Па = $5,53 \cdot 10^{-16}$ атм.. (см. работу [447]). Результаты расчета равновесных парциальных давлений над поверхностью расплава фторида кальция в атмосфере азота при атмосферном давлении представлены в табл.3.13.

Схема потоков фтора и азота в системе железо – фторид шлака – атмосфера азота представлена на рис.3.58.

Таблица 3.13. Результат расчета равновесного парциального давления компонентов в системе фторид кальция – азот

| Цель эксперимента - определение парциального равновесного давления фтора над расплавом фторида кальция в системе CaF ₂ -N ₂ | | | | | | | |
|---|------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Исходный состав системы | | Равновесные парциальные давления, МПа | | | | | |
| Температура, К | 1873 | F | $1,971 \cdot 10^{-7}$ | NF | $9,073 \cdot 10^{-16}$ | Ca | $7,507 \cdot 10^{-12}$ |
| Давление, МПа | 0,1 | F₂ | $3,608 \cdot 10^{-17}$ | NF₂ | $1,060 \cdot 10^{-20}$ | Ca₂ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ |
| Масса CaF ₂ , кг | 7808 | N | $1,273 \cdot 10^{-11}$ | NF₃ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ | CaF | $1,970 \cdot 10^{-8}$ |
| Масса N ₂ , кг | 2801 | N₂ | 0,09988 | N₂F₂ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ | CaF₂ | $1,215 \cdot 10^{-4}$ |
| | | N₃ | $3,162 \cdot 10^{-17}$ | N₂F₄ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ | | |

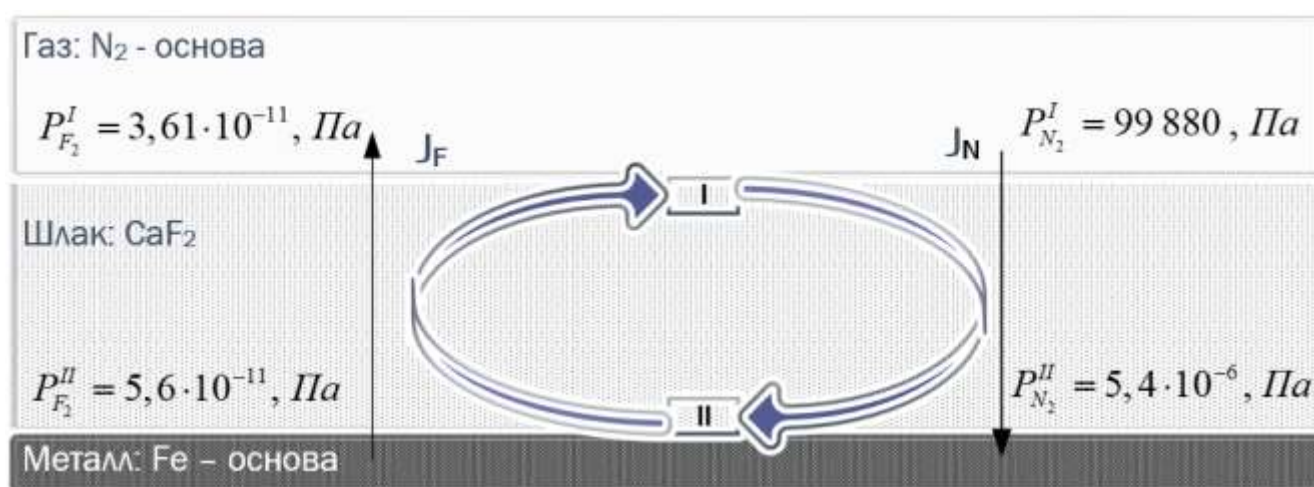


Рисунок 3.58. Схема потоков фтора и азота в условиях электрошлакового переплава с использованием шлака из чистого фторида кальция

Сравнивая расчетные величины парциальных давлений фтора на границах раздела "металл – шлак" и "шлак – газовая фаза" отметили, что эти значения имеют один порядок.

Учитывая допущения принятые в работе [447] при расчете парциального давления фтора можно прогнозировать, что градиент окисленности (парциальное давление фтора) по толщине шлакового слоя практически отсутствует. В реальных условиях существует только поток азота, направленный в металл, обусловленный различным парциальным давлением азота в атмосфере печи и равновесного с растворенным азотом в металле. Учитывая низкую растворимость азота в шлаках на основе фторида кальция [486] можно утверждать, что поток азота

обусловленный естественным градиентом концентрации азота имеет крайне низкую эффективность в азотировании металла.

Таким образом, переплав сталей под фторидными шлаками в атмосфере азота не приводит к возрастанию концентрации азота, растворённого в металле, а, наоборот, может привести к снижению содержания азота в следствие ассимиляции шлаком нитридных и/или карбонитридных неметаллических включений стали.

В случае организации переплава с использованием фторидного шлака (например, CaF_2) и раскислением поверхности раздела газ – шлак углеродом (эксперимент описан в работе [447]) картина потоков фтора и азота по сравнению со случаем ЭШП под фторидным шлаком практически не меняется (рис. 3.59).

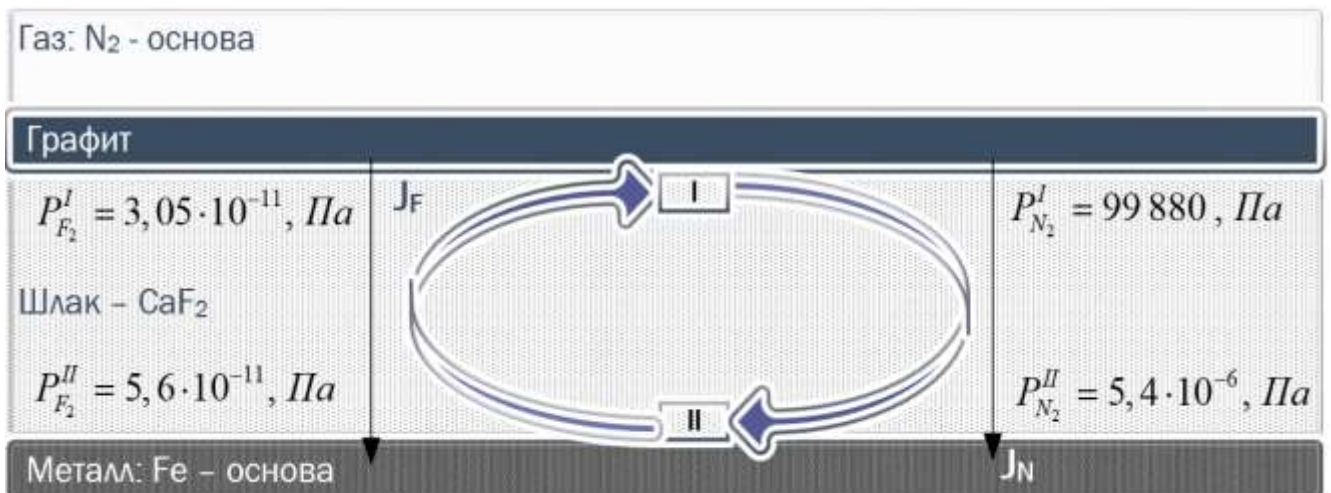


Рисунок 3.59. Схема потоков фтора и азота в условиях электрошлакового переплава с использованием шлака из чистого фторида кальция с углеродным покрытием поверхности шлак – газ

Исходные данные для граничных условий на границе шлак – газовая фаза приведены в табл. 3.14.

Зафиксированный рост содержания азота в работе [447] при переплаве под CaF_2 с использованием углеродного слоя на шлаке сопряжён, по всей видимости, с другими причинами.

Таблица 3.14 – Результат расчета равновесного парциального давления компонентов в системе фторид кальция – углерод – азот.

| Цель эксперимента – определение парциального равновесного давления фтора над расплавом фторида кальция в системе $\text{CaF}_2\text{-C-N}_2$ | | | | | | | |
|--|------|---------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Исходный состав системы | | Равновесные парциальные давления, МПа | | | | | |
| Температура, К | 1873 | F | $1,971 \cdot 10^{-7}$ | NF | $9,073 \cdot 10^{-16}$ | Ca | $7,507 \cdot 10^{-12}$ |
| Давление, МПа | 0,1 | F₂ | $3,608 \cdot 10^{-17}$ | NF₂ | $1,060 \cdot 10^{-20}$ | Ca₂ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ |
| Масса CaF_2 , кг | 7808 | N | $1,273 \cdot 10^{-11}$ | NF₃ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ | CaF | $1,970 \cdot 10^{-8}$ |
| Масса N_2 , кг | 2801 | N₂ | 0,09988 | N₂F₂ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ | CaF₂ | $1,215 \cdot 10^{-4}$ |
| | | N₃ | $3,162 \cdot 10^{-17}$ | N₂F₄ | $2,044 \cdot 10^{-24}$ | | |

Таковыми могут быть примеси материала ТРГМ, использованном в эксперименте, описанным в работе [447], наличие которых не учитывалось при расчете равновесного парциального давления двухатомного фтора в программе "Терра".

3.6.2. Граничные условия выплавки жаропрочных никелевых сплавов для обеспечения низкого содержанием азота

В большинстве случаев первичным плавильным агрегатом для жаропрочных и коррозионностойких сплавов на никелевой основе является вакуумная индукционная печь [5, 487, 488]. Условия выплавки в ВИП не позволяют использовать шлаки, поэтому рафинирование расплава от азота связано только с механизмом вакуум – кислородного обезуглероживания. Поскольку этот механизм работает только долю от общей длительности плавки [489, 490], то для снижения содержания газов в металле при выплавке в ВИП по данным Митчелла [491] были разработаны следующие основные способы:

- использование оборотного лома с низким содержание азота и кислорода;
- использование лигатур с низким содержанием азота и кислорода;
- организация вакуумно-индукционной выплавки при низком давлении (10^{-6} бар=0,1 Па);
- подбор технологических маршрутов получения слитка ВИП-ВДП, ВИП-ЭШП, ВИП-ЭШП-ВДП и т.д.;

– использование электронно-лучевого переплава заготовки, полученной в ВИП.

Для использования оборотного лома с низким содержанием азота и кислорода необходимо выполнение двух условий: производить первичный объём сплавов на никелевой основе с низким содержанием азота и кислорода, организовать соответствующую переработку оборотного лома.

Производство лигатуры с низким содержанием азота и кислорода, поскольку эти лигатуры в основе своей имеют никель, связано с теми же проблемами, что и производство сплавов на основе никеля.

Выбор технологических маршрутов, в том числе включающих и электронно-лучевой переплав, связано в первую очередь с удорожанием конечной продукции и снижением производительности.

Исходя из физико-химических основ процесса ВИП для теоретического обоснования совершенствования технологии производства никелевых сплавов из всех перечисленных Митчеллом способов можно использовать только снижение рабочего давления в вакуумной плавильной камере. Экспериментальное исследование влияния остаточного давления в плавильной камере ВИП на содержание азота и кислорода в жаропрочном никелевом сплаве Inconel 718 (рис.3.60, взят из работы [492]) показал довольно низкую эффективность такого способа снижения содержания азота в никелевых сплавах.

Основной причиной такой неэффективности снижения рабочего давления на процессы дегазации при вакуумной индукционной плавке, по нашему мнению, может быть натекание окружающей атмосферы в плавильную камеру. Кроме того, понижение рабочего давления в период рафинирования приведёт к повышенным потерям жидкого металла на испарение.

Для проверки влияния состава печной атмосферы на процесс дегазации при ВИП провели сравнение равновесного состава газа над расплавом никелевого сплава с содержанием азота 10 ppm, кислорода 5 ppm с составом печной атмосферы при известной величине предельного разрежения и заданной величине предельного натекания воздуха в плавильную камеру.

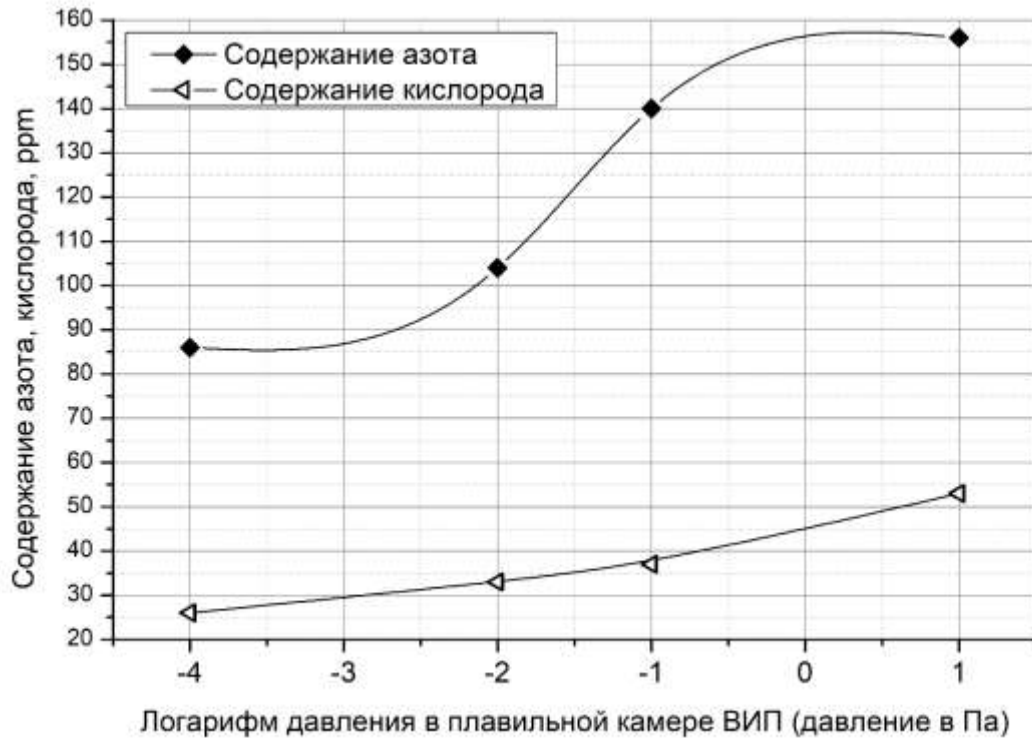


Рисунок 3.60. Влияние рабочего давления в плавильной камере ВИП на содержание азота и кислорода в жаропрочном никелевом сплаве Inconel 718 [492]

Исходные условия для расчета равновесного состава газовой фазы над расплавом в программе Thermo-Calc: температура 1773К, давление в системе 0,1÷2,5 Па, химический состав сплава приведен в табл.3.15.

Таблица 3.15. Химический состав сплава на основе никеля для проведения моделирования в программе Thermo-Calc

| Элемент | Содержание, % масс. | Элемент | Содержание, % масс. |
|---------|---------------------|----------|---------------------|
| Ni | 63,6625 | Cr | 23,4 |
| C | 0,005 | Mo | 12,52 |
| Si | 0,001 | Fe | 0,29 |
| W | 0,12 | Азот | 0,001 |
| | | Кислород | 0,0005 |

Результаты расчета равновесного фазового состава системы металл-газ в программе Thermo-Calc получили в виде рисунков (например, рис. 3.61) и электронных таблиц.

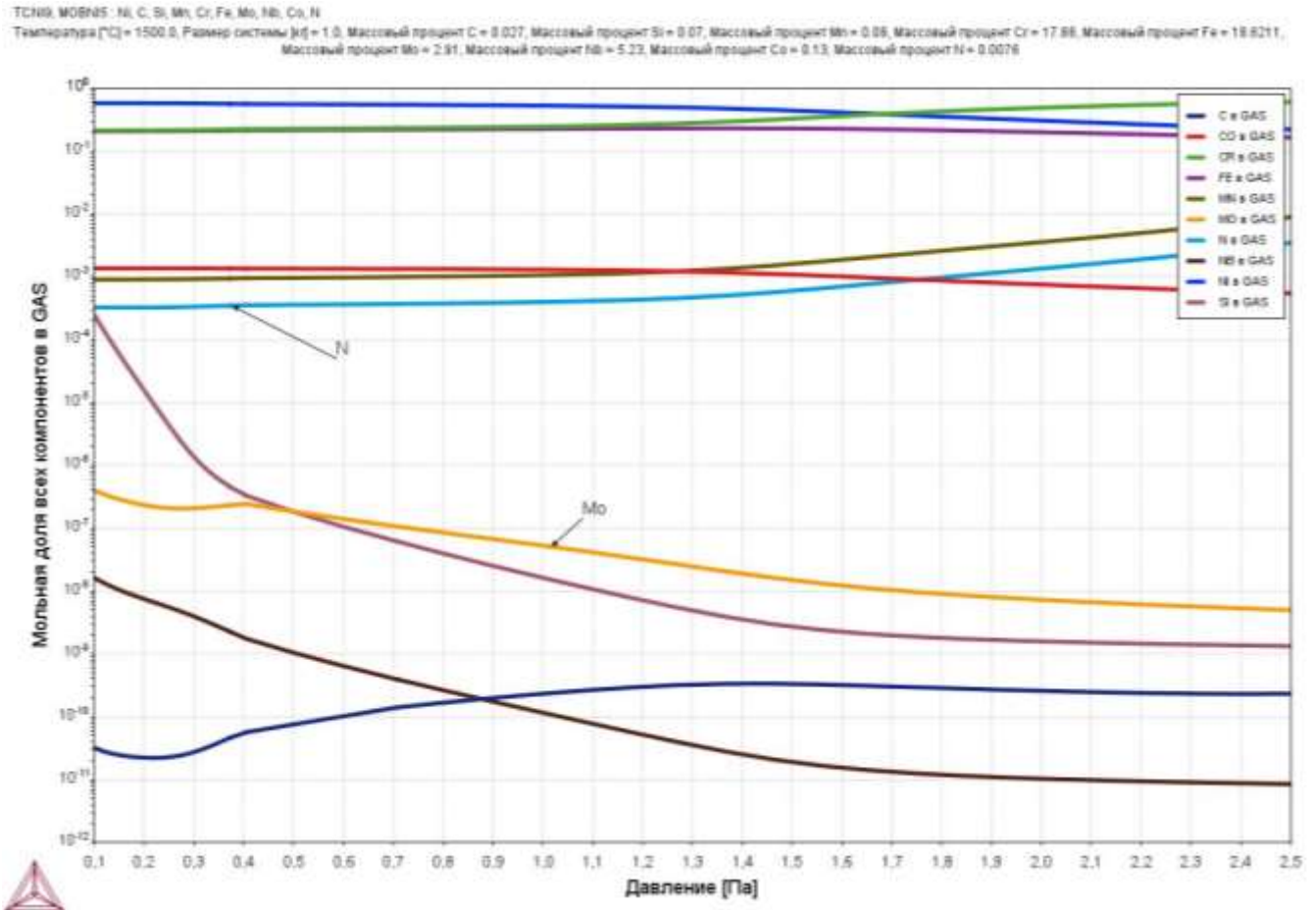


Рисунок 3.61. Результаты расчета в программе Thermo-Calc равновесного состава газовой фазы над никелевым сплавом при температуре 1773К

Как видно из результатов расчета, приведенных на рис.3.61, равновесное парциальное давление азота над расплавом никелевого сплава равен произведению мольной доли азота в газе на величину давления в системе.

Состав атмосферы в плавильной камере ВИП рассчитывали в программе "Terra" при следующих начальных условиях: температура 1773К, давление в системе – 0,1–2,5 Па, состав сухого воздуха, натекающего в плавильную камеру взят из работы [493], давление насыщенного водяного пара при 25°С $P_{H_2O}=3169,2$ Па, относительная влажность воздуха, натекающего в плавильную камеру, 80%, состав влажного воздуха, натекающего в плавильную камеру ВИП и принятого к расчёту, приведен в табл.3.16.

Таблица 3.16. Состав воздуха, используемый для расчета в программе "Terra"

| Компонент воздуха с влагой | Объёмная доля, % | Компонент воздуха с влагой | Объёмная доля, % |
|----------------------------|------------------|-----------------------------------|----------------------|
| Азот | 76,17245 | Ксенон | $8,49 \cdot 10^{-6}$ |
| Кислород | 20,43818 | Оксид азота N ₂ O | $3,02 \cdot 10^{-5}$ |
| Аргон | 0,911182 | Угарный газ CO | $1,17 \cdot 10^{-5}$ |
| Водяные пары | 2,441075 | Водород | $4,88 \cdot 10^{-5}$ |
| Углекислый газ | 0,034438 | Аммиак NH ₃ | $9,76 \cdot 10^{-6}$ |
| Неон | 0,001774 | Оксид азота NO ₂ | $9,76 \cdot 10^{-8}$ |
| Криптон | 0,000111 | Оксид серы SO ₂ | $1,95 \cdot 10^{-8}$ |
| Гелий | 0,000511 | Сульфид водорода H ₂ S | $1,95 \cdot 10^{-8}$ |
| Метан | 0,000168 | | |

Сравнение парциальных давлений азота и кислорода, полученных в результате расчета равновесной газовой фазы над никелевым сплавом и расчета состава газовой фазы в ВИП при натекании воздуха, представлены на рис. 3.62.

Как видно из результатов расчета, парциальные давления кислорода и азота в атмосфере плавильной камеры ВИП превышают более чем на три порядка равновесные значения для никелевого сплава с низким содержанием этих газов. Это является теоретическим подтверждением высказанной гипотезы о том, что после прекращения вакуум – кислородного обезуглероживания азот и кислород начинают переходить из газовой фазы плавильного агрегата в расплав металла. С ростом содержания растворённого кислорода существующая технология справляется путём проведения операции раскисления вводом соответствующих раскислителей.

При этом рост содержания азота в существующих агрегатах прервать или компенсировать невозможно.

Для оценки условий, при которых может быть сведён к нулю градиент парциальных давлений азота и кислорода, направленный в металл, провели дальнейшие расчеты в программе "Terra" моделируя состав остаточной газовой фазы в плавильной камере ВИП путём разбавления воздуха инертным газом – аргоном.

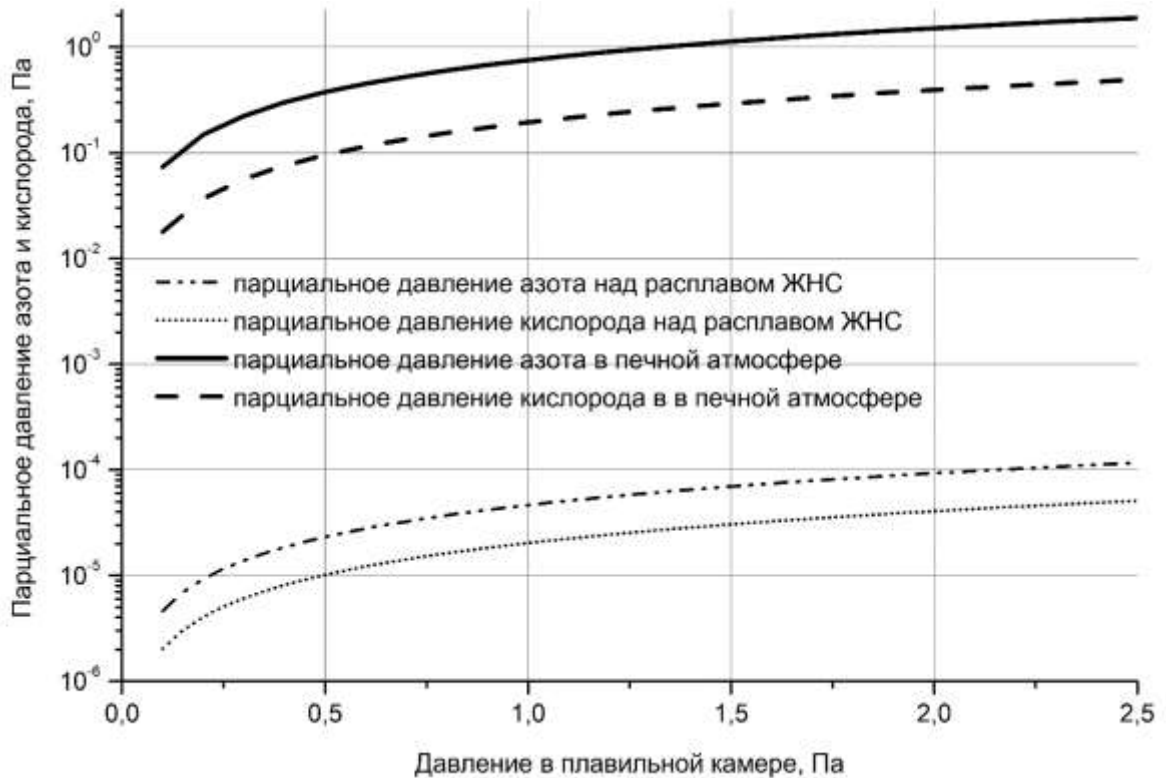


Рисунок 3.62. Сравнение парциальных давлений азота и кислорода над расплавом никелевого сплава при содержании $[N]=10$ ppm и $[O]=5$ ppm и парциальных давлений азота и кислорода атмосферы воздуха при рабочем давлении в плавильной камере ВИП

Результаты сравнения парциальных давлений азота и кислорода над расплавом никелевого сплава при содержании $[N]=10$ ppm и $[O]=5$ ppm и парциальных давлений азота и кислорода атмосферы воздуха, разбавленного аргоном в различных соотношениях, при рабочем давлении в плавильной камере ВИП представлены на рис.3.63 и 3.64.

Как видно из результатов такого сравнения, только переходя к соотношению воздуха и аргона в плавильной камере ВИП большему чем 1:1'000'000 (одна часть воздуха на миллион частей аргона по массе) удаётся выйти на создание атмосферы, при которой возможно предотвращение насыщения металла азотом на заключительных этапах выплавки.

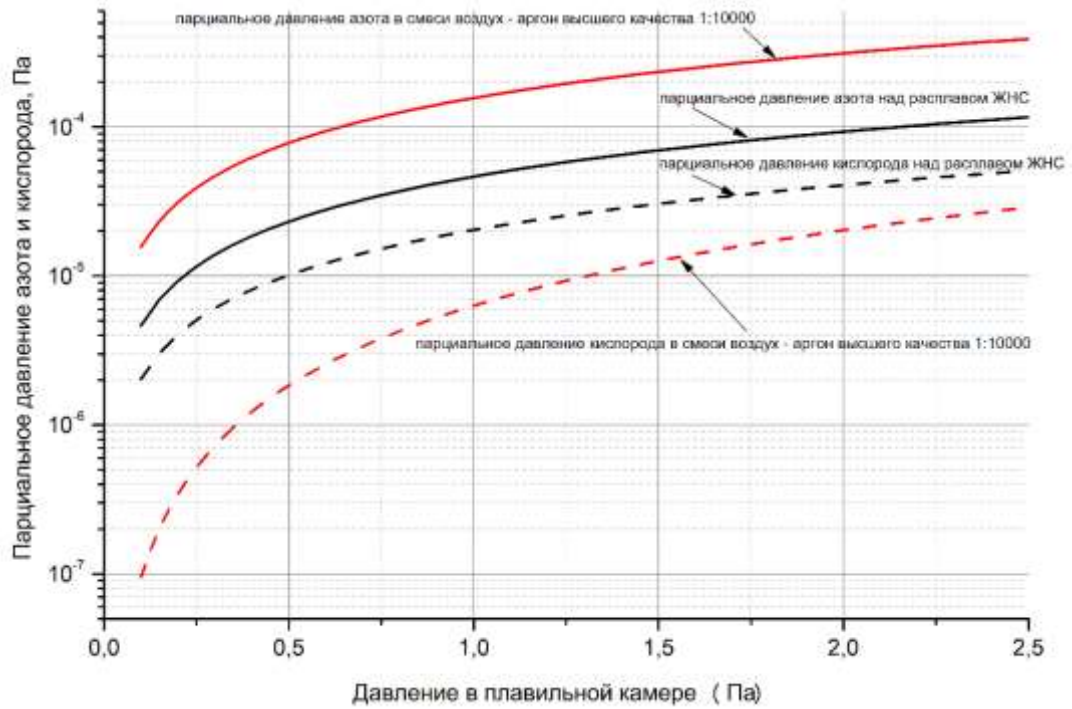


Рисунок 3.63. Сравнение парциальных давлений азота и кислорода над расплавом никелевого сплава при содержании $[N]=10 \text{ ppm}$ и $[O]=5 \text{ ppm}$ и парциальных давлений азота и кислорода смеси воздух – аргон высшего качества в соотношении 1:10000 (по массе) в плавильной камере ВИП

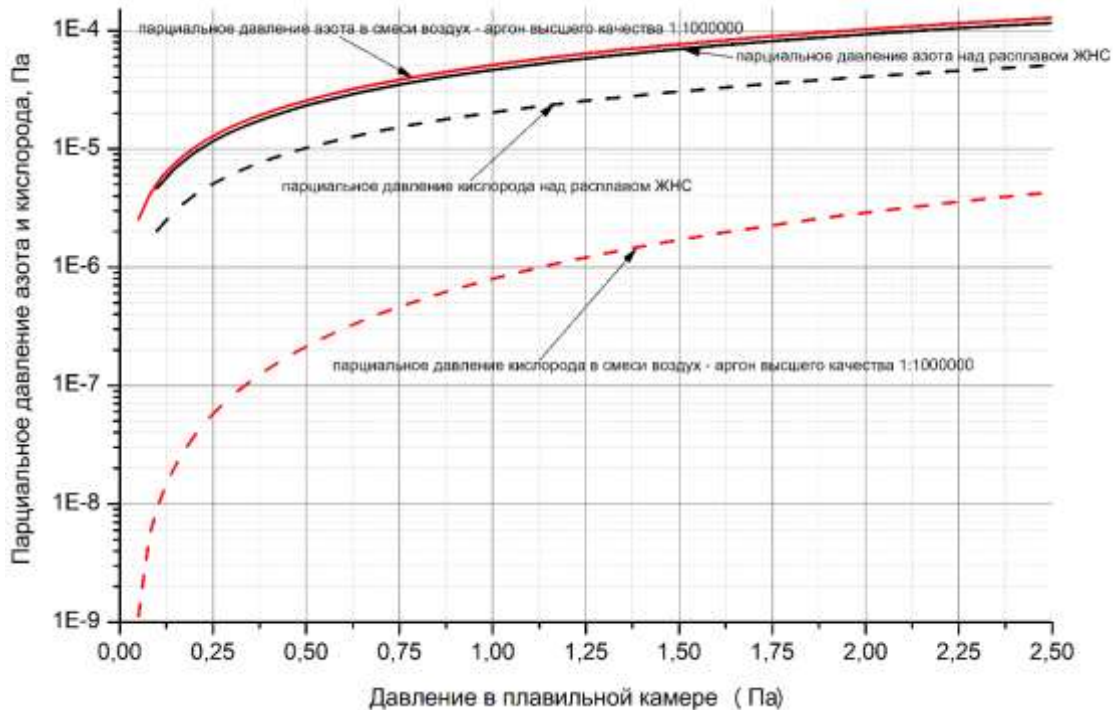


Рисунок 3.64. Сравнение парциальных давлений азота и кислорода над расплавом никелевого сплава при содержании $[N]=10 \text{ ppm}$ и $[O]=5 \text{ ppm}$ и парциальных давлений азота и кислорода смеси воздух – аргон в соотношении 1:1'000'000 (по массе) при рабочем давлении в плавильной камере ВИП

Таким образом, натекание атмосферного воздуха в плавильную камеру ВИП обуславливает повышенное содержание растворённого азота в расплаве никелевых сплавов, а также окисление металла и повышение расхода раскислителей. Для обеспечения парциального давления азота в плавильной камере равного или ниже аналогичного над расплавом никелевого сплава необходимо разбавление натекающей атмосферы аргоном высшего качества в соотношении выше чем 1:1'000'000. Для практической реализации такого требования в конструкцию ВИП должны быть внесены изменения, позволяющие менять состав атмосферы в плавильной камере без изменения абсолютного давления.

3.7. Термодинамическое моделирование условий достижения предельно низких концентраций углерода при вакуум-кислородном обезуглероживании никелевых сплавов

Термодинамическое моделирование равновесного парциального давления углерода в условиях вакуумной индукционной плавке проводили в пакете прикладных программ Thermo-Calc.

Объектом моделирования был выбран перспективный коррозионностойкий сплав на никелевой основе ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) следующего химического состава (% масс): [%C] = 0,005, [%Si] = 0,001, [%Mn] = 0,034, [%Cr] = 23,4, [%Mo] = 12,52, [%Fe] = 0,29, [%Cu] = 0,023, [%W] = 0,009, [%Ni] – основа.

Основные легирующие компоненты сплава – хром и молибден снижают коэффициент активности и активность углерода в никелевых сплавах (при этом интенсивность такого снижения различна, влияние хрома гораздо сильнее, чем молибдена) [231] (см. табл.3.17). Хром в никелевом сплаве также снижает коэффициент активности кислорода и активность кислорода [231] (см. табл.3.17).

Поэтому, обезуглероживание расплавов системы Ni–Cr протекает с уменьшающейся эффективностью при росте концентрации хрома и для более глубокого обезуглероживания более пригодны расплавы системы Ni–Mo в отличие от сплавов системы Ni–Cr–Mo.

Таблица 3.17. Расчет активности углерода и кислорода в никелевом сплаве
ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ)

| Компонент сплава | Содержание, % масс | Расчет коэффициента активности углерода | | Расчет коэффициента активности кислорода | |
|------------------|--------------------|---|---------------------|--|-----------------------|
| | | e_C^j , [231] | $e_C^j \cdot [\%J]$ | e_O^j , [231] | $e_O^j \cdot [\%J]$ |
| Углерод | 0,005 | | | -0,57 | -0,00285 |
| Кремний | 0,001 | 0,031 | 0,000031 | -0,137 | -0,000137 |
| Марганец | 0,034 | 0,0017 | 0,0000578 | -0,45 | -0,0153 |
| Сера | 0,005 | | | -0,089 | -0,000445 |
| Фосфор | 0,01 | 0,04 | 0,0004 | 0 | 0 |
| Хром | 23,4 | -0,013 | -0,3042 | -0,2 | -4,68 |
| Молибден | 12,52 | -0,005 | -0,0626 | 0 | 0 |
| Железо | 0,29 | 0 | 0 | -0,029 | -0,00841 |
| Медь | 0,023 | 0,004 | 0,000092 | -0,008 | -0,000184 |
| Вольфрам | 0,009 | -0,001 | -0,000009 | | |
| Кислород | 0,005 | | | | |
| Никель | 63,698 | | | | |
| | | $\sum_{j=1}^{\kappa} e_C^j \cdot [\%J]$ | -0,3662 | $\sum_{j=1}^{\kappa} e_O^j \cdot [\%J]$ | -4,7073 |
| | | Коэффициент активности углерода | 0,4303 | Коэффициент активности кислорода | $1,962 \cdot 10^{-5}$ |
| | | Активность углерода | 0,0022 | Активность кислорода | $9,809 \cdot 10^{-8}$ |

Примечание: e_C^j - массовый параметр взаимодействия первого порядка для углерода в растворе никеля; e_O^j - массовый параметр взаимодействия первого порядка для кислорода в растворе никеля.

Данный вывод подтверждается и результатами моделирования в пакете прикладных программ Thermo-Calc. Результаты расчета содержания углерода в газовой фазе над расплавом ХН62М в зависимости от давления и температуры расплава представлены на рис.3.65.

Максимальное содержание углерода в объекте моделирования составляет $[\%C]=0,005$ % масс. = $2,44 \cdot 10^{-4}$ м.д., а содержание в равновесной газовой фазе при температуре плавки не превышает $2,2303 \cdot 10^{-7}$ м.д., таким образом, реализация удаления углерода за счет организации вакуум-кислородного рафинирования становится трудно осуществимой задачей.

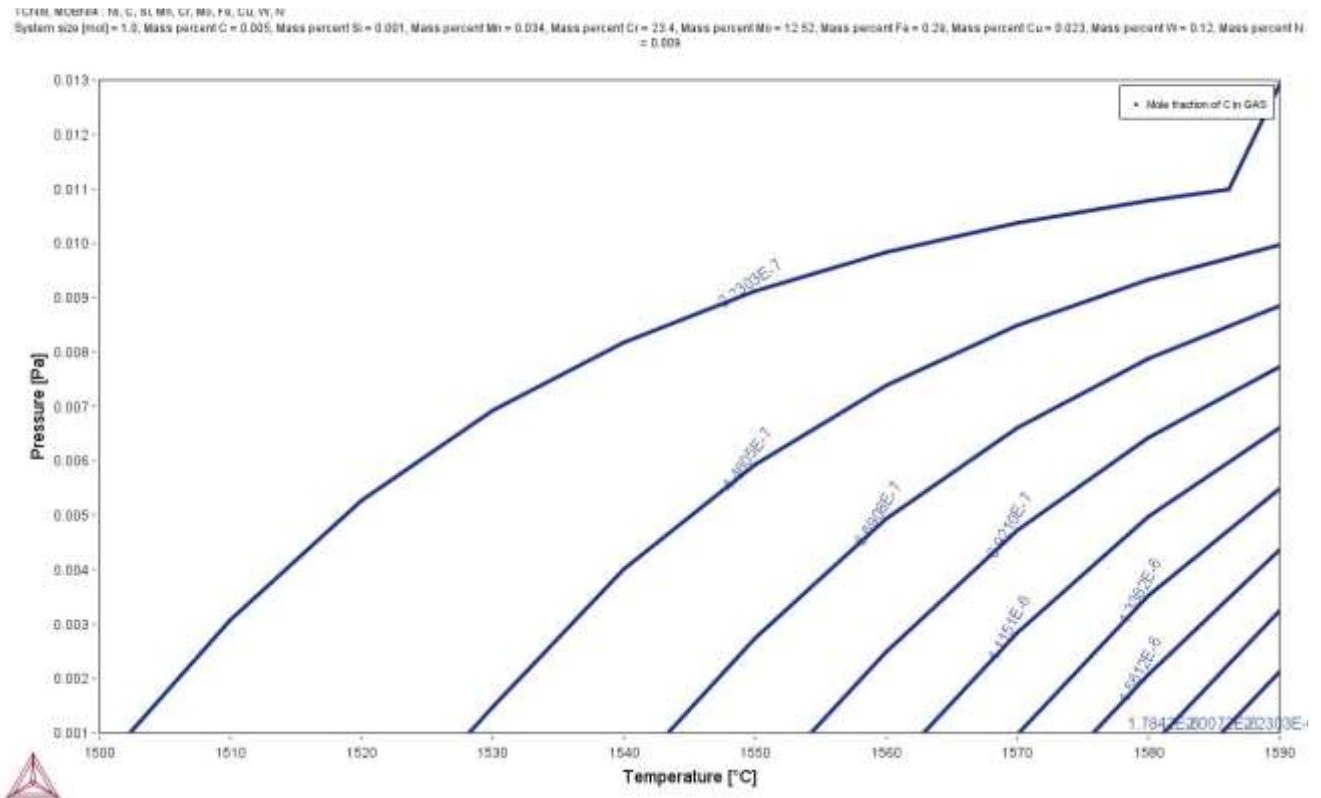


Рисунок 3.65. Результаты расчета содержания углерода в газовой фазе над расплавом ХН62М в зависимости от температуры сплава и давления в вакуумной камере

С целью определения необходимой концентрации кислорода в металле при организации вакуум-кислородного обезуглероживания расплава Ni–27%Mo провели моделирование равновесного распределения углерода в металл – газ при различных содержаниях кислорода, растворённого в металле. Результаты моделирования в ППП Thermo-Calc приведены на рис.3.66–3.69.

Увеличение исходного содержания кислорода в сплаве Ni–Mo–C приводит к возможности снижения содержания углерода ниже максимального исходного уровня 0,005% масс. до 0,0027% масс. при исходном содержании кислорода 0,003 % масс., до 0,002% масс. – при 0,004% масс. кислорода, до 0,0013 % масс. - при 0,005% масс. кислорода.

Если в никелевый сплав системы Ni–Mo–C добавить хром до уровня не превышающего содержание молибдена, равновесие в системе металл – газ по углероду практически не изменится (см. рис.3.69).

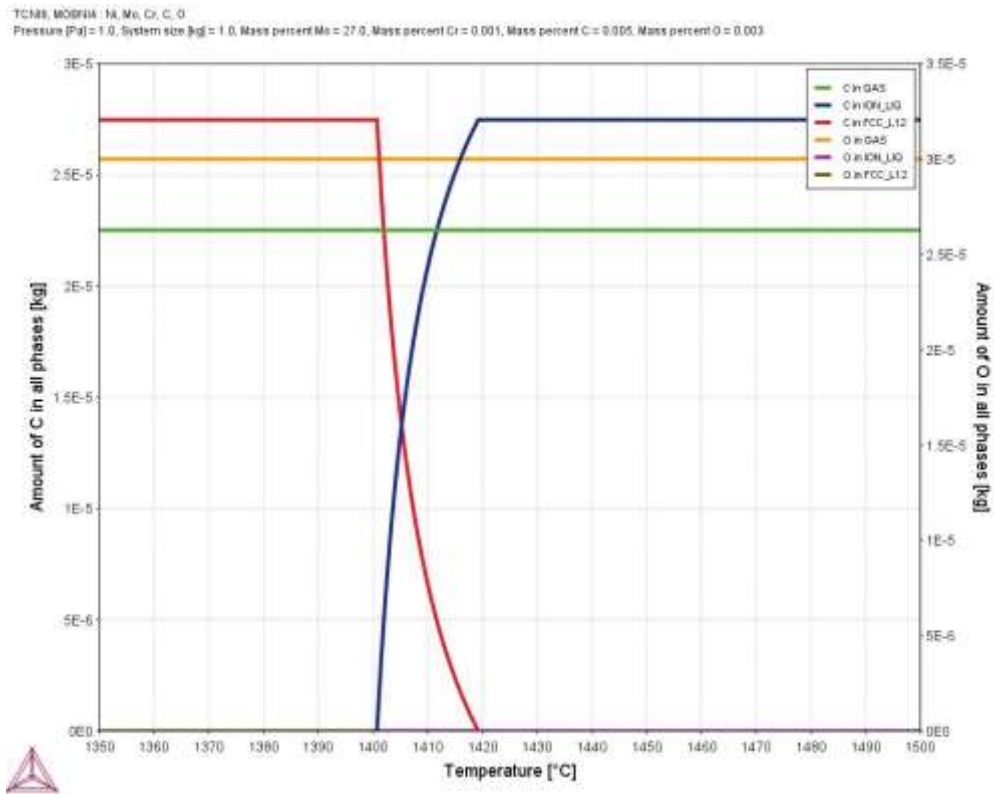


Рисунок 3.66. Равновесный фазовый состав системы Ni–Mo–C–O при исходном содержании кислорода в сплаве 0,003% масс., давлении 1 Па

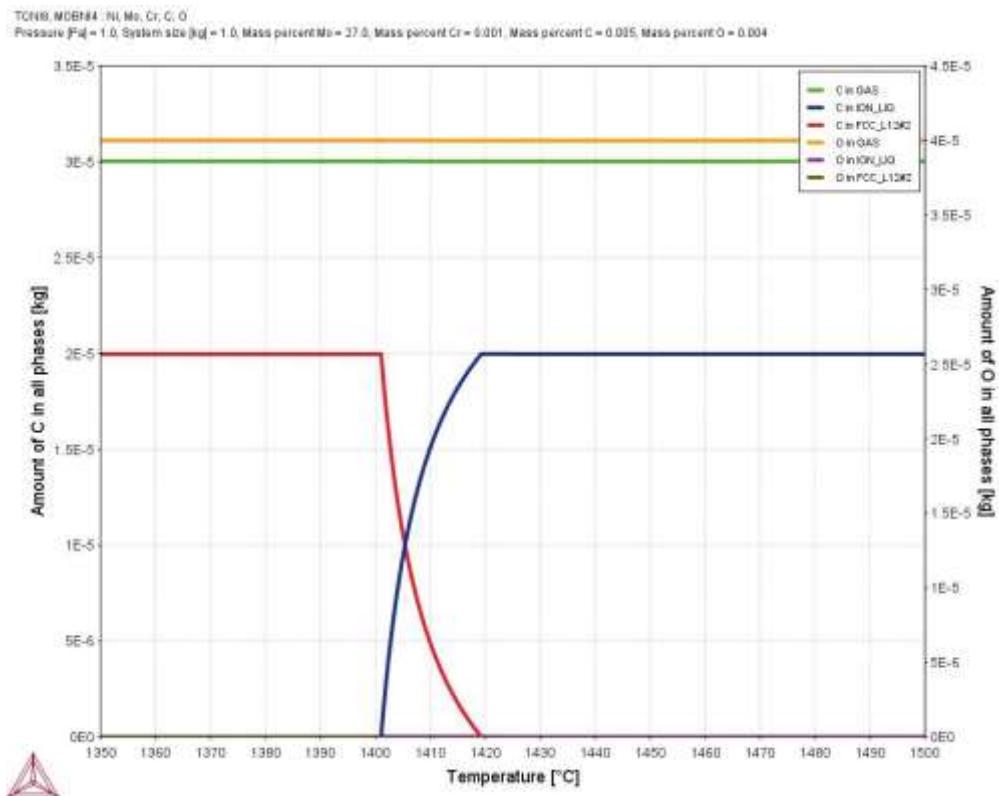


Рисунок 3.67. Равновесный фазовый состав системы Ni–Mo–C–O при исходном содержании кислорода в сплаве 0,004% масс., давлении 1 Па

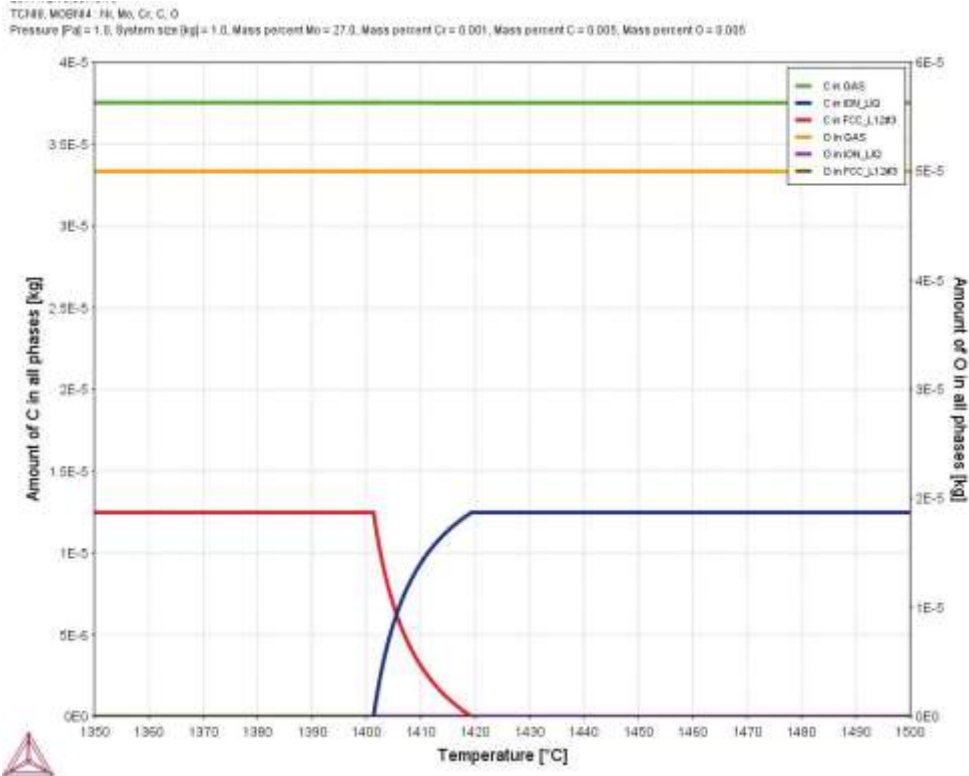


Рисунок 3.68. Равновесный фазовый состав системы Ni–Mo–C–O при исходном содержании кислорода в сплаве 0,005% масс., давлении 1 Па

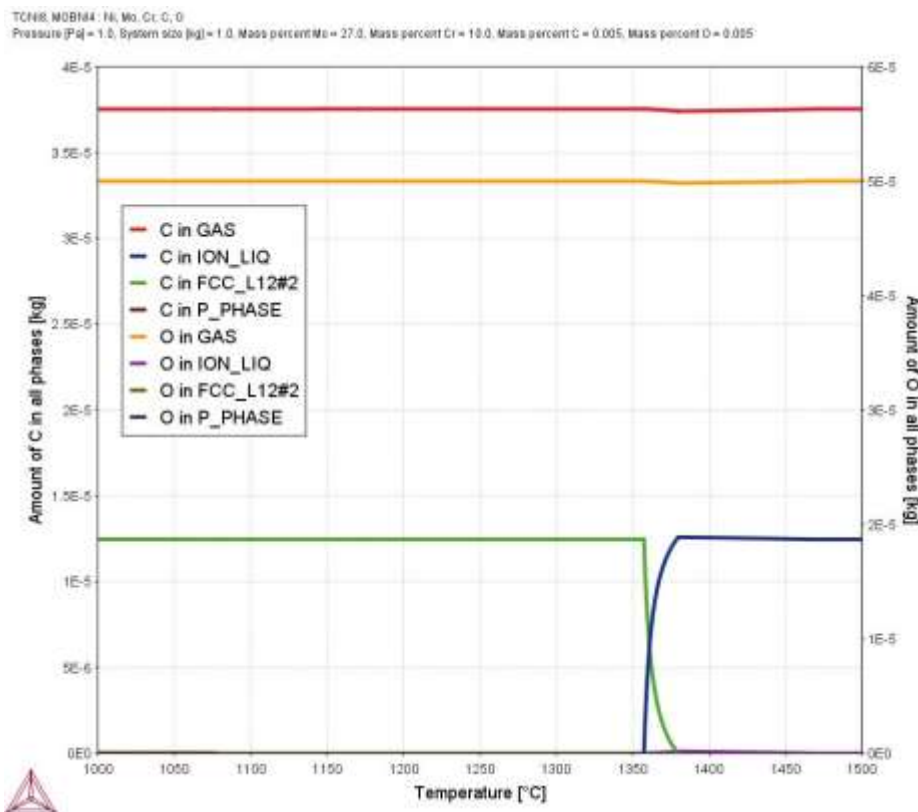


Рисунок 3.69. Равновесный фазовый состав системы Ni–27%Mo–10%Cr–C–O при исходном содержании кислорода в сплаве 0,005% масс., давлении 1 Па

Однако для гарантированного достижения глубокого обезуглероживания приоритетным является вариант с обезуглероживанием сплавов системы Ni–Mo.

Таким образом, для первоначального этапа производства сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) предлагается провести выплавку лигатуры (паспортной шихтовой заготовки) состава Ni–Mo, при условии с проведением вакуум – кислородного обезуглероживания с целью получения содержания углерода в расплаве ниже 0,003% масс.

Выводы

1. Анализ массива опубликованных экспериментальных данных по исследованию растворимости кислорода в расплаве железа по классической методике, предложенной в [206] (анализ в координатах "содержание кислорода в железе в % масс. – логарифм константы равновесия реакции растворения кислорода"), не даёт однозначного подтверждения гипотезы, что растворы кислорода в железе не подчиняются закону Генри.

2. Предложена методика анализа экспериментальных данных основанная на избрании компонентами системы атомов химических элементов и отображении накопленных экспериментальных данных в координатах "парциальное давление атомарного компонента в атм. – содержание компонента в растворе железа в м.д.", что позволило искать взаимосвязи при реальном соотношении количества частиц раствора без учёта влияния атомных масс компонентов раствора.

3. Использование предлагаемой методики для анализа экспериментальных данных позволяет доказать, что поведение кислорода, растворённого в жидком железе, подчиняется законам разбавленных растворов и, в частности, закону Генри; температурная зависимость коэффициента Генри для кислорода, растворённого в железе, описывается следующим выражением: $\ln k_H^{(o)} = -10,77 + 44535/T$. Уточненные уравнения изменения энергии Гиббса реакции растворения кислорода в жидком железе и зависимости активности кислорода в нём имеют вид

$\Delta G = -118473 + 24,6 \cdot T$, Дж/моль, $a_{[O]} = x_{[O]} \cdot \exp(10,77 - 44535/T)$. Повышенное содержание углерода в растворе железа, достигнутое за счёт увеличения давления в системе Fe-CO-CO₂, приводит к отклонению от приведенной зависимости, снижая численное значение коэффициента Генри.

4. Поведение углерода, растворённого в жидком железе подчиняется законам разбавленных растворов и, в частности, закону Генри только в области малых концентраций до 0,017 м.д. (или до ~0,37% масс.) (при таких концентрациях углерода аппроксимационные линии зависимости $x_{[C]} = f(P_C)$ имеют расхождения с касательными к ним в точке с координатами (0; 0) не более 20%).

5. Температурная зависимость коэффициента Генри для углерода в разбавленных растворах жидкого железа, описывается уравнением $\ln k_H^{(C)} = -17,83 + 84903/T$.

6. Уточнённое выражение для изменения свободной энергии Гиббса реакции растворения конденсированного углерода в жидком железе имеет вид $\Delta G = 11177 - 34,322 \cdot T$, Дж/моль.

7. Уточнённые температурные зависимости коэффициента Генри и уравнения изменения энергии Гиббса для раствора углерода в жидком железе, действительны вблизи точки бесконечного разбавления и не могут быть применимы для растворов с содержанием углерода выше 0,4% масс. из-за увеличивающихся расхождений с реальным поведением углерода.

8. Установлено влияние парциальных давлений моноатомных углерода P_C и кислорода P_O над расплавом железа на растворимость углерода в нем и количественно определена взаимосвязь указанных характеристик системы "расплав железа – газовая фаза", которая выражается уравнением $x_{[C]} = \exp(77124/T - 7,096) \cdot P_C \cdot P_O^{1/2}$ (1823÷2023К).

9. Установлено, что для обеспечения непрерывности снижения активности кислорода, растворённого в железе, при снижении общего давления в системе необходимо поддерживать восстановительный характер газовой фазы, а для

соответствующего снижения активности углерода – окислительный характер газовой фазы.

10. Получило дальнейшее развитие термодинамическое описание металлургических газовых фаз, содержащих азот: установлено, что наименьшей активностью азот обладает в газовой смеси с инертными газами, а примеси восстановительных (водород, оксид углерода (II)) и окислительного (кислород) компонентов в газовой смеси приводят к росту активности азота.

11. Впервые установлены зависимости коэффициента межфазного распределения азота в системе железо – азотсодержащая газовая фаза от концентрации $x_{\{N\}}$ и активности азота $a_{\{N\}}$ в газе и температуры T : $L_N = 296 \cdot x_{\{N\}} + 2236 \cdot a_{\{N\}} + 1161717/T - 282$ для систем Fe-N-Ar(He) при атмосферном давлении, $T=1853 \div 2273\text{K}$ и любом соотношении исходных компонентов газовой; $L_N = 242 \cdot x_{\{N\}} + 419781 \cdot a_{\{N\}} + 1631212/T - 784$ для систем Fe-NH₃-Ar(He) при атмосферном давлении, $T=1963 \div 2123\text{K}$ и содержании аммиака в исходной газовой смеси от 0 до 40% об.

12. Предложенная термодинамическая модель металлических растворов, учитывающая подсистему валентных электронов фазы как её компонент, адекватно описывает поведение компонентов в двойных и тройных системах.

13. Установлена определяющая роль градиента окисленности шлака в системе металл – шлак – газ на поведение азота в процессах деазотации стали при выплавке и внепечной обработки вне зависимости от основного компонента шлака, имеющего отрицательную степень окисления, кислорода или фтора.

14. Результаты термодинамического моделирования равновесных условий, соответствующих параметрам процесса выплавки в вакуумной индукционной печи, показали, что натекание атмосферного воздуха в плавильную камеру ВИП обуславливает повышенное содержание растворённого азота в расплаве никелевых сплавов, а также окисление металла и повышение расхода раскислителей. Для обеспечения парциального давления азота в плавильной камере равного или ниже аналогичного над расплавом никелевого сплава необходимо разбавление

натекающей атмосферы аргоном высшего качества в соотношении выше чем 1:1'000'000.

15. Для производства сплавов на основе никеля с низким содержанием углерода рекомендуется проводить выплавку в вакуумной индукционной печи в два этапа: на первом этапе получать паспортную шихтовую заготовку в виде сплавов системы Ni-Mo или Ni-Fe с целью обеспечения глубокого обезуглероживания, на втором этапе получать сплав по нормативным требованиям. При этом процессы вакуум-кислородного рафинирования и на обоих этапах интенсифицировать подачей окислителя в ванну во время расплавления и рафинировки металла.

Основные материалы настоящего раздела опубликованы в работах [439, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454].

РАЗДЕЛ 4
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ
ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОЦЕССА НА УРОВЕНЬ
СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА В МЕТАЛЛЕ

4.1. Разработка технологий, обеспечивающих удаление и стабилизацию
содержания азота в ванне дуговой сталеплавильной печи и
сталеразливочном ковше

Несмотря на значительную дисперсию производственных данных, статистический анализ при наличии достаточно большого количества данных позволяет сделать вполне определённые выводы.

Основные усилия при разработке методов снижения содержания азота в металле направлены на интенсификацию механизма его удаления пузырьками СО. Хотя, как было показано выше (разделы 1.2, 1.3), надёжных экспериментальных подтверждений эффективности этого процесса не имеется.

Для получения дополнительной информации по этому вопросу обработали массив из 4297 результатов анализов металла на содержание углерода и азота при выплавке стали в условиях ЭСПЦ Молдавского металлургического завода в период с 01.01.2000 года по 30.06.2000 года (3700 плавов, взятых подряд). Результаты анализа представлены на рис.4.1 в тех же координатах, что и в работе [15].

Регрессионный анализ данных (прямая линия на рис.4.1) показывает, что при снижении содержания углерода в стали действительно происходит снижение содержания азота. На том же рисунке изображены кривые А1 и А2, которые по мнению авторов [15] отражают границы области тенденции в изменении содержания азота в расплаве металла в процессе выплавки полупродукта в сверхмощной ДСП. Как видно из рис.4.1 выделенная этими кривыми область практически не коррелирует с фактическими данными.

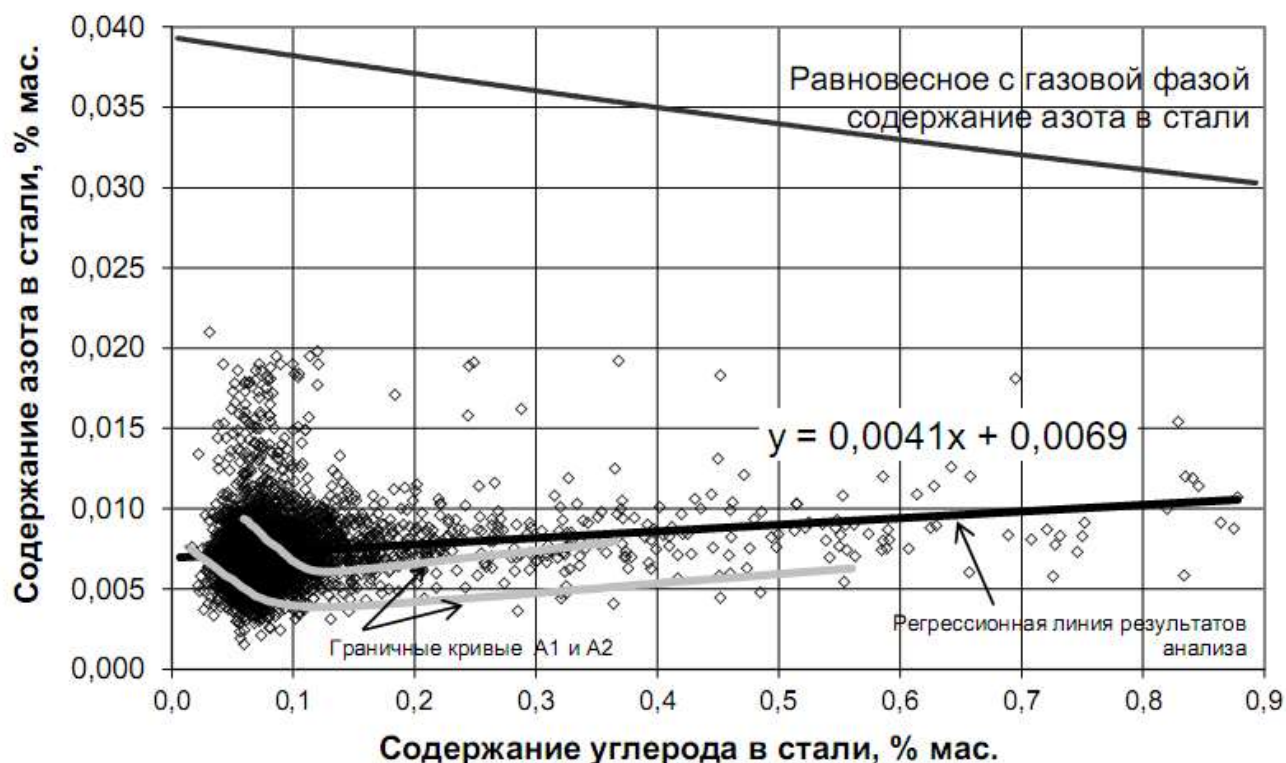


Рисунок 4.1. Анализ влияния концентрации углерода в металле на концентрацию азота по данным ЭСПЦ ММЗ

Наклон регрессионной прямой на рис.4.1 экспериментально подтверждает эффективность выдержки расплавленного металла под шлаком – за время окисления углерода в количестве 0,3 % масс. среднее относительное снижение концентрации азота в стали составляет 10% от исходной.

Своеобразие облака точек на рис.4.1, как и у аналога в работе [15] позволившее авторам провести линии с изломом, в действительности связано просто с тем, что подавляющее количество отбираемых проб приходится на узкий диапазон содержаний углерода (0,05–0,15 % масс.). Это можно показать "растянув" область точек с помощью логарифмической шкалы углерода (рис.4.2).

Излом, зафиксированный авторами работы [15] и отображённый на рис.4.1 и рис.4.2 (красные линии), никак не подтверждается регрессионным анализом фактических данных.

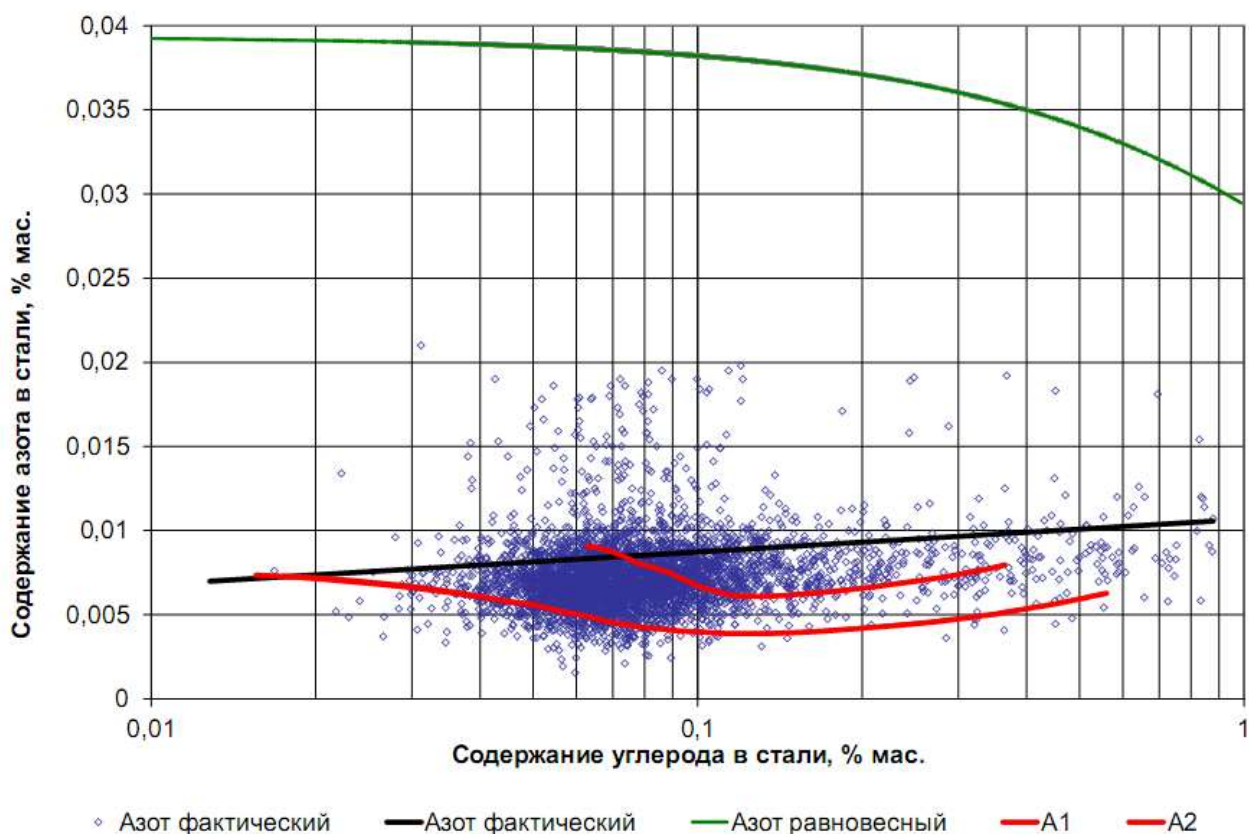


Рисунок 4.2. Влияние концентрации углерода в металле на концентрацию азота

На том же рис.4.1 вверху представлена, полученная расчётом кривая концентрации азота, равновесной с печной атмосферой. Из сопоставления регрессионной и равновесной линий видно, что во время окислительного периода фактическое содержание всегда ниже равновесного и с течением плавки содержание азота продолжает снижаться.

Более корректно оценить влияние выноса азота пузырьками CO можно представив данные в виде зависимости количества удалившегося азота от количества углерода, окислившегося за тот же период в интервале между двумя последовательно взятыми пробами (рис.4.3).

Для рис.4.3 из общего массива данных использованы только плавки, имевшие два и более анализов.

Из этого рисунка видно, что эффект выноса азота пузырьками CO действительно существует, однако он ничтожно мал (ордината рис.4.3 сильно растянута в сравнении с ординатами рис.4.1 и 4.2).

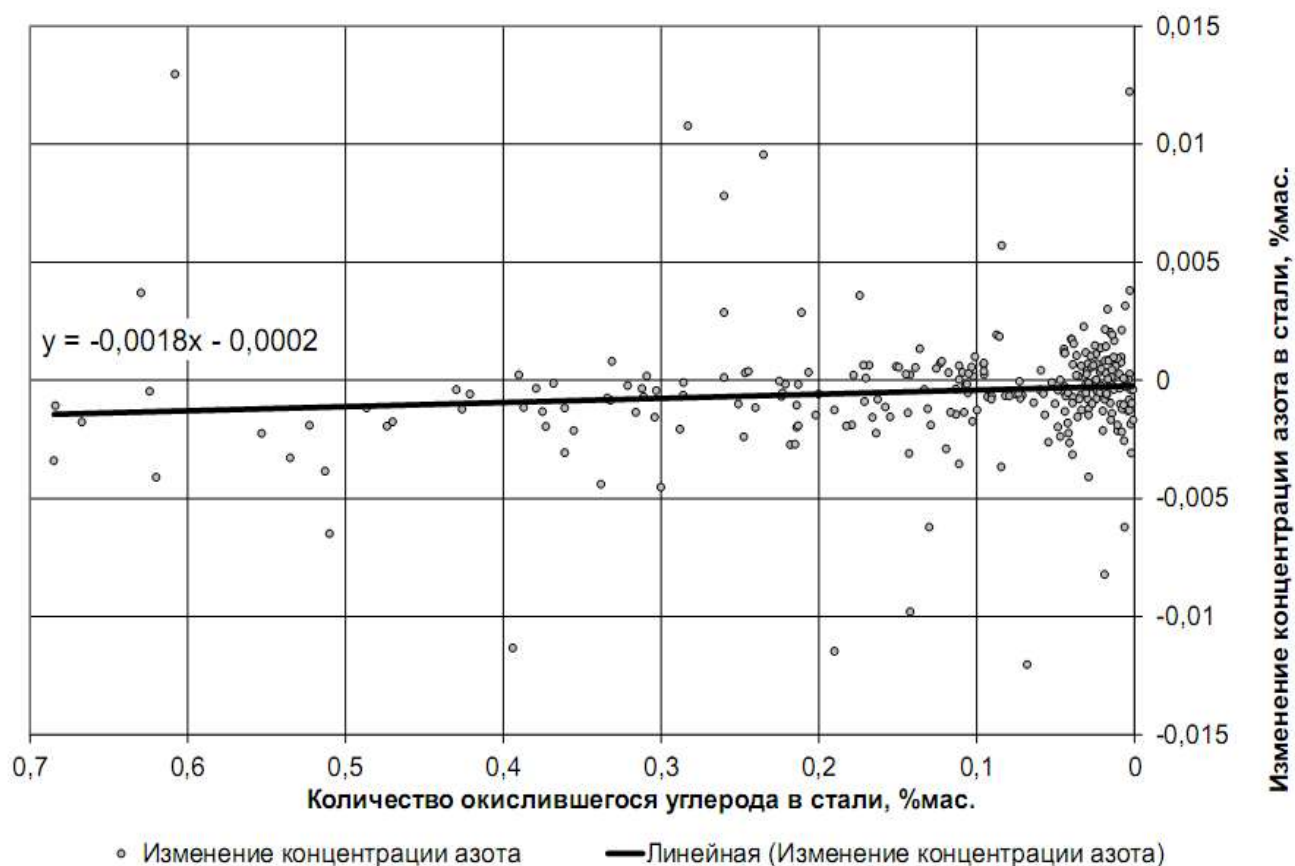


Рисунок 4.3. Влияние изменения концентрации углерода на содержание азота в стали

Регрессионный анализ данных (рис.4.3) показывает, что изменение содержания азота в стали за счёт его выноса пузырьками СО в окислительный период в ДСП-2 составляет 0,0027% на 1% окисляющегося углерода. То есть к.п.д. этого процесса составляет 0,27%, что находится в полном соответствии с данными, приведёнными в литературном обзоре (раздел 1.2).

Если учесть, что во время окислительного периода могут происходить другие процессы, способствующие удалению азота, в частности «накачка», то реальный к.п.д. вымывания азота пузырьками СО ещё меньше.

Сравнивая углы наклона регрессионных прямых на рис.4.1 и рис.4.3 можно отметить, что угол наклона регрессионной прямой на рис.4.1 выше в 2,3 раза, что подтверждает присутствие другого механизма удаления азота из стали помимо выноса пузырьками СО. Причём, этот "иной" механизм гораздо эффективнее

"пузырькового". По нашему мнению, эффект снижения содержания азота в стали при окислении углерода, зафиксированный на рис.4.3, практически целиком связан с действием эффекта "накачки" (раздел 3), а образующиеся пузырьки CO способствуют его интенсификации за счёт перемешивания металла и шлака.

Более чётко наклон регрессионной кривой деазотации в окислительном периоде в ДСП-2 и отсутствие перегибов [15], можно наблюдать на рис.4.4, где те же данные, что и на рис.4.1, отложены по ординате расчётного содержания кислорода в металле, определённого по формуле из работы [19]:

$$[\%O] = 0,0033/[\%C] \quad (4.1)$$

(формула (4.1) используется для вычисления содержания углерода по замерам окисленности металла в системах контроля и управления процессом производства).

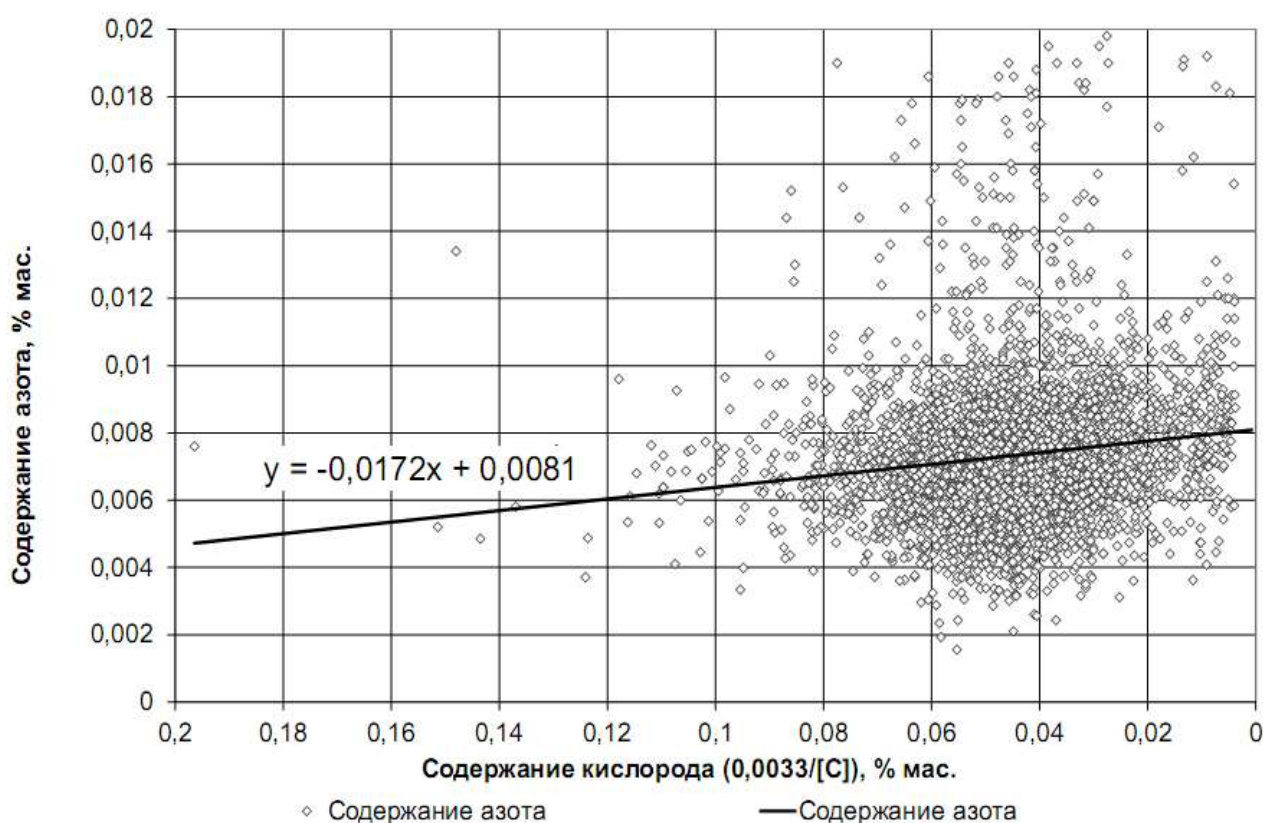


Рисунок 4.4. Анализ влияния содержания кислорода в стали на содержание азота

Поскольку содержание кислорода в стали по ходу плавки в ДСП только увеличивается, поэтому данные на рис.4.4 дополнительно подтверждают сделанные ранее выводы.

Таким образом, статистический анализ производственных данных подтвердил вывод литературного обзора о наличии действенного фактора в поведении азота в условиях выплавки в ДСП и теоретической оценки мощности такого фактора, превышающего в разы все остальные (раздел 3).

Целью проведения экспериментов в производственных условиях ЭСПЦ ММЗ ставилось достижение минимально возможной концентрации азота в стали 70 на выпуске из сверхмощной ДСП. Выбор выплавки стали 70 обусловлен жёсткими требованиями заказчика, ограничивающими содержание азота в готовом прокате уровнем 0,008% масс., и отсутствием в ЭСПЦ в то время вакуумной обработки.

Для достижения поставленной цели предложено было интенсифицировать эффект "накачки" путём выполнения следующих технологических приёмов:

- обдув поверхности шлака кислородом с интенсивностью, не допускающей оголения металла для обеспечения постоянно высокого потенциала окисленности поверхности раздела газовая фаза – шлак (см. раздел 3);
- подача известняка в печь вместо извести на заключительном этапе выплавки стали для интенсификации перемешивания шлака пузырьками CO_2 , выделяющегося при разложении известняка (200 кг/мин);
- интенсивное перемешивание металла и шлака в печи аргоном через донные дутьевые устройства, при этом расход максимальный расход аргона ограничивался таким образом, чтобы при продувке не достигалось оголения поверхности металла из-под шлака (до 0,3 м³/мин на одно продувочное устройство).

Все мероприятия проводились одновременно, исключение какого-либо приёма привело бы к снижению достигаемого эффекта. С целью отработки рекомендаций по совершенствованию технологического процесса были проведены три экспериментальные плавки: 204359 (сталь 1008), 204360 (Ст3пс1), 204362 (сталь 1008).

Пробы металла на содержание азота отбирались – первая – по расплавлению; вторая – перед выпуском металла из печи. Результаты химического анализа металла на содержание азота приведены в табл.4.1

Таблица 4.1. Результаты анализа проб металла на содержание азота при экспериментах на ДСП-2 ЭСПЦ ММЗ

| Номер плавки | Номер пробы | Содержание азота, % масс. | |
|--------------|-------------|----------------------------|----------------------------------|
| | | Экспресс-анализ в ЭСПЦ ММЗ | ЦЗЛ ММЗ (протокол от 18.07.2000) |
| 204359 | 1 | 0,0070 | 0,006 |
| | 2 | | 0,006 |
| 204360 | 1 | 0,0067 | 0,006 |
| | 2 | | 0,006 |
| 204362 | 1 | 0,0071 | 0,007 |
| | 2 | | не отобраена |

Одновременно с пробами металла из печи отбирали пробы шлака. Результаты химического анализа шлаков приведены в табл.4.2.

Таблица 4.2. Результаты химического анализа состава шлака

| Номер плавки | № пробы | Массовая доля, % | | | | | | | | | | |
|--------------|---------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------|------------------|--------------------------------|-----|-----|---------|-------------|--------------------------------|
| | | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | CaO | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | MnO | MgO | Fe общ. | В том числе | |
| | | | | | | | | | | | FeO | Fe ₃ O ₄ |
| 204359 | 1 | 2,6 | 14,3 | 0,42 | 22,0 | 0,55 | 1,9 | 9,1 | 2,5 | 35,0 | 35,7 | 10,5 |
| | 2 | 2,0 | 10,0 | 0,38 | 21,5 | 0,47 | 1,8 | 6,8 | 1,8 | 40,8 | 34,5 | 20,0 |
| 204360 | 1 | 2,0 | 10,5 | 0,37 | 22,0 | 0,50 | 1,8 | 6,9 | 1,8 | 40,8 | 42,3 | 11,5 |
| | 2 | 2,5 | 13,0 | 0,41 | 21,8 | 0,49 | 1,9 | 6,5 | 2,8 | 38,0 | 38,9 | 11,2 |
| 204362 | 1 | 2,0 | 10,5 | 0,36 | 20,0 | 0,45 | 1,9 | 6,3 | 1,5 | 41,5 | 52,7 | 0,93 |
| | 2 | 2,0 | 10,0 | 0,38 | 22,5 | 0,45 | 1,8 | 6,4 | 1,8 | 41,0 | 44,6 | 9,2 |

Эксперименты на печи показали, что без существенного увеличения длительности плавки (204359 – 66мин/51мин, 204360 – 56мин/45мин, 204362 – 62мин/48мин¹) можно стабилизировать содержание азота в металле при выплавке в ДСП на уровне 0,006% масс. Анализ шлака не зафиксировал изменений по сравнению с составом шлака при выплавке по действующей технологической инструкции.

При выплавке стали по действовавшей в цехе инструкции, в конце плавки в печь присаживается углеродсодержащий материал для увеличения выхода годного. Однако, эта операция способствует тому, что за время между присадкой материала

¹ Числитель – общая длительность плавки, знаменатель – длительность работы под током.

и началом выпуска металла из печи происходит быстрое усвоение азота из печной атмосферы – до 0,002%мас.

С использованием предложенных технологических операций был проведён ряд плавки стали 70 в период с июля по октябрь 2000 года. При этом основные параметры элементов технологии, обеспечивающей пониженное содержание азота в металле, находились в следующих пределах: расход известняка 180–260 кг/мин (удельная интенсивность расхода – 1,4–1,9 кг/(т·мин)), интенсивность обдува поверхности шлака кислородом 0,02–0,1 м³/(т·мин), удельный расход аргона на донные перемешивающие устройства 0,15–0,19 м³/т (не более 0,3 м³/мин на одно перемешивающее устройство). На рис.4.5 приведен анализ изменения концентрации азота по ходу выплавки стали в ДСП-2 ЭСПЦ ММЗ.

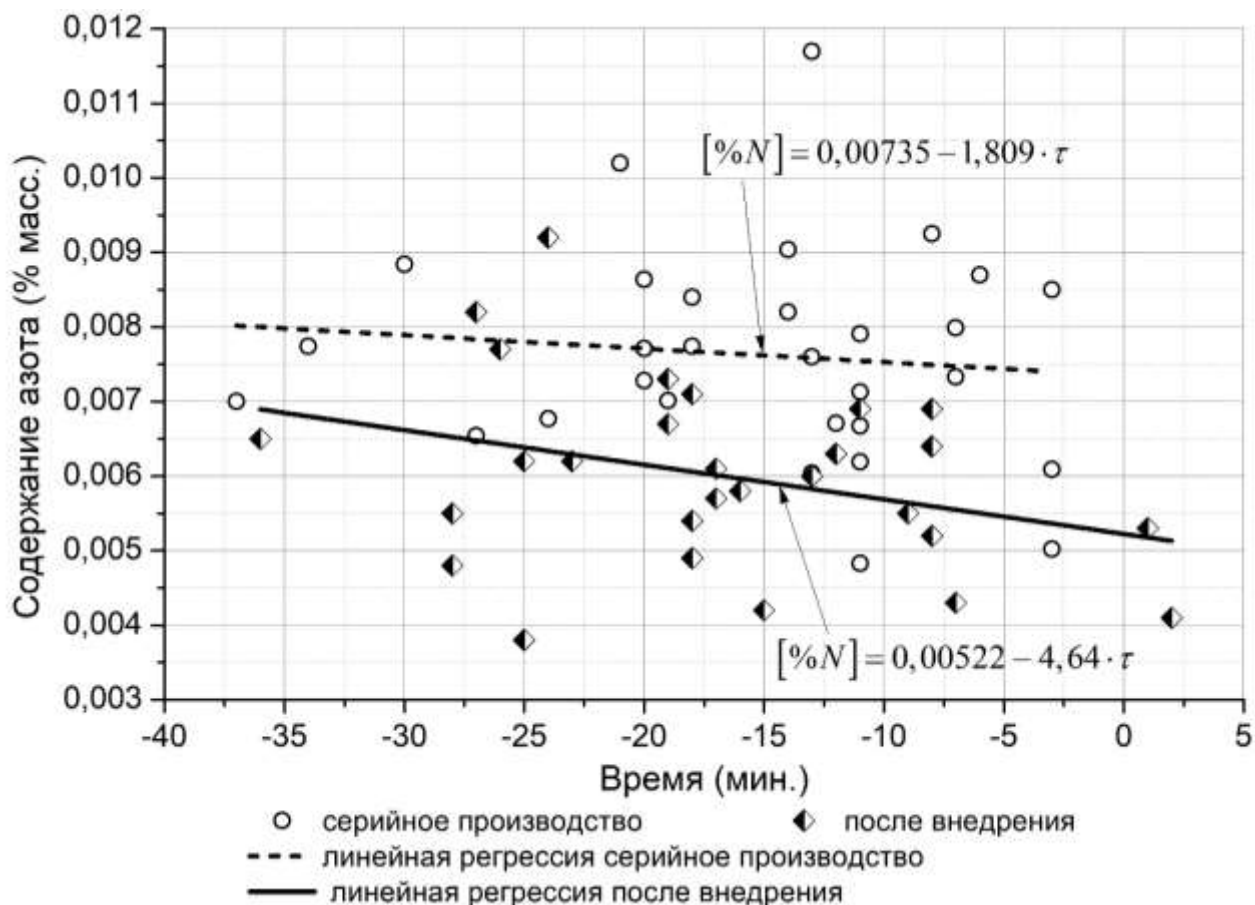


Рисунок 4.5. Зависимость содержание азота в стали 70 от времени отбора пробы (0 – момент выпуска стали из печи)

Из рис.4.5 видно, что ввод предложенных мероприятий обеспечивает среднее снижение концентрации азота в стали на выпуске из печи на 0,0021%.

Кроме того, реализация вышеуказанных предложений обеспечила уменьшение разброса содержания азота в металле на выпуске (рис. 4.6): максимальное содержание азота в стали упало с 0,0200% масс. до 0,0092–0,0130% масс.

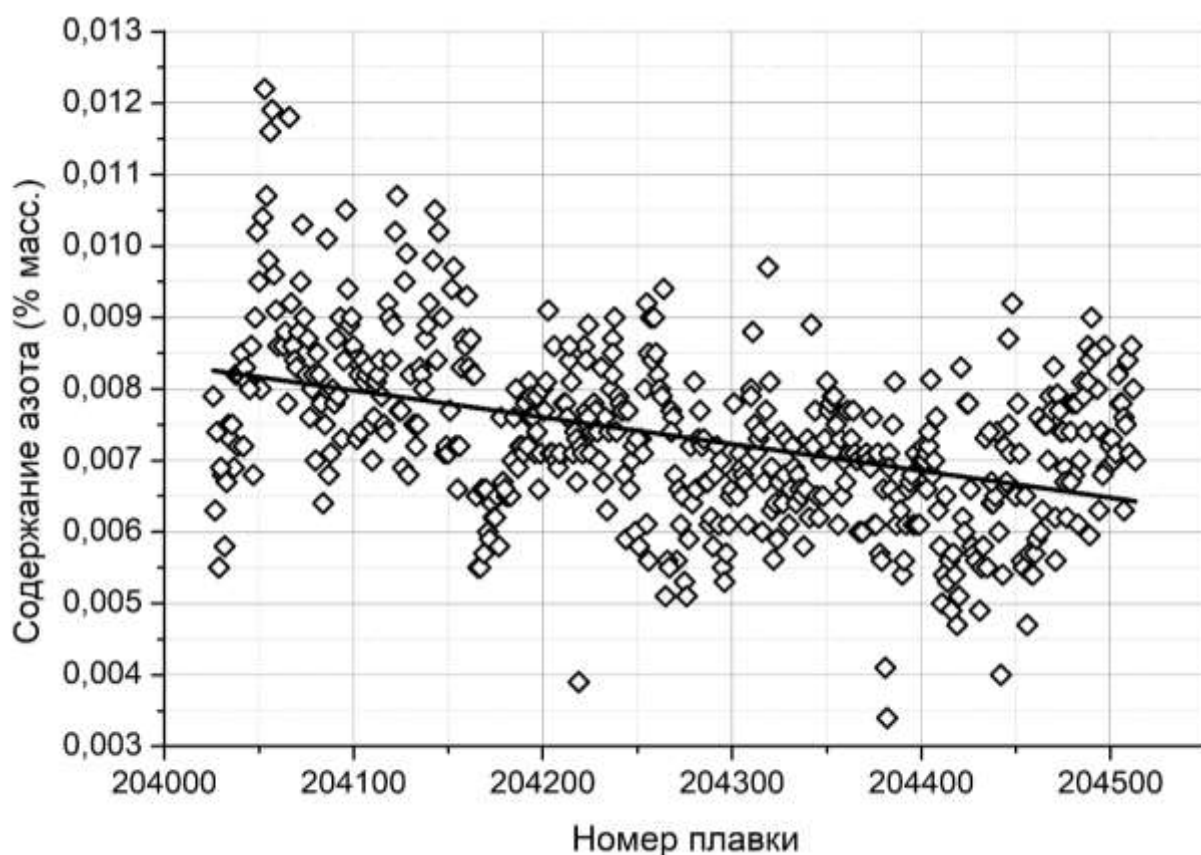


Рисунок 4.6. Содержание азота в полупродукте на выпуске из ДСП в ЭСПЦ ММЗ, после внедрения технологии

Поведение азота при выплавке остальных марок стали, выплавляемых в ДСП-2 ЭСПЦ ММЗ по обычной технологии в тот же период времени, не изменилось.

При выплавке стали на большинстве современных сверхмощных ДСП, практикуется интенсивное вдувание углеродистого порошка на заключительном отрезке плавки (10–15 мин), с целью поддержания режима "затопленных дуг" и довосстановления железа из шлака. Происходящее при этом вскипание шлака должно, с одной стороны, усиливать массообменные процессы в его объеме, включая и описанный выше вынос азота, а с другой – раскисление поверхности углеродом снижает перепад окисленности, что должно оказывать прямо

противоположное влияние на итоговое содержание азота. В литературе отмечалась повышение среднего уровня азота в заключительный период плавки с выбросами на отдельных плавках до 0,015–0,020% масс. [15] (раздел 1.1). В экспериментах и промышленном опробовании технологических изменений при выплавке стали 70 в условиях ЭСПЦ ММЗ было показано, что отмена операции раскисления шлака коксом полностью устраняет указанные выбросы и стабилизирует содержание азота в конце плавки на уровне ~0,005 % масс. Поскольку равновесное с твёрдым углеродом давление кислорода при 1600°C составляет $\sim 10^{-15}$ атм., слишком плотное покрытие углеродистым порошком поверхности шлака может не только уменьшить градиент окисленности в шлаковом слое, но и изменить его направление на обратное.

Отдача кокса на поверхность шлака (так называемое диффузионное раскисление) широко практиковалась в мартеновских и дуговых печах, работающих по "классической" технологии, однако какой-либо связи этой операции с содержанием азота в известной нам литературе не отмечено. Экспериментальное исследование этого вопроса в процессе электрошлакового переплава [494] показали, что содержание азота в металле при раскислении поверхности шлака углеродистыми материалами в сильной степени зависит от условий проведения этой операции – вида вводимого материала, его дисперсности и др.

Поэтому представляло определённый интерес уточнение этого вопроса применительно к условиям выплавки стали в сверхмощной ДСП. Исследования проводились на базе электросталеплавильного цеха Донецкого электрометаллургического завода (в настоящее время ООО "ДМЗ") на печи ДСП-2. Номинальная ёмкость печи 120 тонн, номинальная мощность трансформатора 87МВА. Содержание азота в металле на выпуске из печи довольно стабильно и находится в пределах от 0,004% масс. до 0,009 % масс. при среднем содержании 0,0063 % масс.

Результаты определения содержания азота в металле анализировали совместно с паспортами плавов и результатами химического состава металла, пробы на который отбирали одновременно с пробами металла на азот. Всего было отслежено поведение содержания азота на 26 плавках, проведённых двумя сериями (табл.4.3, 4.4).

Таблица 4.3. Содержание азота в стали (первая серия плавов ДСП-2 ЭСПЦ ДМЗ)

| № плавки | Проба | Содержание азота, % масс. | Изменение азота, % масс. | Количество порошка С в окислит. период, кг | Количество кислорода в окислит. период, м ³ | Отношение Мс/Мо в окислит период |
|----------|-------|---------------------------|--------------------------|--|--|----------------------------------|
| 21589 | 1 | 0,0055 | 0,0002 | 723 | 1336 | 0,541 |
| 21589 | 2 | 0,0057 | | | | |
| 21607 | 1 | 0,0058 | 0,002 | 105 | 547,44 | 0,191 |
| 21607 | 2 | 0,0078 | | | | |
| 21609 | 1 | 0,0055 | 0,0006 | 635 | 1752,83 | 0,362 |
| 21609 | 3 | 0,0061 | | | | |
| 21613 | 1 | 0,0065 | 0,001 | 430 | 1192,63 | 0,36 |
| 21613 | 2 | 0,0055 | | | | |
| 21615 | 1 | 0,0058 | 0,0002 | 734 | 1608,68 | 0,456 |
| 21615 | 3 | 0,0056 | | | | |
| 21616 | 1 | 0,0057 | 0,0004 | 608 | 1525,5 | 0,398 |
| 21616 | 2 | 0,0061 | | | | |
| 21629 | 1 | 0,006 | 0,0005 | 908 | 1120,59 | 0,81 |
| 21629 | 2 | 0,0055 | | | | |
| 21630 | 1 | 0,0054 | 0,0008 | 668 | 900,63 | 0,741 |
| 21630 | 2 | 0,0046 | | | | |
| 21631 | 1 | 0,0053 | 0,0003 | 1099 | 2238,1 | 0,491 |
| 21631 | 2 | 0,0056 | | | | |
| 21638 | 1 | 0,0055 | 0,0002 | 508 | 952,05 | 0,533 |
| 21638 | 2 | 0,0057 | | | | |
| 21660 | 1 | 0,0061 | 0,0023 | 633 | 1396,39 | 0,453 |
| 21660 | 2 | 0,0038 | | | | |
| 21689 | 1 | 0,0064 | 0,0002 | 884 | 1881,55 | 0,469 |
| 21689 | 2 | 0,0062 | | | | |
| 21692 | 1 | 0,0061 | 0,0002 | 718 | 1069,52 | 0,671 |
| 21692 | 3 | 0,0059 | | | | |
| 21694 | 1 | 0,0064 | 0,0014 | 376 | 1099,53 | 0,341 |
| 21694 | 3 | 0,005 | | | | |

Таблица 4.4. Содержание азота в стали (вторая серия плавов ДСП-2 ЭСПЦ ДЭМЗ)

| № плавки | Проба | Содержание азота, % масс. | Изменение азота, % масс. | Количество углеродного порошка в окислит. период, кг | Количество кислорода в окислит. период, м ³ | Отношение Мс/Мо в окислит период |
|----------|-------|---------------------------|--------------------------|--|--|----------------------------------|
| 22453 | 1 | 0,0090 | 0,0007 | 987 | 1789,5 | 0,386 |
| 22453 | 2 | 0,0083 | | | | |
| 22454 | 1 | 0,0080 | 0,0005 | 495 | 781 | 0,443 |
| 22454 | 2 | 0,0075 | | | | |
| 22455 | 1 | 0,0080 | 0,0004 | 866 | 1261,5 | 0,480 |
| 22455 | 2 | 0,0084 | | | | |
| 22456 | 1 | 0,0076 | 0 | 602 | 930 | 0,453 |
| 22456 | 2 | 0,0076 | | | | |
| 22457 | 1 | 0,0075 | 0,0012 | 536 | 1077 | 0,348 |
| 22457 | 2 | 0,0087 | | | | |
| 22458 | 1 | 0,0089 | 0,0003 | 325 | 925 | 0,245 |
| 22458 | 2 | 0,0086 | | | | |
| 22459 | 1 | 0,0073 | 0,0001 | 416 | 1119,5 | 0,26 |
| 22459 | 2 | 0,0072 | | | | |
| 22460 | 2 | 0,0083 | 0,0004 | 491 | 1118,5 | 0,307 |
| 22460 | 2 | 0,0079 | | | | |
| 22461 | 1 | 0,0084 | 0,0003 | 420 | 1094,5 | 0,268 |
| 22461 | 2 | 0,0081 | | | | |
| 22462 | 1 | 0,0073 | 0 | 672 | 974,5 | 0,482 |
| 22462 | 2 | 0,0073 | | | | |
| 22463 | 1 | 0,0093 | 0,0004 | 575 | 1364,5 | 0,294 |
| 22463 | 2 | 0,0089 | | | | |
| 22464 | 1 | 0,0064 | 0,0014 | 423 | 1061,5 | 0,278 |
| 22464 | 2 | 0,0078 | | | | |

Анализ влияния скорости подачи углеродистого порошка для вспенивания шлака в период доводки на величину изменения содержания азота в металле за время между отборами проб показал наличие слабой связи между этими параметрами (рис.4.7, табл.4.5).

Несмотря на низкое значение коэффициента детерминации влияния интенсивности ввода порошка углерода на изменение содержания азота в металле ($R^2=0,077$), коэффициенты регрессионной зависимости на рис.4.7 являются

значимыми (табл.4.5) с уровнем достоверности в 90% и зависимость является обратной слабой ($-0,5 < R = -0,337 < 0$).

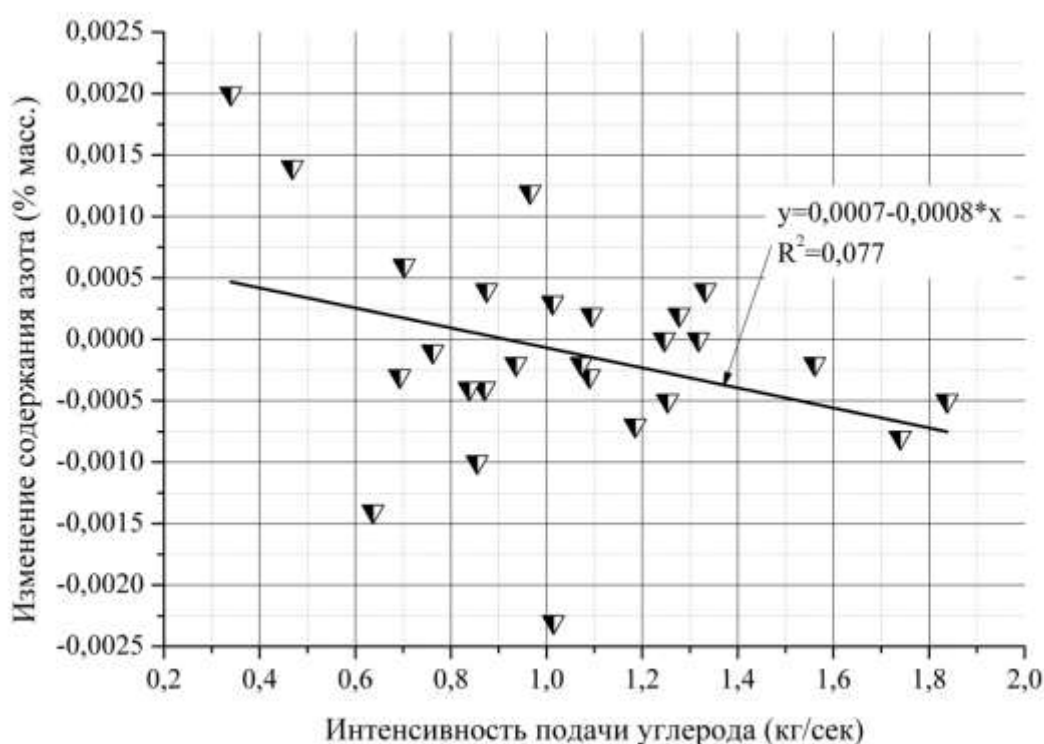


Рисунок 4.7. Влияние интенсивности подачи углеродистого порошка для вспенивания шлака в окислительный период на изменение содержания азота в металле

Таблица 4.5. Результаты корреляционного анализа влияния интенсивности подачи углеродистого порошка на изменение содержания азота в металле

| | | | |
|---|---|---|-----------------------|
| Число наблюдений - 26 | Коэффициент корреляции $R = -0,337$ Коэффициент детерминации $R^2 = 0,114$ Уточнённый коэффициент детерминации $R^2 = 0,077$ Значение F-критерия $F(1,24) = 3,0736$ Уровень значимости гипотезы $p < 0,09234$ | | |
| Наименование коэффициента регрессии в уравнении $y = a + b * x$ | Значение коэффициента регрессии | Стандартная ошибка коэффициента регрессии | t-критерий Стьюдента, |
| a | 0,000744 | 0,000508 | 1,4648 |
| b | -0,000814 | 0,000464 | -1,7532 |

Примечание: x – интенсивность ввода порошка углерода, кг/сек.

В условиях режимов работы ДСП-2 ДМЗ с увеличением интенсивности подачи углеродистого порошка для вспенивания шлака в процессе доводки металла в ДСП содержание азота в металле снижается.

Известны многочисленные исследования, показывающие, что увеличение продолжительности "кипения" металла за счёт выделения CO уменьшает содержание азота в полупродукте, например, [15, 183]. В идеале для кислородного конвертера достигаются концентрации ниже 0,001% масс. Представляет интерес влияния технических и технологических параметров дуговой сталеплавильной печи на содержание азота в полупродукте, кроме подачи углеродистого материалов в печь рассмотренных выше. Особенно это важно для производства полупродукта сталей, где содержание нитридов в готовом металле нормируется, например, канатных сталей.

В рамках проведения исследовательских работ на ПАО "Северсталь" (г. Череповец, РФ) по отработке технологии выплавки полупродукта в шахтной дуговой печи с повышенной до 55% доли жидкого чугуна в завалке был получен массив данных по влиянию технологических параметров плавки полупродукта на содержание азота в металле. Корреляционный анализ массива из 220 опытно-промышленных плавов, проведенных в 2013 году, выявил следующие значимые факторы (табл.4.6) влияния на содержание азота в полупродукте перед выпуском в сталеразливочный ковш.

Только один технологический параметр процесса выплавки – износ футеровки стен и подины печи – имеет коэффициент корреляции выше 0,5. Корреляционный анализ влияния стойкости футеровки стен и подины на содержание азота в полупродукте представлен в табл.4.7 и на рис.4.8.

Высокие значения коэффициента корреляции и коэффициента детерминации влияния износа футеровки стен и подины на содержание азота в полупродукте может быть объяснено тем, что по мере износа футеровки в силу конструктивных особенностей шахтной печи увеличивается расстояние между выходным срезом дутьевых устройств и ванной металла (см. рис. 4.9).

Таблица 4.6. Коэффициенты корреляции технических параметров опытно-промышленных плавов в ШП-2 (ЭСПЦ ПАО "Северсталь") и содержанием азота в металле (уровень значимости 0,05)

| Наименование параметра | Содержание азота в металле, % масс |
|---|------------------------------------|
| Вес шлакообразующих, т | -0,1471 |
| Длительность бестоковых периодов работы, мин. | - 0,14096 |
| Содержание углерода в металле на выпуске из печи, %. | 0,2989 |
| Удельный расход кислорода на 1 тонну полупродукта, $\text{нм}^3/\text{т}$. | - 0,2497 |
| Удельный расход кокса на 1 тонну полупродукта, кг/т | 0,2645 |
| Содержание CaO в шлаке, % | 0,2257 |
| Содержание MnO в шлаке, % | - 0,3067 |
| Содержание MgO в шлаке, % | - 0,17297 |
| Содержание Al_2O_3 в шлаке, % | - 0,2213 |
| Содержание P_2O_5 в шлаке, % | 0,2183 |
| Содержание серы в шлаке, % | 0,2157 |
| Основность шлака | 0,2188 |
| Износ футеровки стен и подины, плавов | 0,6501 |
| Выход полупродукта из физического веса металлошихты, доли | - 0,2170 |

Таблица 4.7. Результаты регрессионного анализа влияния интенсивности кислородной продувки на часовую производительность ШП-2 ЭСПЦ ПАО "Северсталь"

| | | | | |
|---|---|-------------------------|--------|-------------------------|
| Число наблюдений - 220 | Коэффициент корреляции $R=0,65014$ Коэффициент детерминации $R^2=0,42268$ Уточнённый коэффициент детерминации $R^2=0,42$ Значение F-критерия $F(1,218)=159,61$ Уровень значимости гипотезы $p<0,0000$ Стандартная ошибка оценки: 0,00108 | | | |
| Вид уравнения регрессии | $y = a + b \cdot x$ | | | |
| Уравнение регрессии | $y = 0,0039 + 3,4824 \cdot 10^{-6} \cdot x$ (4.2) | | | |
| Значимость зависимости | значима | | | |
| Коэффициенты регрессионного уравнения (уровень значимости $\alpha=0,05$) | значение | стандартная ошибка | t-тест | значимость коэффициента |
| a | 0,0039084 | $1,5455 \times 10^{-4}$ | 25,29 | значимый |
| b | $3,4824 \times 10^{-6}$ | $2,7564 \times 10^{-7}$ | 12,63 | значимый |

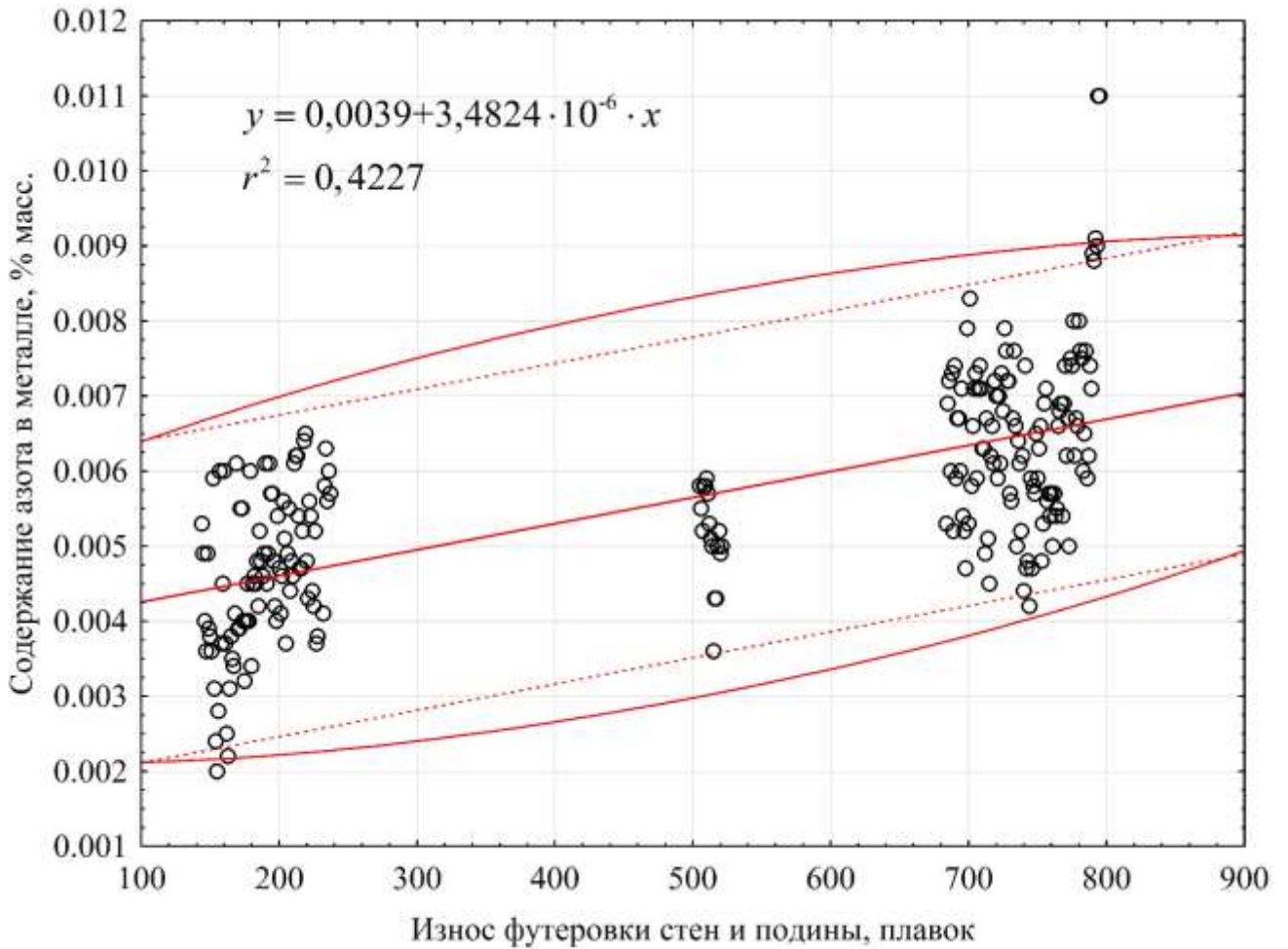


Рисунок 4.8. Влияние износа футеровки на содержание азота в полупродукте на опытно-промышленных плавках в ШП-2 ЭСПЦ ПАО "Северсталь"

Это приводит к увеличению рассеивания струи и росту эжектированного газа из внутреннего пространства печи в струю кислорода. Таким образом, с увеличением износа футеровки падает чистота кислородной струи по азоту и, соответственно, растёт содержание азота в полупродукте.

Оценка предельных углов наклона кислородного инжектора к вертикали показала следующие результаты. Для стабилизации точки входа кислородной струи в ванну при снижении уровня спокойной жидкой ванны вследствие износа рабочего слоя футеровки (переход из точки встречи А последовательно в точки В₁ и В₂ рис.4.9) необходимо изменение угла на величины, указанные в табл.4.8.

- 3) модернизировать имеющуюся на ШП-2 сводовую кислородную фурму для обеспечения большей глубины погружения в рабочее пространство печи и увеличения расхода кислорода на ней с целью обеспечения большей эффективности перемешивания шлакометаллической ванны и кислорода и, тем самым, большей эффективности деазотации металлического расплава выделяющимся СО.

Предложенные рекомендации вошли в техническое задание на разработку проекта новой дуговой сталеплавильной печи ЭСПЦ ПАО "Северсталь", пуск которой состоялся в апреле 2021 года.

Анализ изменения концентрации азота (разность между значений последней и первой пробой) при внепечной обработке стали в ЭСПЦ ММЗ (рис.4.10) показал, что за время обработки стали на установке ковш – печь содержание азота возрастает в среднем на 0,0006 % масс.

С целью снижения прироста содержания азота при обработке стали на установке ковш-печь было проведено пять экспериментальных обработок - плавки 204467 (сталь GR-60), 204521 (сталь 1008), 206175 (сталь GR-60), 206177(сталь GR-60), 206199 (сталь 1012). При их проведении аналогично изменениям в технологии выплавки на ДСП были использованы следующие технологические приёмы:

- исключена подача углеродистых материалов на поверхность шлака;
- организован обдув поверхности шлака кислородом;
- обеспечена максимально возможная интенсивность подачи аргона для продувки через продувочные устройства днище ковша, при которой не происходит оголение металла.

Результаты химического анализа на содержание азота в металле и химического анализа шлаков приведены соответственно в табл.4.9 и табл.4.10.

Анализируя полученные данные можно отметить следующие моменты:

- согласно статистическому анализу первичных промышленных данных на стадии внепечной обработки происходит некоторое повышение содержания азота ~ 0,0006 % (предположительно – вследствие оголения центральной части зеркала металла при донной продувке);

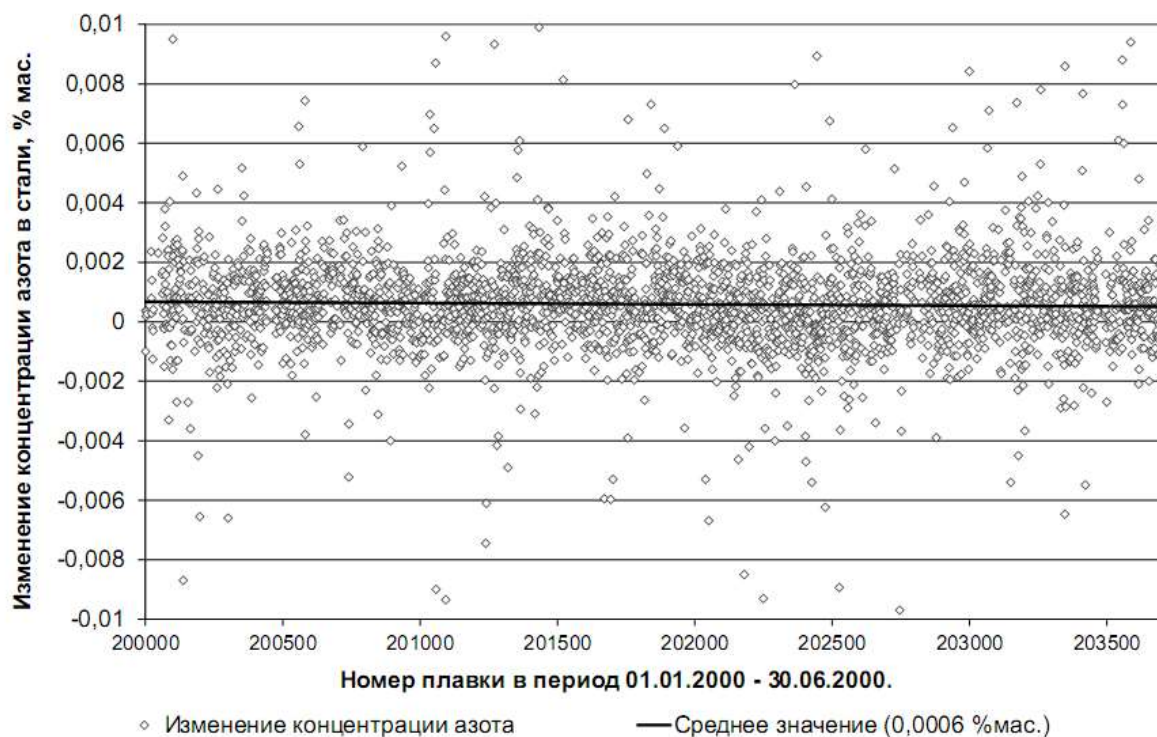


Рисунок 4.10. Изменение концентрации азота в стали при её обработке на установке ковш – печь ЭСПЦ ММЗ

Таблица 4.9. Результаты анализа проб металла на содержание азота при экспериментах на установке ковш-печь ЭСПЦ ММЗ

| Номер плавки | Номер пробы | Время обдува | Содержание азота, % масс. | |
|--------------|--------------------------------------|--------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | Экспресс-анализ в ЭСПЦ ММЗ | ЦЗЛ ММЗ, вакуум-плавление |
| 204467 | 1кп | | 0.0081 | 0.007 |
| | 2кп (после ввода кокса, до обдува) | 5 мин | 0.0099 | 0.008 |
| | 3кп (после обдува кислородом 5 мин) | | 0.0081 | 0.009 |
| | 4кп | | 0.0083 (16,2) | 0.008 |
| 204521 | 1кп | | 0.0038 | 0.007 |
| | 2кп (после ввода кокса, до обдува) | 8 мин | 0.0063 | 0.007 |
| | 3кп (после обдува кислородом 8 мин) | | 0.0056 | 0.007 |
| | 4кп (до второго обдува) | 5 мин | 0.0057 | 0.007 |
| | 5кп (после обдува кислородом 5 мин) | | 0.0050 (20,6) | 0.007 |
| 206175 | 1 кп | | 0.0071 | 0.006 |
| | 3 кп (до обдува кислородом) | 5 мин | 0.0066 | 0.006 |
| | 4 кп (после обдува кислородом 5 мин) | | 0.0066 (0) | 0.006 |

| Номер плавки | Номер пробы | Время обдува | Содержание азота, % масс. | |
|--------------|---------------------------------------|--------------|----------------------------|---------------------------|
| | | | Экспресс-анализ в ЭСПЦ ММЗ | ЦЗЛ ММЗ, вакуум-плавление |
| 206177 | 1 кп | | 0.0082 | 0.006 |
| | 3 кп (до обдува кислородом) | 5 мин | 0.0075 | 0.007 |
| | 4 кп (после обдува кислородом 5 мин) | | нет | 0.007 |
| 206199 | 1 кп | | 0.0089 | 0.010 |
| | 2 кп (до обдува кислородом) | 15 мин | 0.0088 | 0.010 |
| | 3 кп (после обдува кислородом 15 мин) | | 0.0085 | 0.010 |
| | 4 кп (после отстоя) | | 0.0077 (9,4) | Нет |

Примечание: в данных экспресс-анализа в скобках указан уровень снижения азота.

Таблица 4.10. Результаты химического анализа состава ковшевого шлака при обработке на установке ковш-печь

| Номер плавки | Номер пробы | Массовая доля, % | | | | | | | | |
|--------------|-------------|--------------------------------|------------------|-------------------------------|------|------------------|--------------------------------|-----|------|--------------------|
| | | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | P ₂ O ₅ | CaO | TiO ₂ | Cr ₂ O ₃ | MnO | MgO | Fe _{общ.} |
| 204467 | 1кп | 2.8 | 27.5 | 0.05 | 51.5 | 0.20 | <0.2 | 0.9 | 11.5 | 0.6 |
| | 2кп | 2.8 | 30.0 | 0.05 | 51.0 | 0.25 | <0.2 | 0.7 | 10.5 | 0.5 |
| | 3кп | 2.8 | 28.0 | 0.05 | 52.0 | 0.20 | <0.2 | 0.7 | 9.2 | 1.7 |
| 204521 | 1кп | 12.6 | 24.0 | - | 50.0 | - | - | 0.3 | 8.5 | <0.5 |
| | 2кп | 11.4 | 25.0 | - | 50.6 | - | - | 0.6 | 8.0 | 0.8 |
| | 3кп | 10.8 | 27.5 | - | 51.5 | - | - | 0.4 | 7.3 | 0.5 |

- в отдельных наблюдениях получено снижение от 0,0012 до 0,0016% масс., на двух плавках эффекта не наблюдалось, случаев повышения содержания азота не отмечено;
- несмотря на незначительный эффект (0–0,0016 % масс.) средняя величина удаления азота (по всем опытам) составила 9,2 %, что близко к обычному уровню деазотации на специализированных внепечных агрегатах.

Таким образом, на основании развития теоретических представлений о поведении азота в процессе окислительного рафинирования предложена и реализована на практике технология выплавки в сверхмощной дуговой сталеплавильной печи и внепечной обработки углеродистой стали на установке

ковш-печь, обеспечивающей получение стали с содержанием азота на уровне 0,006–0,007 % масс.

4.2. Разработка промышленных технологий производства слитков сталей, легированных азотом

Современная схема производства азотсодержащих сталей без использования агрегатов, работающих при высоком давлении, представляет собой, как правило, двухстадийное производство [380, 381, 383, 385]: первая стадия – выплавка стали в дуговой печи, рафинирование во внепечных агрегатах и разливка в слитки – расходуемые электроды; вторая стадия – электрошлаковый переплав с целью получения плотной и однородной структуры слитка. Необходимость проведения ЭШП связано в первую очередь с тем, что слитки азотсодержащих сталей, полученных традиционным способом сифонной разливки, имеют высокую сегрегацию легирующих элементов и макродефекты структуры литого металла, которые невозможно устранить последующими видами передела кроме переплава. Так, например, исследование литых слитков производства предприятия Silbitz Guss (ФРГ) показали следующий разброс значений содержания основных компонентов (см. табл.4.11).

Кроме того, при затвердевании слитков азотсодержащих сталей за счет скачкообразного изменения растворимости азота в жидком металле и δ -феррите может развиваться процесс выделения газообразного азота на фронте кристаллизации, приводящий к макродефектам слитка: на поперечных темплетах слитка №1, указанного в табл.4.11, обнаружены разрыхления и пористость глубиной залегания до 17 мм (рис. 4.11, 4.12), на поперечных темплетах слитка №2, указанного в табл. 4.11, наблюдается осевая пористость 3 балла, у поверхности слитка разрыхления и пористость глубиной залегания до 7 мм (рис. 4.13, 4.14).

Таким образом, зачастую получить сифонной разливкой качественные слитки сталей, содержащих азот, затруднительно.

Таблица 4.1.1. Результаты химического анализа состава слитков стали 12X18AG18 производства Silbitz Guss (ФРГ)

| Наименование | | Содержание компонентов стали, % масс. | | | | | | | | | |
|---|---|---------------------------------------|---------------|--------------|--------------|--------|---------|--------|--------------|--------|-------|
| | | C | Si | Mn | P | S | Cr | N | V | Ni | |
| Требования ТУ-24.00.4821-89 | Мин. значение | 0 | 0,2 | 17,5 | 0 | 0 | 17,5 | 0,5 | 0 | 0 | |
| | Макс. значение | 0,12 | 0,8 | 20,0 | 0,045 | 0,01 | 20,0 | 0,7 | 0,1 | 0,5 | |
| Данные сертификата на партию слитков №09-86487 | | 0,0641 | 0,351 | 17,7864 | 0,0275 | 0,0063 | 17,5926 | 0,5183 | 0,049 | 0,4592 | |
| Результаты входного контроля на предприя- тии А (РФ) | Слиток 1 | Дно слитка | 0,061 | 0,253 | 17,64 | 0,018 | 0,001 | 18,25 | 0,454 | 0,006 | 0,488 |
| | Голова слитка | 1/2 радиуса | 0,059 | 0,254 | 17,63 | 0,019 | 0,001 | 18,21 | 0,457 | 0,006 | 0,486 |
| | | центр | 0,959 | 0,251 | 17,70 | 0,018 | 0,001 | 18,27 | 0,450 | 0,006 | 0,488 |
| | Слиток 2 | Дно слитка | 0,055 | 0,251 | 17,36 | 0,016 | 0,001 | 18,21 | 0,437 | 0,006 | 0,478 |
| | | Голова слитка | 0,059 | 0,248 | 17,48 | 0,017 | 0,001 | 18,21 | 0,466 | 0,006 | 0,485 |
| | Усредненные значения состава двух слитков | Слиток 1 | Дно слитка | 0,060 | 0,257 | 17,62 | 0,019 | 0,002 | 18,25 | 0,454 | 0,007 |
| Голова слитка | | | 0,065 | 0,252 | 17,95 | 0,021 | 0,001 | 18,27 | 0,475 | 0,007 | 0,497 |
| Слиток 2 | | Дно слитка | 0,063 | 0,254 | 17,8 | 0,018 | 0,001 | 18,19 | 0,478 | 0,006 | 0,487 |
| | | Голова слитка | 0,049 | 0,252 | 17,16 | 0,012 | 0,002 | 18,17 | 0,387 | 0,006 | 0,461 |
| Среднее | | Дно слитка | 0,061 | 0,260 | 17,61 | 0,019 | 0,001 | 18,29 | 0,469 | 0,007 | 0,488 |
| | | Голова слитка | 0,057 | 0,253 | 17,38 | 0,018 | 0,001 | 18,23 | 0,451 | 0,006 | 0,473 |
| Итого | | 0,055 | 0,257 | 17,23 | 0,018 | 0,001 | 18,24 | 0,433 | 0,007 | 0,469 | |
| Усредненные значения состава двух слитков | | 0,059 | 0,254 | 17,547 | 0,0178 | 0,0012 | 18,2325 | 0,4509 | 0,006 | 0,4823 | |

Примечание: красным цветом и жирным шрифтом выделены значения, выходящие за рамки нормативных требований.

Для ликвидации возможности газовыделения из кристаллизующегося расплава металла необходима решение следующих задач:

- 1) провести анализ возможности коррекции температуры ввода азотированного ферросплава в расплав стали для чего оценить температуру ликвидус целевого состава азотированной стали с температурами ввода азотированного ферросплава в расплав и начала процесса разливки, зафиксированных в технологической инструкции (далее ТИ) на конкретную марку азотсодержащей стали;
- 2) определить предельную растворимость азота в расплаве стали при температуре ввода, указанной в действующей ТИ и уточнённой температуре ввода азотированного ферросплава в жидкий металл;
- 3) оценить возможность газообразования при кристаллизации жидкого металла и определить возможность изменения целевого состава стали (в рамках допустимого нормативной документацией разбега минимальной и максимальной концентрации компонента в стали) для ликвидации причин газообразования.

По предложенному алгоритму были уточнены и для некоторых марок стали созданы впервые (для предприятия А (РФ)) (см. табл. 4.12) технологические инструкции на выплавку, внепечную обработку, разливку сталей, а также технологические инструкции на электрошлаковый переплав этих же марок сталей и соответствующую этим ТИ карты технологического процесса (далее КТП).

Первичную оценку температуры ликвидус сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11М2АФБ провели по формулам (1.30)–(1.59). Однако значительный разброс величин растворимости азота в жидком металле (так для целевого состава стали 08X18H5Г12АБ при $T = 1580^{\circ}\text{C}$: $[N]_{\min} = 0,237 \%$ масс., $[N]_{\max} = 0,639 \%$ масс.) обусловил необходимость уточнения метода оценки.

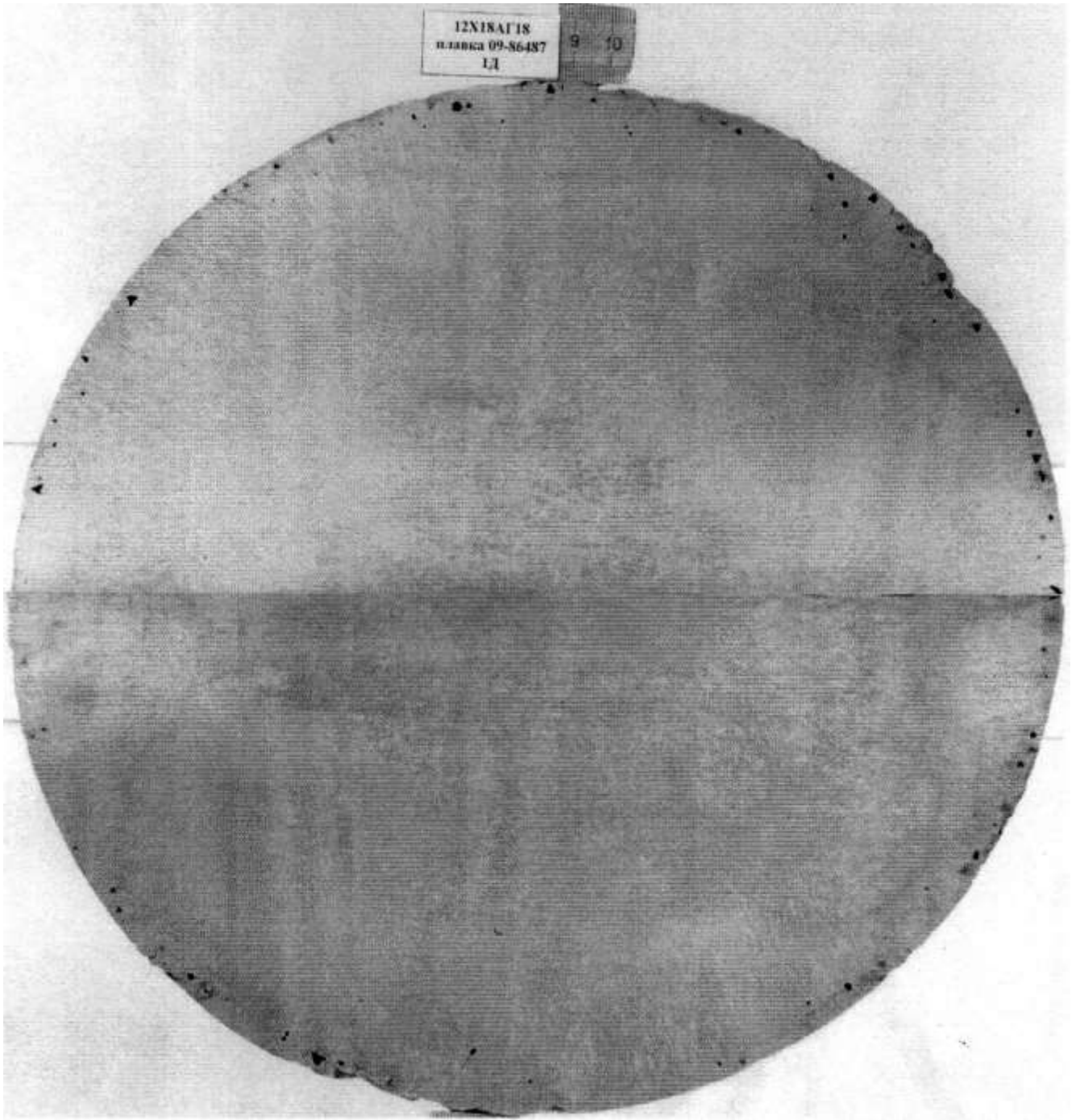


Рисунок 4.11. Макроструктура поперечного темплета слитка 1 сталь 12X18AG18
партия №09-86487, донная часть

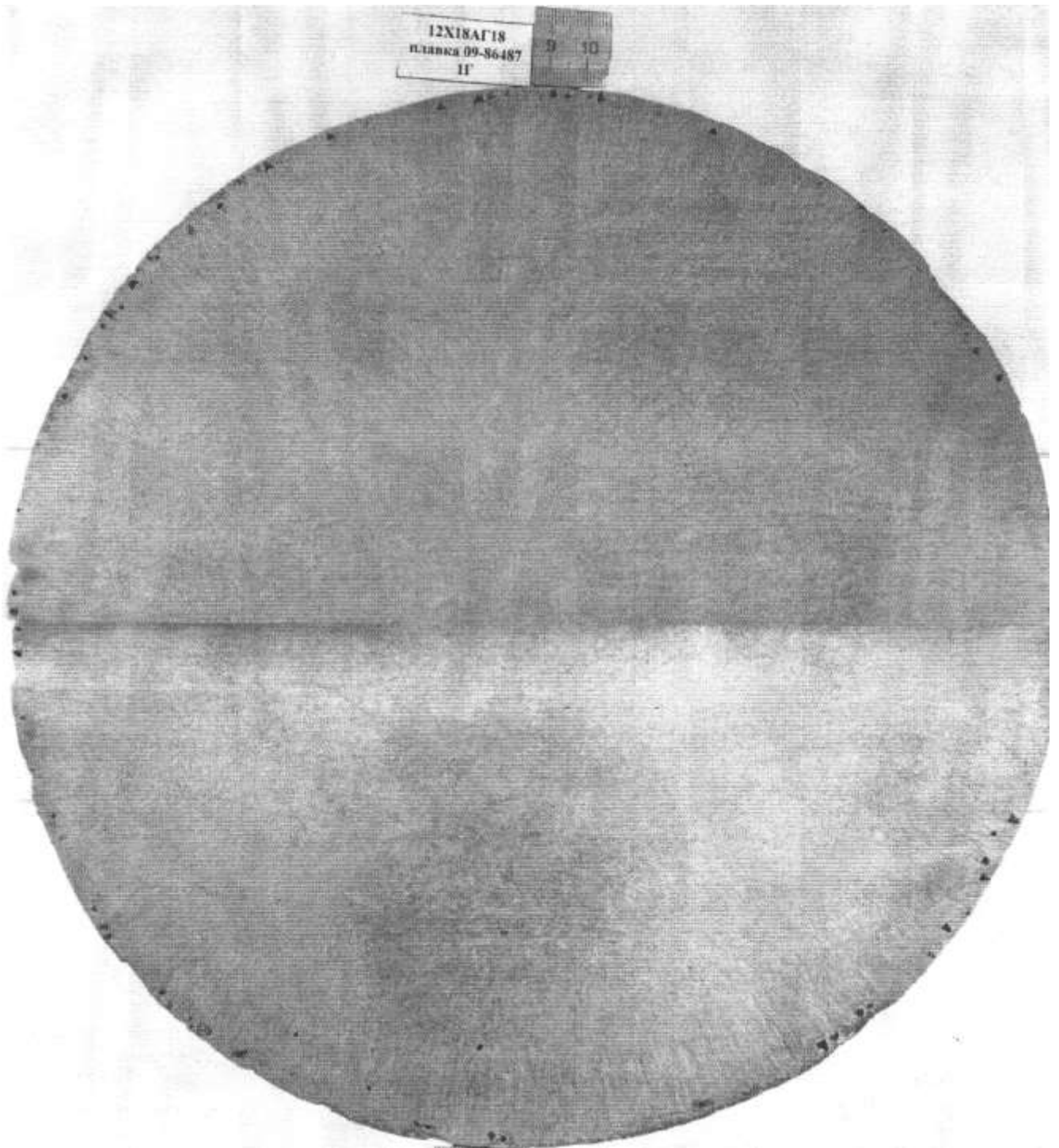


Рисунок 4.12. Макроструктура поперечного темплета слитка 1 сталь 12X18AG18
партия №09-86487, головная часть

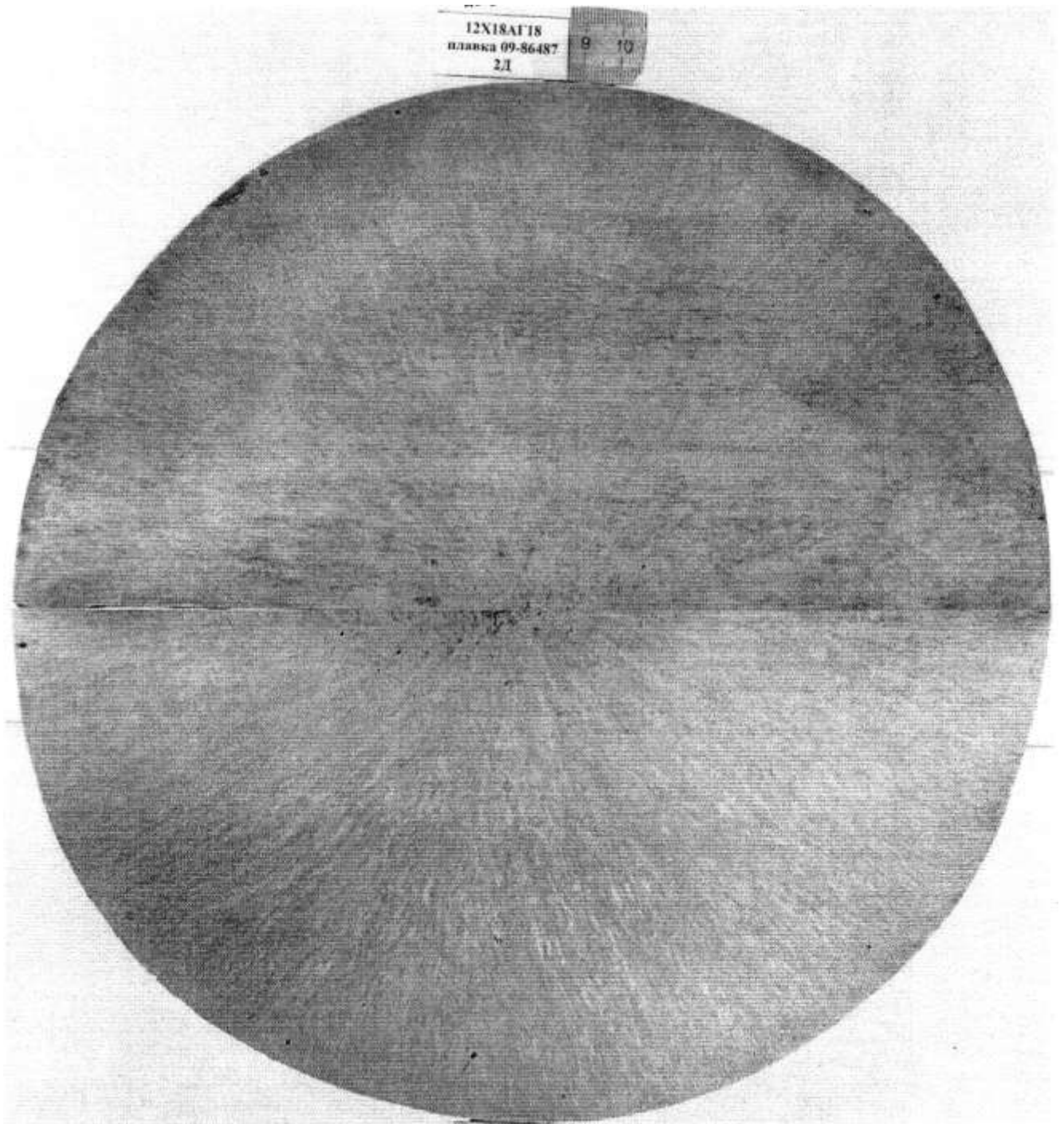


Рисунок 4.13. Макроструктура поперечного темплета слитка 2 сталь 12X18AG18
партия №09-86487, донная часть

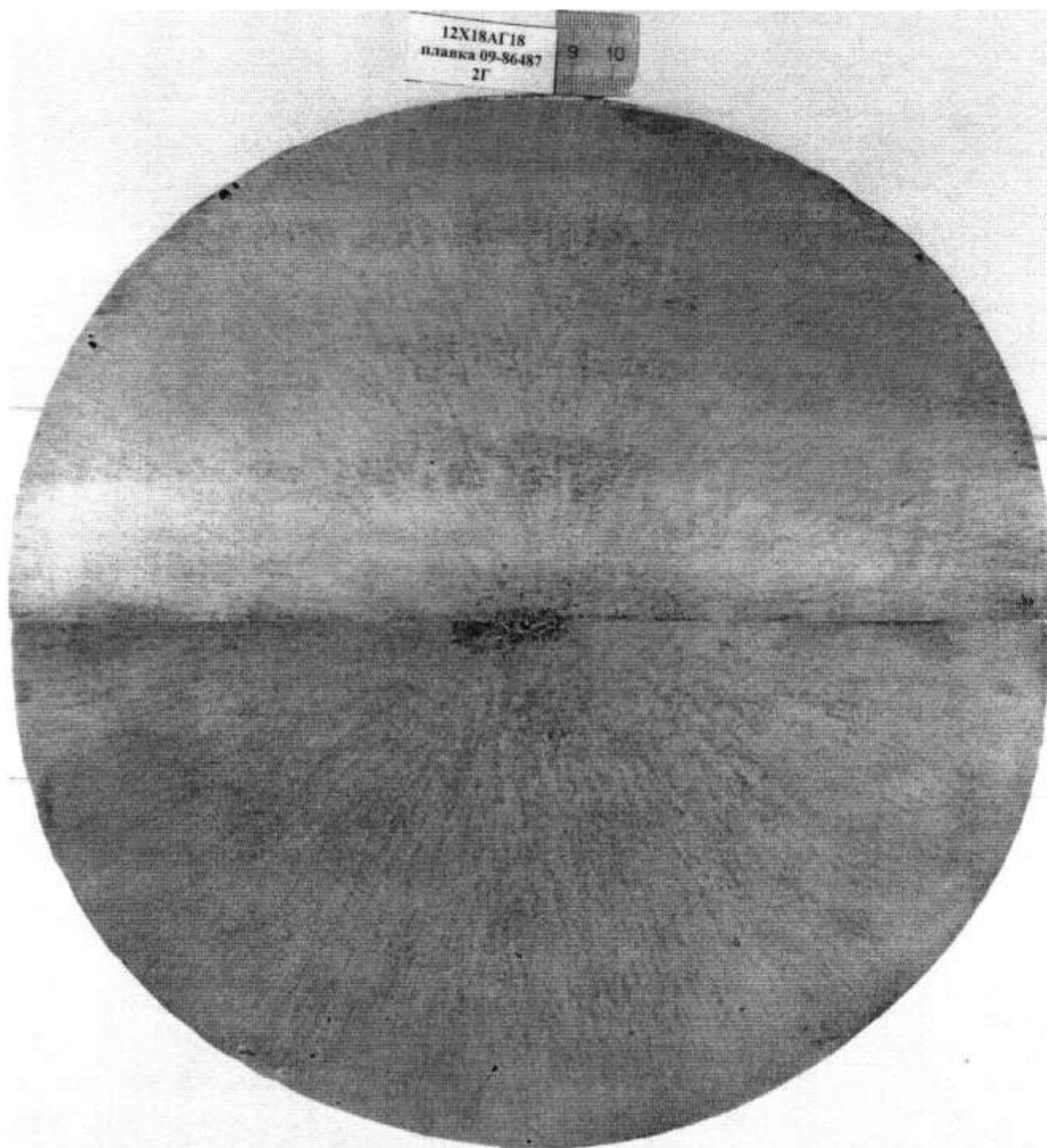


Рисунок 4.14. Макроструктура поперечного темплета слитка 2 сталь 12X18AG18
партия №09-86487, головная часть

Таблица 4.12. Нормативные требования к химическому составу азотсодержащих сталей

| Наименование стали | Наименование НТД | Граница содержания | Содержание компонентов сталей, % масс. | | | | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------------------------|-----------------------|--|-------|------|--------|--------|------|-------|-------|------|-----------|-------|--|--|
| | | | C | Si | Mn | P | S | Cr | N | V | Ni | Nb | Mo | | |
| 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) | ТУ 14-1-784-73 | Мин. | 0 | 0 | 11,5 | 0 | 0 | 18,0 | 0,45 | 0,2 | 4,5 | Nb+Ta=0,8 | | | |
| | | Макс. | 0,08 | 0,8 | 13,5 | 0,045 | 0,03 | 19,5 | 0,52 | 0,35 | 5,5 | Nb+Ta=1,1 | | | |
| | | Допустимые отклонения | +0,01 | +0,2 | +0,5 | +0,005 | | +0,5 | +0,03 | | | +0,5 | ±0,01 | | |
| 12X18АГ18 | ТУ 24.00.4821-89 | Мин. | 0 | 0,2 | 17,5 | 0 | 0 | 17,5 | 0,5 | 0 | 0 | | | | |
| | | Макс. | 0,12 | 0,8 | 20,0 | 0,045 | 0,01 | 20,0 | 0,7 | 0,1 | 0,5 | | | | |
| | | Допустимые отклонения | +0,01 | +0,05 | +1,0 | | | ±0,5 | +0,05 | +0,03 | +0,1 | ±0,03 | | | |
| 04X20H6Г11M2АФБ | ТУ 24.10.22-194-07516250-2018 | Мин. | 0 | 0,1 | 10,0 | 0 | 0 | 18,5 | 0,45 | 0,10 | 6,5 | 0,10 | 1,20 | | |
| | | Макс. | 0,04 | 0,4 | 12,0 | 0,020 | 0,01 | 19,5 | 0,53 | 0,20 | 8,0 | 0,20 | 1,70 | | |
| | | Допустимые отклонения | +0,02 | | | +0,001 | +0,001 | | | -0,05 | | | ±0,03 | | |

Было проведено моделирование в пакете прикладных программ Thermo-Calc с целью уточнения температуры ликвидус и солидус сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11М2АФБ, а также прогноза температур начала и окончания выделения азота из расплава металла при заданном уровне легирования стали азотом.

Для каждой марки стали были составлены матрицы экспериментов (Приложения А, Б, В), учитывающие влияние состава нормируемых элементов и температуры на искомые величины и содержание азота в затвердевшем металле при атмосферном давлении.

Статистическая обработка результатов термодинамического моделирования позволила получить следующие регрессионные зависимости (температура в градусах Цельсия, растворимость азота в % масс.):

- температура ликвидус T_{lic} стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ)

$$T_{lic} = 1532,74 - 82,81[C] - 12,08[Si] - 4,39[Mn] - 4,16[Ni] - 28,02[S] - 51,56[P] - 2,04[Cr] - 1,67[V] - 36,16[N] - 9,38[Nb], \quad (4.3)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 2,07$;

- температура ликвидус T_{lic} стали 12X18АГ18 (линейная зависимость)

$$T_{lic} = 1477,84 - 98,67[C] - 18,98[Si] - 3,51[Mn] - 4,63[Ni] - 40,07[P] + 1,44[Cr] - 68,47[N], \quad (4.4)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 2,09$;

- температура ликвидус T_{lic} стали 12X18АГ18 (степенная зависимость)

$$T_{lic} = 1461,8 - 98,67[C] - 18,98[Si] - 0,094[Mn]^2 - 8,09[Ni]^2 - 770,17[P]^2 + 1,367 \cdot 10^{-3}[Cr]^2 - 8,7[V] - 68,47[N], \quad (4.5)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 1,41$;

- температура ликвидус T_{lic} стали 04X20H6Г11М2АФБ

$$T_{lic} = 1540,95 - 55,085[C] - 11,51[Si] - 4,198[Mn] - 1,61[Ni] - \\ - 3,802[Cr] - 4,84[Mo] - 6,79[V] - 17,59[N] - \\ - 9,75[Nb], \quad (4.6)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 1,06$;

- температура солидус T_{sol}^{eq} (равновесная) стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ)

$$T_{sol}^{eq} = 1511,04 - 151,04[C] - 6,67[Si] - 4,44[Mn] - 1,78[Ni] - \\ - 12,93[S] - 275[P] - 4,88[Cr] + 5,21[V] - 6,25[N] + \\ + 0,73[Nb], \quad (4.7)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 1,54$;

- температура солидус T_{sol}^{eq} (равновесная) стали 12X18АГ18

$$T_{sol}^{eq} = 1545,03 - 186,96[C] + 118,52[C]^2 - 10[Si] - 5,1[Mn] - \\ - 416,33[P] - 2564,89[P]^2 - 5,73[Cr] + 5,37[N] - \\ - 46,81[N]^2, \quad (4.8)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 1,14$;

- температура солидус $T_{sol}^{n.eq}$ (неравновесная) стали 12X18АГ18 (модель неравновесного затвердевания Шейля-Гулливера)

$$T_{sol}^{n.eq} = 1280,83 + 386,66[C] - 2567,04[C]^2 - 13,91[Si] - \\ - 3,49[Mn] + 145,3[P] - 1,06[Cr] + 14,21[N], \quad (4.9)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 7,85$;

- равновесная температура солидус T_{sol}^{eq} стали 04X20H6Г11M2АФБ

$$T_{sol}^{eq} = 1515 - 178,79[C] - 7,25[Si] - 4,15[Mn] - \\ - 1,24[Ni] - 5,47[Cr] - 6,72[Mo] + \\ + 18,77[V] - 19,26[Nb], \quad (4.10)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 1,07$;

- неравновесная температура солидус $T_{sol}^{n.eq}$ стали 04X20H6Г11M2АФБ (модель неравновесного затвердевания Шейля-Гулливера)

$$T_{sol}^{n.eq} = 1346,86 - 312,28[C] - 15,79[Si] - 5,11[Mn] - 13,63[Mo], \quad (4.11)$$

стандартная ошибка оценки $\pm 2,72$;

- растворимость азота в жидкой стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс.

$$\begin{aligned} [\%N] = & 0,582 - 0,1113[C] - 0,0447[Si] + \\ & + 0,0096[Mn] - 0,0051[Ni] + 0,0221[Cr] + \\ & + 0,0329[Nb] - 0,0479[P] - 4,2703 \cdot 10^{-4}T, \end{aligned} \quad (4.12)$$

где T – температура, градусы Цельсия; стандартная ошибка оценки $\pm 0,02017$;

- растворимость азота в жидкой стали 12X18АГ18, % масс.

$$\begin{aligned} [\%N] = & 0,912995 - 0,075[Si] + 0,0159[Mn] + \\ & + 0,0342[Cr] + 1,3906[S] - 8,235 \cdot 10^{-4}T, \end{aligned} \quad (4.13)$$

где T – температура, градусы Цельсия; стандартная ошибка оценки $\pm 0,0381$;

- растворимость азота в жидкой стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс.

$$\begin{aligned} [\%N] = & 32,6095 - 9,4595 \lg T + 0,0258[Cr] + 0,0286[Mn] + \\ & + 1,9887[N]_{iv} - 0,0518[Si] - 3,93 \cdot 10^{-4}[Ni]^2 - \\ & - \frac{5025,82}{T} + 0,0093[Mo] - 0,0982[C] + 0,0348[Nb] - \\ & - 1,8004[N]_{iv}^2 - 0,0152[V] - 8,128 \cdot 10^{-4}[Mn]^2, \end{aligned} \quad (4.14)$$

где T – температура, градусы Цельсия; $[\%N]_{iv}$ – целевое значение содержания азота в стали, % масс., стандартная ошибка оценки $\pm 0,0131$.

На основе расчетных данных по регрессионным уравнениям температур ликвидус сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11М2АФБ была скорректирована действующая норма – температура стали перед разливкой в слитки в сторону снижения: новое значение температуры металла азотсодержащих марок сталей перед разливкой $1480 \div 1510^\circ\text{C}$, вместо действовавшей на предприятии $1540 \div 1550^\circ\text{C}$.

На основе расчетных данных по неравновесной температуре ликвидус были скорректированы длительности выдержки слитков в изложницах после разливки на время от 10 мин для 1-тонных слитков до 30 мин для 2,5–3-тонных слитков.

На основе сравнения данных по содержанию азота (см. табл. 4.13) в стали 12X18AG18, указанных в паспорте слитков производства Silbitz Guss (ФРГ), данных входного контроля слитков этой стали и результатов расчета по формулам (1.30) ÷ (1.59), и регрессионной зависимости (4.13) были сделаны следующие выводы:

- 1) большая часть зависимостей из (1.30) ÷ (1.59) дают завышенные значения растворимости азота в стали 12X18AG18, что подтверждает выводы авторов работ [495, 496], что обуславливает на данном этапе развития поиск и применение на практике не универсальных уравнений, а частных зависимостей для конкретных марок сталей и сплавов;
- 2) по среднему фактическому содержанию компонентов стали 12X18AG18 производства Silbitz Guss (ФРГ) с помощью формулы растворимости азота (4.13) с учетом стандартной ошибки оценки была рассчитана температурный интервал ввода азотированных ферросплавов, для $[\%N]_{\min} = 0,45$ значение составило 1592°C , для $[\%N]_{\max} = 0,52$ значение составило 1587°C ; таким образом, температура ввода азотированных ферросплавов не должна превышать 1590°C .

Таблица 4.13. Оценка растворимости азота в стали 12X18AG18 при температуре 1590°C

| Усредненный химический состав (табл.4.11) | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|-------------------|--------|-----------------------|---------|--------|--------|--------|
| Элемент | C | Si | Mn | P | S | Cr | Азот | V | Ni |
| Содержание, % масс. | 0,059 | 0,254 | 17,547 | 0,0178 | 0,0012 | 18,2325 | 0,4509 | 0,006 | 0,4895 |
| Результаты расчета | | | | | | | | | |
| Формула | (1.30) | (1.36) | (1.37), (1.38) | (1.40) | (1.41) – (1.44) | (1.53) | (1.54) | (1.57) | (4.13) |
| Растворимость азота, % масс. | 0,6471 | 0,6545 | 1,1141 | 0,4459 | 0,3733 | 0,5636 | 0,5995 | 0,5264 | 0,4895 |

Таким образом, для стабилизации собственного производства стали 12Х18АГ18 на предприятии А были уточнены следующие параметры:

- 1) технология производства слитка – двухстадийная: первая стадия выплавка стали в ДСП, внепечная обработка, вакуумирование, азотирование ферросплавами, разливка в цилиндрические слитки; вторая стадия – электрошлаковый переплав нескольких цилиндрических слитков одной плавки в ДСП в один слиток в контролируемой атмосфере;
- 2) легирование полупродукта азотом проводили после вакуумирования для обеспечения максимально низких показателей активности кислорода и серы для увеличения коэффициента усвоения азота при поддерживаемой низкой температуре металла не выше 1590°С с для гарантированного растворения азота и ликвидации возможности выделения его из металла в газовую фазу;
- 3) целевой состав стали 12Х18АГ18 был подобран путем последовательного решения системы линейных уравнений таким образом, чтобы обеспечить растворимость азота в пределах НТД и обеспечить полный его переход в твердый металл при кристаллизации без возникновения эффекта образования сотовых азотных пузырей;
- 4) электрошлаковый переплав проводился с твёрдым стартом в атмосфере технически чистого азота, с использованием промышленного флюса с температурой плавления 1100°С;
- 5) с целью ликвидации флуктуаций концентрации азота в слитке ЭШП в течение всего процесса, за исключением стартового периода, в печь в шлаковый расплав подавался молотый азотированный феррохром ФХН-10 (ТУ0840-024-21600649-2009) с содержанием азота 10%, скорость подачи установлена таким образом, чтобы обеспечить ввод азота на уровень 0,02 % масс. выше целевого уровня; плотность дроблёного и низкая активность кислорода в азотированном феррохроме (химический состав см. в табл.4.14) способствуют возникновению эффекта "накачки" азота из

газовой фазы в металл, что является дополнительной гарантией обеспечения требуемого содержания азота в слитке стали 12Х18АГ18.

Таблица 4.14. Нормативные требования к химическому составу азотированного феррохрома ФХН-10 согласно ТУ 0840-024-21600649-2009

| Массовая доля, % | | | | | | |
|------------------|------|----------|-----|------|------|-----|
| Cr, не менее | N | Si | C | S | P | Al |
| | | не более | | | | |
| 60 | 8-12 | 1,5 | 0,1 | 0,02 | 0,03 | 0,2 |

4.1.1 Проверка скорректированной технологии электрошлакового переплава стали 12Х18АГ18

С целью проверки предложенных изменений в технологию электрошлакового переплава была проведена опытная плавка с использованием в качестве расходующих электродов слитков, указанных в табл. 4.11.

Переплав расходующих электродов стали 12Х18АГ18 диаметром 300 мм. проводился в кольцевой кристаллизатор внутренним диаметром 450мм. Защитная атмосфера во время переплава - 100% азот. Метод старта – твёрдый. Метод переплава – с вытягиванием слитка из неподвижного кристаллизатора. 25% веса флюса засыпали в кристаллизатор перед стартом, 75% веса флюса – загружали в кристаллизатор через дозатор системы подачи флюса через три минуты после старта в течение 9 мин. Режим стартового периода плавки приведен в табл. 4.15.

Скорость переплава в стационарный период процесса поддерживалась равной 360 кг/час. Электрические параметры стационарного режима переплава были установлены следующие: средняя сила тока 12,6 кА, среднее напряжение 52В.

Подачу дробленого азотированного феррохрома ФХН-10 (ТУ 0840-024-21600649-2009) для компенсации потерь содержания азота в исходных расходующих электродах осуществляли во время переплава со скоростью подачи 2,5 кг/час.

Таблица 4.15. Электрический режим стартового периода электрошлакового процесса при переплаве стали 12Х18АГ18

| Напряжение, В | Сила тока, кА | Временной период от момента старта, мин |
|---------------|---------------|---|
| 48 | 5 | 0–3 |
| 50 | 7 | 3–6 |
| 52 | 9 | 6–9 |
| 55 | 10,5 | 9–12 |
| 56 | 12 | 12–15 |
| 58 | 13 | 15–18 |
| 58 | 15 | 18–21 |
| 58 | 15 | 21–24 |
| 57 | 14,5 | 24–27 |
| 56 | 14,5 | 27–30 |

От опытного слитка ЭШП (диаметр 450 мм, длина 2140 мм), который был замаркирован как Е15-188 были отрезаны темплеты толщиной 16 мм от донной и головной частей слитка для проведения дальнейших исследований. От донной части слитка темплеты вырезались на расстоянии 30 мм (темплет Д1), 112 мм (темплет Д2) и 225 мм (темплет Д3) от дна слитка. После порезки слитка Е15-188 осталась часть слитка была передана для изготовления заготовок для бандажных колец различного типоразмера.

Разрезка каждого темплета проводилась по схеме, показанной на рис.4.16.

Результаты химического анализа образцов опытного слитка Е15-188 приведены в табл.4.16.

Анализируя данные химического анализа пришли к следующим выводам:

- 1) химический состав слитка стали 12Х18АГ18-Ш соответствует требованиям ТУ-24.00.4821-89;
- 2) при электрошлаковом переплаве наблюдается снижение содержания кремния, что необходимо учесть в последующем промышленном производстве, что возможно реализовать двумя способами: первый – организация производства расходуемых электродов с содержанием кремния, компенсирующим потери при

ЭШП; второй – применение флюса, содержащего необходимое количество кремнезема для обеспечения сохранения исходной концентрации кремния в стали при постоянном коэффициенте распределения кремния;

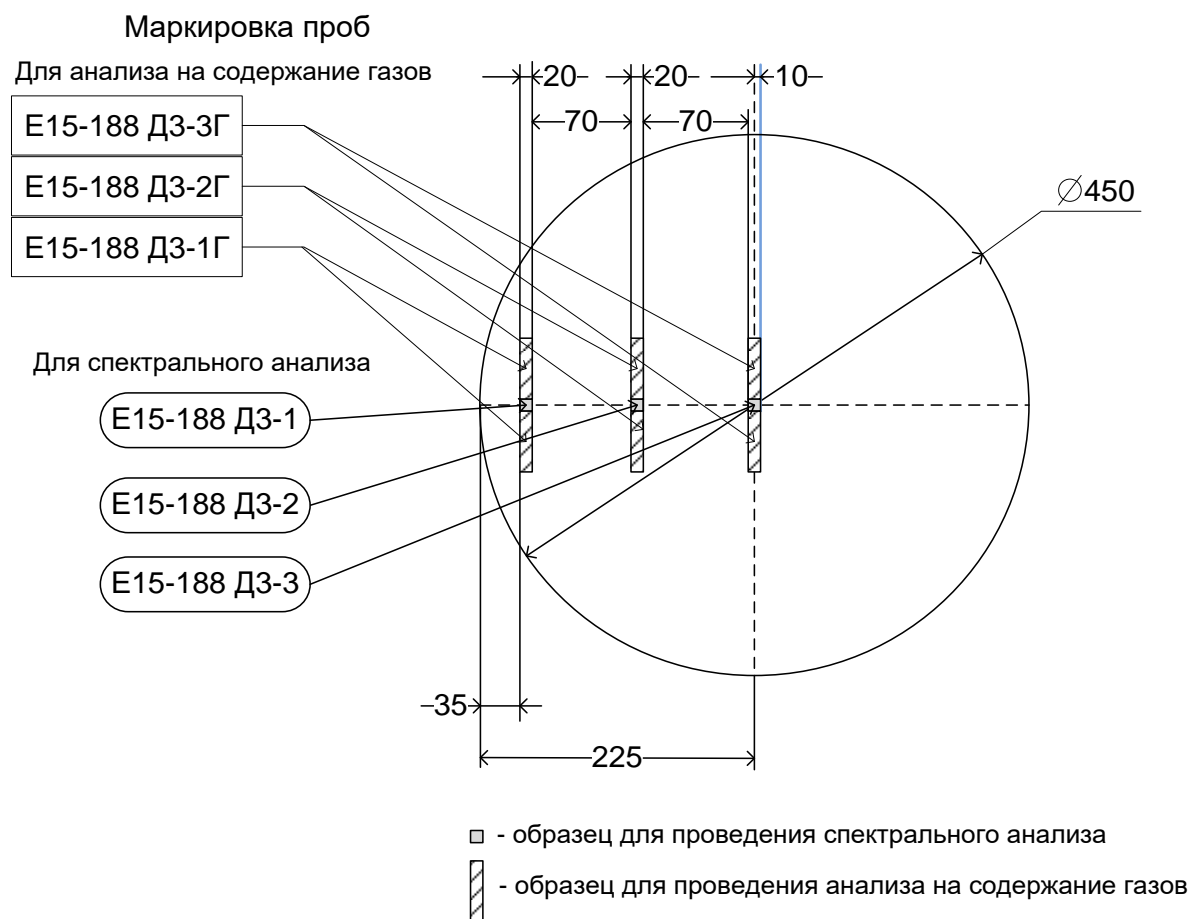


Рисунок 4.16. Схема порезки темплета ДЗ слитка E15-188

3) содержание хрома и азота увеличились после переплава, оставаясь в пределах нормативных требований, что подтвердило правильность применённых технических приёмов при ЭШП.

Металлографическое исследование металла опытного слитка E15-188 показало следующие результаты.

Все темплеты (Д1, Д2, и Г) обладают плотной макроструктурой типичной для слитка ЭШП, дефекты структуру отсутствуют (рис.4.17–4.19).

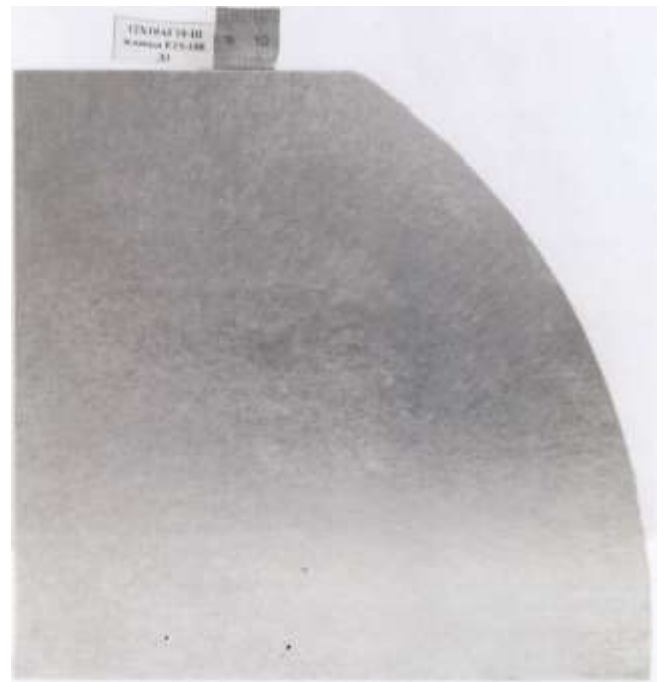
Загрязнённость неметаллическими включениями металла опытного слитка соответствует нормативным требованиям ТУ-24.00.4821-89 (табл.4.17).

Таблица 4.16. Результаты химического анализа проб от слитка ЭШП №15-188 стали 12Х18АГ18

| Маркировка пробы слитка Е15-188 | Расстояние от вертикальной оси слитка, мм | Расстояние от дна слитка, мм | Содержание элементов, % масс. (по данным атомно-эмиссионного спектрального анализа) | | | | | | | | | | | | | По данным газового анализа, % масс. | | |
|---------------------------------|---|------------------------------|--|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------|-------------------------------------|--|--|
| | | | C | Si | Mn | P | S | Cr | Ni | Mo | Al | N | O | O | N | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Д1-3 | 0 | 30 | 0,062 | 0,182 | 17,667 | 0,023 | 0,001 | 18,31 | 0,49 | 0,1 | 0,067 | 0,527 | 0,001 | | | | | |
| Д1-2 | 90 | 30 | 0,062 | 0,175 | 17,709 | 0,024 | 0,001 | 18,38 | 0,496 | 0,101 | 0,071 | 0,534 | 0,002 | | | | | |
| Д1-1 | 180 | 30 | 0,063 | 0,171 | 17,554 | 0,025 | 0,001 | 18,34 | 0,497 | 0,101 | 0,078 | 0,538 | 0,001 | | | | | |
| Д2-3 | 0 | 112 | 0,061 | 0,178 | 17,623 | 0,023 | 0,001 | 18,36 | 0,491 | 0,1 | 0,069 | 0,527 | 0,003 | | | | | |
| Д2-2 | 90 | 112 | 0,063 | 0,179 | 17,612 | 0,023 | 0,001 | 18,32 | 0,5 | 0,1 | 0,068 | 0,544 | 0,001 | | | | | |
| Д2-1 | 180 | 112 | 0,064 | 0,172 | 17,65 | 0,025 | 0,001 | 18,3 | 0,497 | 0,101 | 0,076 | 0,532 | 0,002 | | | | | |
| Д3-3 | 0 | 250 | 0,062 | 0,2 | 17,649 | 0,021 | 0,001 | 18,42 | 0,495 | 0,1 | 0,057 | 0,507 | 0,003 | 0,0020 | 0,48 | | | |
| Д3-2 | 90 | 250 | 0,063 | 0,198 | 17,659 | 0,021 | 0,001 | 18,39 | 0,491 | 0,099 | 0,059 | 0,519 | 0,004 | 0,0025 | 0,48 | | | |
| Д3-1 | 180 | 250 | 0,064 | 0,181 | 17,704 | 0,021 | 0,001 | 18,33 | 0,494 | 0,1 | 0,07 | 0,507 | 0,003 | 0,0030 | 0,48 | | | |
| Г-3 | 0 | 2050 | 0,064 | 0,217 | 17,798 | 0,024 | 0,001 | 18,59 | 0,502 | 0,1 | 0,02 | 0,571 | 0,004 | 0,0025 | 0,53 | | | |
| Г-2 | 90 | 2050 | 0,063 | 0,218 | 17,722 | 0,024 | 0,001 | 18,53 | 0,499 | 0,1 | 0,02 | 0,589 | 0,002 | 0,0030 | 0,53 | | | |
| Г-1 | 180 | 2050 | 0,063 | 0,213 | 17,758 | 0,023 | 0,001 | 18,54 | 0,496 | 0,1 | 0,02 | 0,558 | 0,003 | 0,0020 | 0,53 | | | |



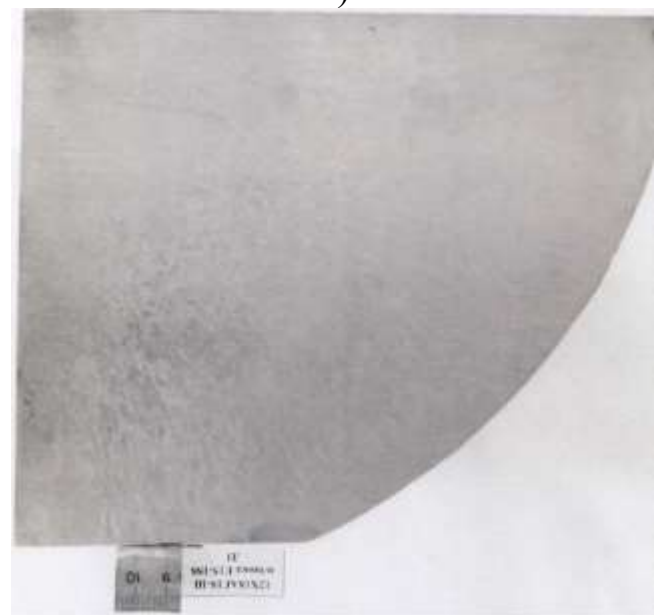
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.17. Макроструктура четырех четвертей темплета Д1 слитка Е15-188
стали 12Х18АГ18

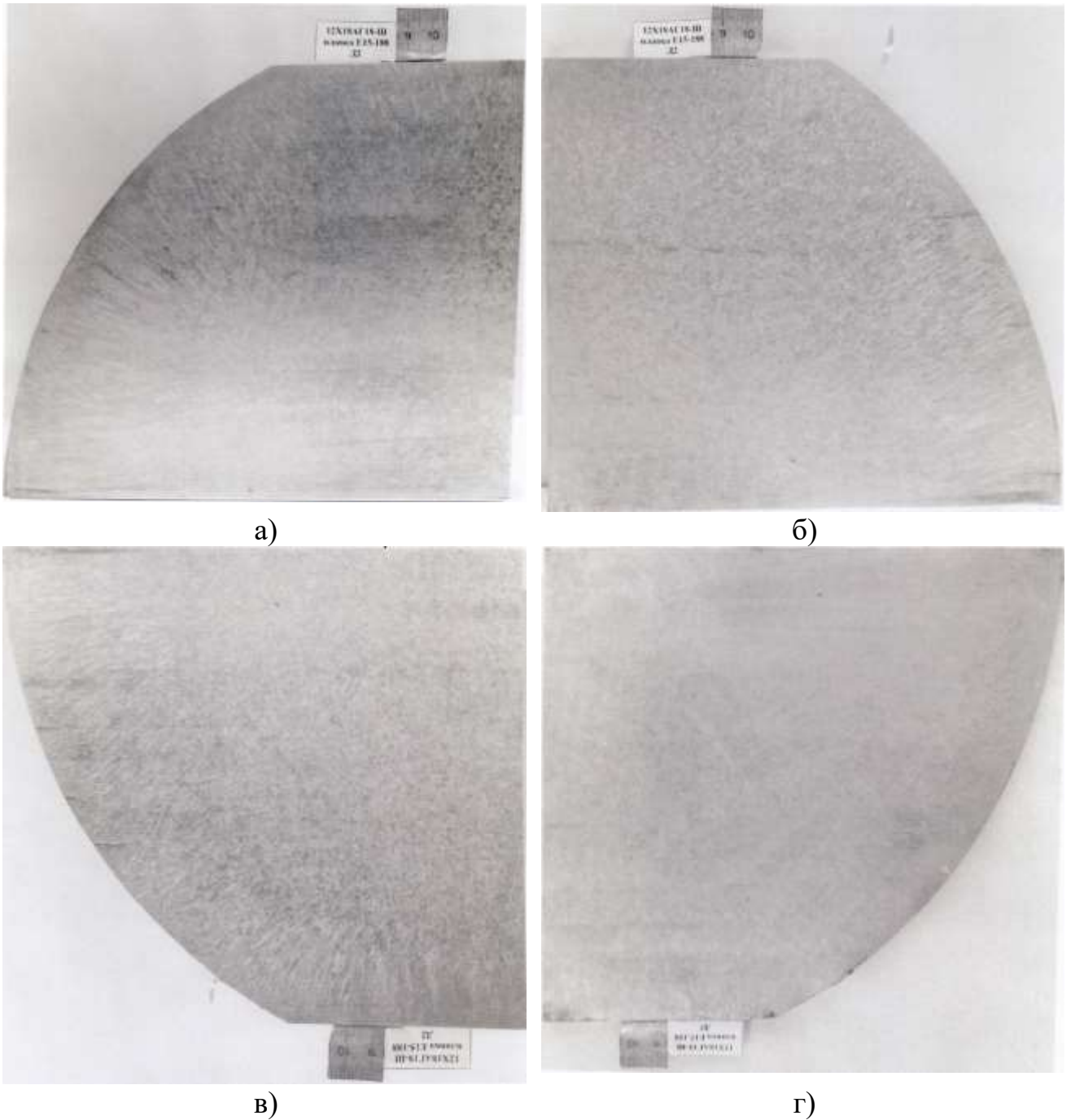


Рисунок 4.18. Макроструктура четырех четвертей темплета Д2 слитка E15-188 стали 12X18AG18

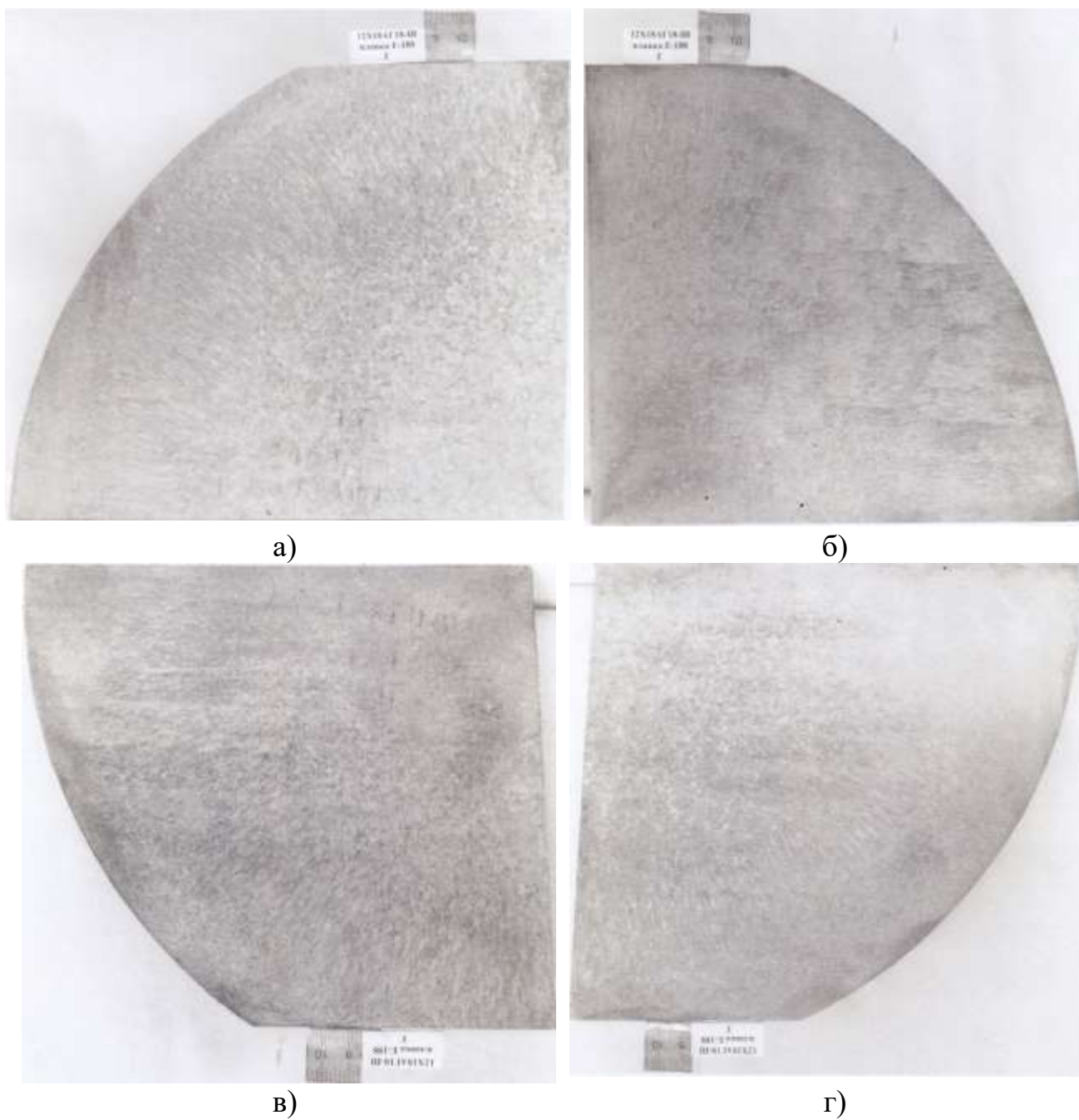


Рисунок 4.19. Макроструктура четырех четвертей темплета Г головной слитка
E15-188 стали 12X18AG18

Таблица 4.17. Результаты оценки загрязнённости металла опытного слитка стали 12Х18АГ18-Ш неметаллическими включениями (ГОСТ 1778-70)

| Маркировка пробы слитка Е15-188 | ОС | ОТ | СХ | СП | СН | С |
|-----------------------------------|----|----|----|----|-----|----|
| Д1-1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Д1-2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| Д1-3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Средний балл для темплета Д1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,8 | 0 |
| Максимальный балл для темплета Д1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Д2-1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| Д2-2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| Д2-3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Средний балл для темплета Д2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,7 | 0 |
| Максимальный балл для темплета Д2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Г-1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| Г-2 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,5 | 0 |
| Г-3 | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Средний балл для темплета Г | 0 | 1 | 0 | 0 | 0,7 | 0 |
| Максимальный балл для темплета Г | 0 | 1 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Требования ТУ-24.00.4821-89 | ≤3 | ≤3 | ≤4 | ≤4 | ≤4 | ≤3 |

Примечание: ОС – оксиды строчечные, ОТ – оксиды точечные, СХ – силикаты хрупкие; СП – силикаты пластичные; СН – силикаты недеформирующиеся; С – сульфиды.

Таким образом, при исследовании металла опытного слитка стали 12Х18АГ18-Ш установлено:

- 1) химический состав слитка Е15-188 соответствует требованиям ТУ 24.00.4821-89; несмотря на некоторые отклонения содержания азота от нормативных требований в исходных расходоуемых электродах в процессе ЭШП удалось устранить это несоответствие;
- 2) макроструктура слитка Е15-188 характеризуется отсутствием макродефектов металла;
- 3) микроструктура – типичная для электрошлакового металла;
- 4) металл опытного слитка отличается чистотой по неметаллическим включениям и удовлетворяет требованиям норм ТУ 24.00.4821-89.

4.2.1. Получение товарного слитка ЭШП стали 12Х18АГ18, полученного по скорректированной сквозной технологии

На основании положительного результата в получении слитка стали 12Х18АГ18-Ш в условиях промышленного производства предприятия А (РФ) по скорректированной сквозной технологии (выплавка полупродукта в ДСП – обработка на установке ковш – печь – обработка на вакууматоре – разливка в слитки – расходоуемые электроды – электрошлаковый переплав) было произведено несколько слитков стали 12Х18АГ18-Ш диаметром 600 мм и 750 мм для энергетического машиностроения. Типичный химический состав слитка диаметром 750 мм приведен в табл. 4.18.

Таблица 4.18. Химический состав промышленного слитка электрошлакового переплава стали 12Х18АГ18-Ш (диаметр 750 мм)

| Компоненты | Требования НТД (ASTM A289/A289M-97) | | Слиток E173-108 | |
|------------|--|----------|--------------------|---------------|
| | Минимум | Максимум | Дно слитка | Голова слитка |
| C | 0 | 0,1 | 0,1 | 0,1 |
| Si | 0 | 0,8 | 0,22 | 0,24 |
| Mn | 17,5 | 20 | 18,61 | 18,91 |
| P | 0 | 0,06 | 0,015 | 0,016 |
| S | 0 | 0,015 | 0,001 | 0,001 |
| Cr | 17,5 | 20 | 18,07 | 18,91 |
| Ni | 0 | 2 | 0,60 | 0,64 |
| Cu | не нормируется | | 0,10 | 0,12 |
| Al | 0 | 0,04 | 0,020 | 0,005 |
| Ti | 0 | 0,1 | 0,01 | 0,01 |
| Mo | не нормируется | | 0,05 | 0,1 |
| V | 0 | 0,25 | 0,02 | 0,03 |
| W | не нормируется | | 0,01 | 0,01 |
| Nb | не нормируется | | 0,01 | 0,02 |
| Co | не нормируется | | 0,03 | 0,03 |
| B | не нормируется | | 0,001 | 0,001 |
| Sn | не нормируется | | 0,003 | 0,004 |
| N | 0,45 | 0,8 | 0,500 | 0,500 |

Нормативные требования к качеству слитка выполнены в полном объёме.

4.2.2. Стабилизация содержания азота в стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ)

Ориентация разработчиков технологии выплавки слитков стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) на конкретный вид формул растворимости азота в жидком металле, напрямую не связанный с этой маркой стали, приводит к неизбежным ошибкам в проектировании сквозного технологического процесса, приводящим к повышенным расходным коэффициентам на стадии изготовления конечной продукции и аттестации продукции по показателям заказчика.

Так, например, при выплавке стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) в ДСП не был выдержан рекомендованный целевой состав (плавка №6-18-2-1352), хотя содержание всех контролируемых компонентов (за исключением азота) находилось в рамках нормативных требований. Моделирование фазового равновесия по фактическому химическому составу стали в пакете прикладных программ Thermo-Calc показало, что в начале кристаллизации первые порции твердого металла представлены δ -ферритом (фаза ВСС_A2 на рис.4.20, 4.21), растворимость азота в котором меньше нормативных требований к стали, что обуславливает выделение азота из жидкого металла в газовую фазу.

Как показал опыт совершенствования технологии выплавки стали 12X18АГ18 в комплексе ДСП-УКП-VD на первой стадии совершенствования технологии необходимо уточнить температуру разливки по оценке температуры ликвидус. Расчёты по уравнениям (1.30)–(1.59) и регрессионному уравнению (4.3), а также моделирование фазового равновесия и процессов равновесного и неравновесного затвердевания в программе Thermo-Calc показали, что для обеспечения содержания азота в рамках нормативных требований и достижения необходимого фазового состояния, гарантирующего необходимый уровень механических свойств готовых изделий, необходимо уточнение целевого состава стали и уменьшение рекомендованных технологической инструкцией температуры легирования азотированными ферросплавами до $1550^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ и температуры разливки до $1450^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

Фазовое равновесие стали ННЗБ пл.6-18-2-1352

2018.08.07.15.00.10

TCFE8, MOBFE3: Fe, C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo, Cu, Al, Ti, V, Nb, W, Co, B, N

Pressure [Pa] = 100000.0, System size [kg] = 1.0, Mass percent C = 0.051, Mass percent Si = 0.186, Mass percent Mn = 1.2179, Mass percent P = 0.021, Mass percent S = 0.004, Mass percent Cr = 18.78, Mass percent Ni = 5.414, Mass percent Mo = 0.087, Mass percent Cu = 0.091, Mass percent Al = 0.016, Mass percent Ti = 0.01, Mass percent V = 0.239, Mass percent Nb = 0.908, Mass percent W = 0.05, Mass percent Co = 0.079, Mass percent B = 6.0E-4, Mass percent N = 0.41

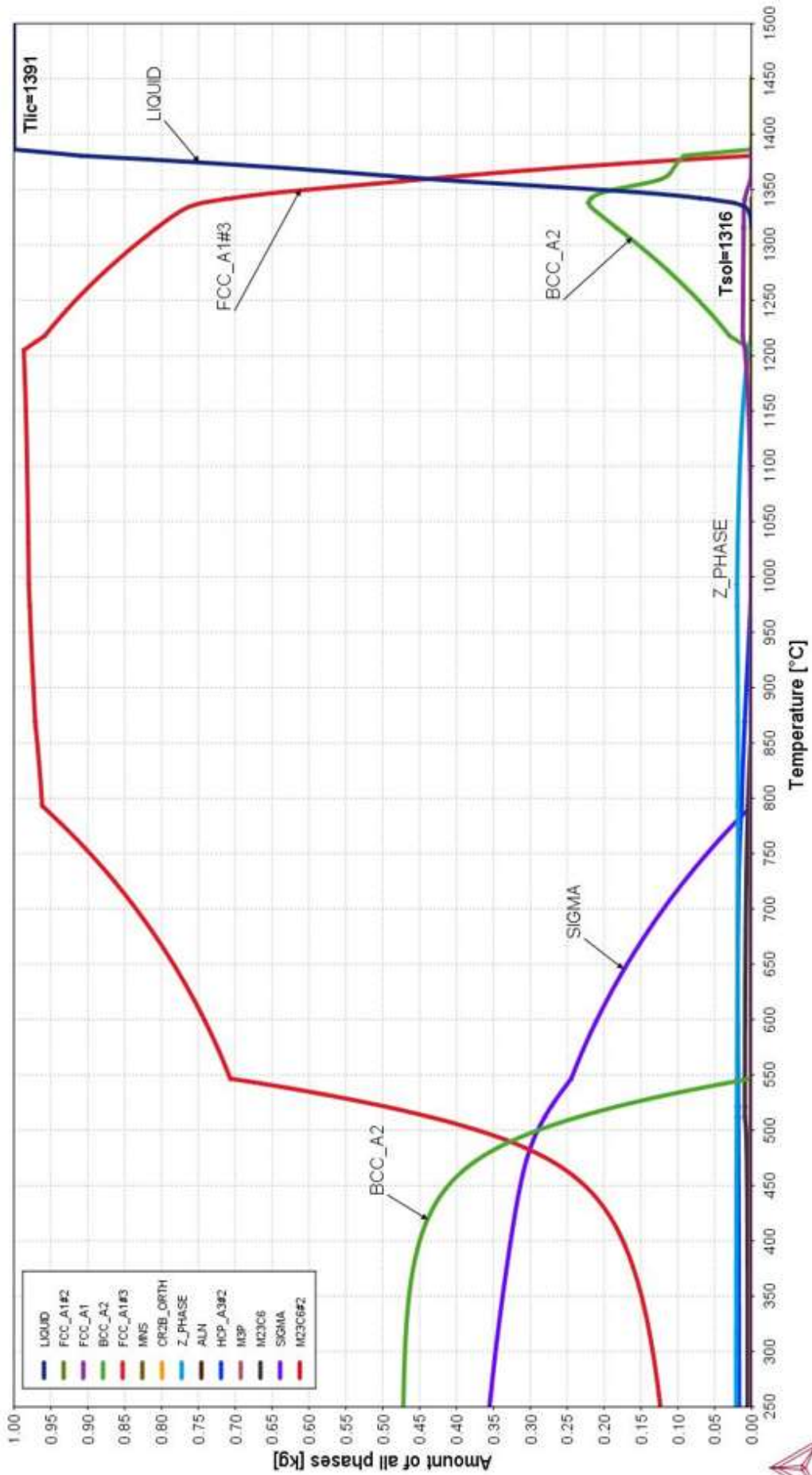


Рисунок 4.20. Результаты моделирования фазового равновесия стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) плавка №6-18-2-1352

Диаграмма кристаллизации ННЗБ пл. 6-18-2-1352

2018.08.07.15.10.54

TCFE8_MOBFEE3 : Fe, C, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mo, Cu, Al, Ti, V, Nb, W, Co, B, N

W(C) = 0.051, W(Si) = 0.186, W(Mn) = 12.179, W(P) = 0.021, W(S) = 0.004, W(Cr) = 18.78, W(Nb) = 5.414, W(Mo) = 0.087, W(Cu) = 0.091, W(Al) = 0.016, W(Ti) = 0.01, W(V) = 0.239, W(Nb) = 0.908, W(W) = 0.05, W(Co) = 0.079, W(B) = 6.0E-4, W(N) = 0.41

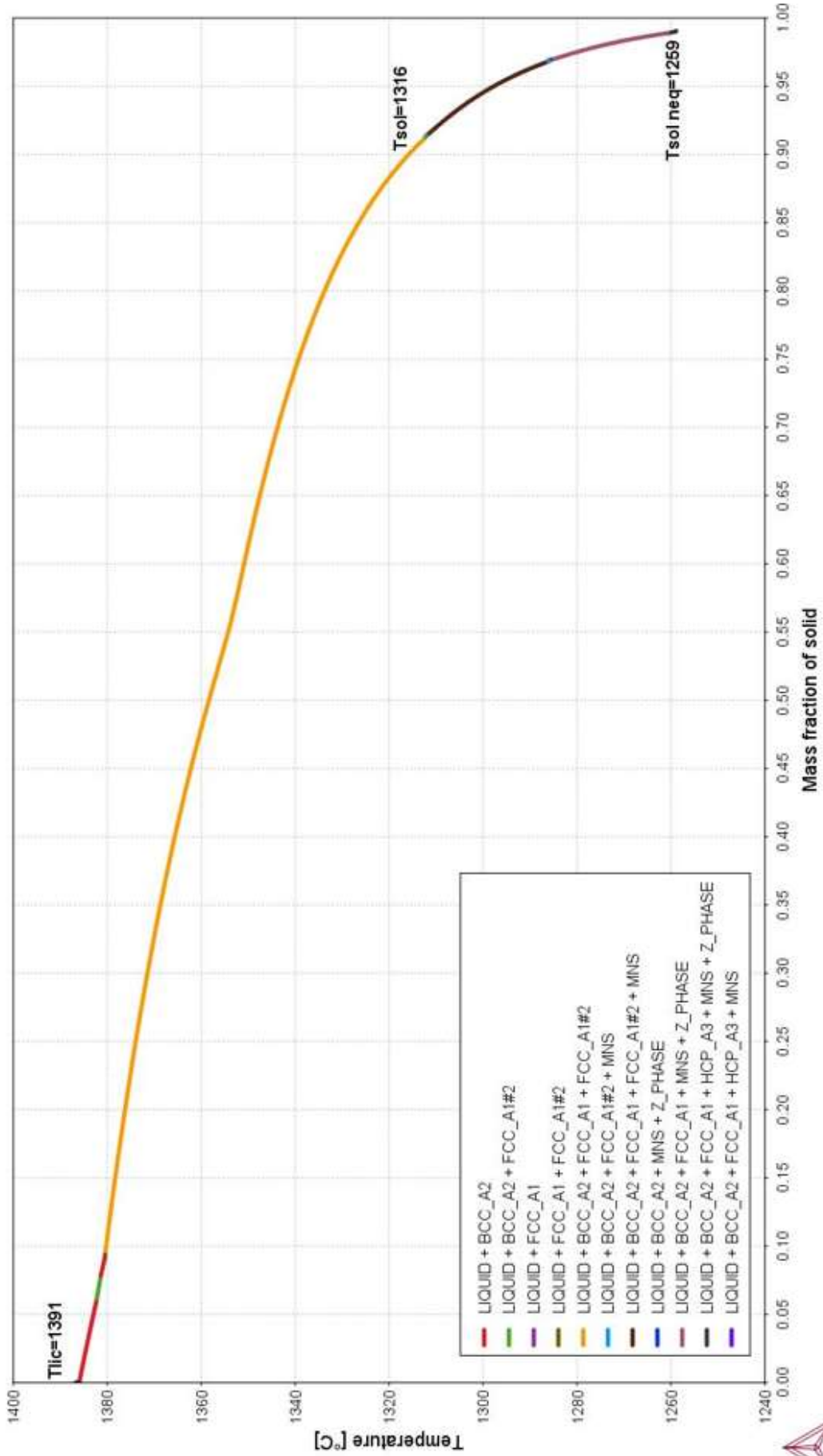


Рисунок 4.2.1. Результат моделирования неравновесного затвердевания стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ)

шлавка №6-18-2-1352



Коррекцию целевого состава стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) проводили для ликвидации возможности кристаллизации первых порций жидкого металла с образованием δ -феррита, полного растворения всех фаз, кроме аустенитных при нагреве металла под ковку при температуре 1250°C, и ликвидация возможности выделения газообразного азота из стали при снижении температуры жидкого металла и его кристаллизации при сохранении состава стали, соответствующего нормативным требованиям ТУ 14-1-784-73.

Соответствие достижения целей коррекции оценивали по результатам термодинамического моделирования в пакете прикладных программ Thermo-Calc (план эксперимента см. Приложение А). Например, на рис.4.22 приведен результат моделирования фазового равновесия стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) с относительно малым количеством δ -феррита (фаза ВСС_А2).

Путем регрессионного анализа следующих параметров: температура ликвидус стали; доля δ -феррита (фазы ВСС_А2) в стали при максимальной температуре нагрева под ковку в 1250°C; температура полного распада δ -феррита при остывании стали; температура прекращения выделения азота из жидкой стали при ее остывании, были получены линейные уравнения.

Решение системы линейных уравнений путём перебора допустимых значений позволило предложить новый целевой состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) для выплавки с применением комплекса ДСП–УКП–VD.

В производстве после коррекции состава также были использованы рекомендации, реализованные при выплавке 12X18АГ18:

- 1) легирование азотированными ферросплавами после десульфурации и вакуумирования при температуре 1550°C \pm 5°C;
- 2) разливка в слитки при температуре разливки 1470°C \pm 5°C.

Результат успешного использования рекомендаций – производство промышленной партии слитков стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), химический состав которых приведен в табл.4.19.

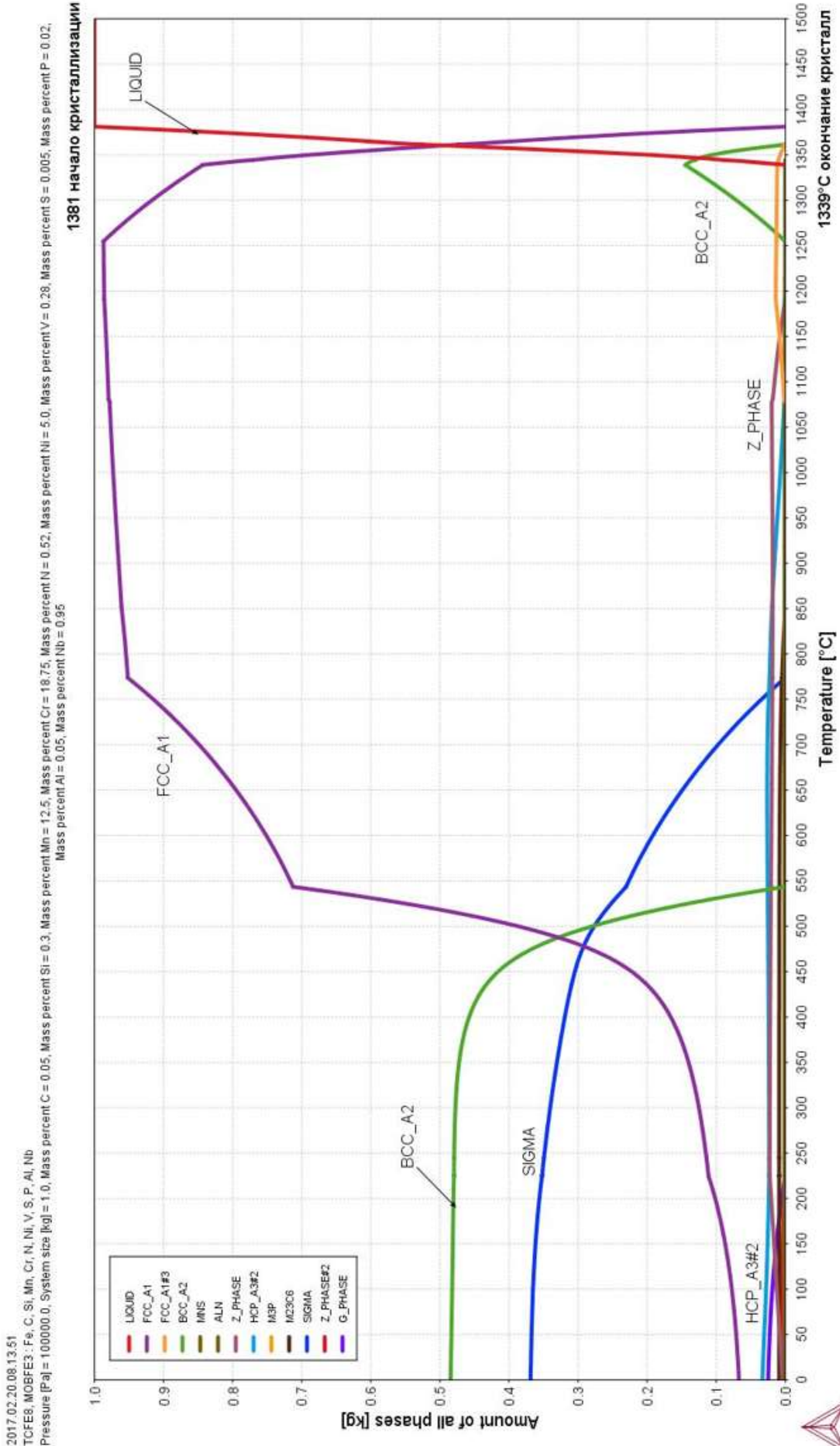


Рисунок 4.22. Результат моделирования фазового равновесия стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) эксперимент №122

Таблица 4.19. Химический состав товарных слитков стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс.

| Категория плавки | Сравнительная плавка | Плавки после внедрения рекомендаций | | | | | |
|------------------|----------------------|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Номер плавки | 6-18-2-1352 | 6-18-2-1739 | 6-18-2-1745 | 6-18-2-1751 | 6-18-2-1764 | 6-18-2-2223 | 6-18-2-3017 |
| C | 0,051 | 0,042 | 0,051 | 0,048 | 0,041 | 0,071 | 0,038 |
| Si | 0,186 | 0,158 | 0,202 | 0,164 | 0,293 | 0,178 | 0,252 |
| Mn | 12,179 | 12,774 | 12,504 | 11,860 | 12,131 | 12,207 | 11,943 |
| P | 0,021 | 0,021 | 0,015 | 0,016 | 0,015 | 0,021 | 0,023 |
| S | 0,004 | 0,002 | 0,005 | 0,004 | 0,001 | 0,003 | 0,003 |
| Cr | 18,78 | 19,33 | 18,66 | 18,36 | 18,65 | 19,57 | 19,20 |
| Ni | 5,414 | 5,457 | 5,335 | 5,007 | 5,111 | 5,091 | 4,830 |
| Mo | 0,087 | 0,103 | 0,076 | 0,097 | 0,079 | 0,110 | 0,138 |
| Cu | 0,091 | 0,136 | 0,114 | 0,128 | 0,112 | 0,137 | 0,134 |
| Al | 0,016 | 0,035 | 0,018 | 0,008 | 0,021 | 0,023 | 0,032 |
| Ti | 0,010 | 0,005 | 0,006 | 0,003 | 0,002 | 0,007 | 0,010 |
| V | 0,239 | 0,238 | 0,254 | 0,258 | 0,244 | 0,236 | 0,239 |
| Nb | 0,908 | 0,884 | 0,867 | 0,845 | 0,866 | 1,361 | 0,926 |
| W | 0,050 | 0,040 | 0,040 | 0,030 | 0,030 | 0,030 | 0,046 |
| Co | 0,079 | 0,053 | 0,050 | 0,053 | 0,045 | 0,063 | 0,054 |
| N | 0,414 | 0,453 | 0,486 | 0,460 | 0,463 | 0,454 | 0,478 |

Сравнение фактического химического состава слитков стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) с нормативным содержанием компонентов в сплаве (табл.4.12) показало, что все полученные слитки соответствует требованиям ТУ 14-1-784-73.

4.2.3. Стабилизация содержания азота в стали 04X20H6Г11M2АФБ

Оценка температуры ликвидус по регрессионному уравнению (4.6) наиболее близка к фактическим значениям для стали 04X20H6Г11M2АФБ, определенным авторами работы [497]: значение, полученное по уравнению (4.6) составляет 1668К, экспериментальное значение- 1660–1666К по данным [497]. Поэтому уравнение (4.6) можно использовать для практического руководства в дальнейшем.

Выплавка полупродукта проводили с использованием в завалку отходов и стружки близких по химическому составу марок сталей и сплавов, специально подготовленной шихтовой заготовки с содержанием фосфора менее 0,005 %, феррохрома марки ФХ850А и хрома металлического марки Х98,5 или Х99Н2 или

хрома электролитического нерафинированного марки ЭХ-1. При этом в шихте доля всей стружки от массы металлозавалки не должна превышать 20 %, Продувка расплава кислородом проводилась только для удаления кремния до содержания менее 0,13 %. После получения требуемого содержания кремния произвели подвалку бадьи с феррохромом и хромом. В процессе расплавления феррохрома производилась корректировка состава шлака. После полного расплавления подвалки производили отбор пробы и скачивание скребками раскисленного шлака из печи, после чего выпускали плавку из печи (температура металла перед выпуском должна составлять $1670\div 1680^{\circ}\text{C}$, замер температуры производится после скачивания шлака).

После выпуска металла из ДСП в ковш, производилась наводка рафинировочного шлака и нагрев металла. На установке ковш-печь производилась корректировка химического состава металла по марганцу, хрому никелю, молибдену, углероду для получения полупродукта под вакуум-кислородное рафинирование (ВКР). Передача сталеразливочного ковша на вакуумирование проводили при достижении необходимого состава полупродукта и температуры металла $1670\text{--}1690^{\circ}\text{C}$, ковш с металлом отправляется на стенд для скачивания шлака, а затем в камеру вакууматора для проведения процесса ВКР.

Процесс ВКР производится по утвержденному на предприятии А режиму. В бункер на раскисление металла после продувки загружается смесь, состоящая из извести, концентрата плавикового шпата, ферросилиция и алюминиевых гранул.

После проведения процесса ВКР производился замер температуры, которая должна находиться в пределах $1550\text{--}1560^{\circ}\text{C}$ и отбор пробы. После получения результатов анализа химического состава производится присадка кальция металлического по расчёту. После чего переходили к легированию жидкого металла марганцем и азотом путем присадки порошковой проволоки, наполненной азотированным марганцем марки Мн87Н6. Присадка проволоки производится через трайб-аппарат в 4–5 приёмов. После каждого приёма ковш с металлом переставляется на АКП для подогрева металла перед следующей присадкой (до температуры $1550\text{--}1560^{\circ}\text{C}$). При этом содержание углерода в проволоке с

наполнителем Mn87H6 должно быть не более 0,10 %. После получения подтверждения содержания азота в стали в соответствии с требованием ТУ 5.961-11897-2006, производилась доводка химического состава металла по марганцу присадкой металлического марганца Mn998, ниобию присадкой феррониобия ФН660, и по ванадию присадкой феррованадия FeV80. При необходимости могла производиться корректировка химического состава по никелю присадкой первичного никеля Н1, по хрому – присадкой металлического хрома Х99Н2, по молибдену – присадкой металлического молибдена МШ-В и по кремнию присадкой ферросилиция марки ФС75. Корректировку химического состава металла по содержанию азота производилась азотированным феррохромом ФХН10 или азотированным хромом марки ХН15. После получения требуемого химического состава металла в соответствии с ТУ 5.961-11897-2006 производилась присадка кускового металлического кальция по расчёту, перемешивание металла аргоном 0,5–1 минуту и выдержка при минимальном перемешивании в течение 2–3 минут. При достижении температуры металла 1520–1530°С ковш с металлом отправлялся на разливку.

Разливка стали 04Х20Н6Г11М2АФБ в изложницы проводили сифонным способом. Температура металла перед началом разливки 1510 ± 5 °С. Химический состав стали 04Х20Н6Г11М2АФБ приведен в табл.4.20. Сравнение фактического химического состава стали 04Х20Н6Г11М2АФБ с нормативным содержанием компонентов в сплаве (табл. 4.12) показало, что в слитках плавки 6-18-2-1754 завышено содержание кремния (0,401 при максимально допустимом значении 0,4%), содержание молибдена завышено в плавках 6-18-2-1754 (1,853% при максимально допустимом значении 1,70%) и 6-18-2-1975 (1,743% при максимально допустимом значении 1,70%).

Электрошлаковый переплав расходуемых электродов диаметром 400 мм проводили методом вытягивания слитка из неподвижного кольцевого кристаллизатора диаметром 600 мм с заменой расходуемых электродов по ходу плавки.

Таблица 4.20. Химический состав металла 04X20H6Г11M2АФБ

| Компонент | Номер плавки | | |
|-----------|--------------|-------------|-------------|
| | 6-18-2-1754 | 6-18-2-1975 | 6-18-2-2779 |
| C | 0,042 | 0,055 | 0,031 |
| Si | 0,401 | 0,232 | 0,288 |
| Mn | 11,549 | 10,744 | 11,060 |
| P | 0,006 | 0,011 | 0,013 |
| S | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| Cr | 18,60 | 18,87 | 18,87 |
| Ni | 7,45 | 7,84 | 7,53 |
| Mo | 1,853 | 1,743 | 1,425 |
| Al | 0,007 | 0,001 | 0,01 |
| V | 0,179 | 0,140 | 0,132 |
| Nb | 0,174 | 0,165 | 0,130 |
| Азот | 0,459 | 0,456 | 0,458 |

Для электрошлакового переплава использовали смесь промышленных флюсов с расчетной температурой плавления 1100°С для обеспечения жидкоподвижности шлака. В качестве защитной атмосферы использовался технически чистый азот. Метод старта – твёрдый. 25% массы флюса засыпали в кристаллизатор перед стартом, 75% массы флюса – загружалось в кристаллизатор через дозатор системы подачи флюса через три минуты после старта в течение 15 мин. Режим стартового периода плавки приведен в табл. 4.21.

Таблица 4.21 – Электрический режим стартового периода электрошлакового процесса производства слитка стали 04X20H6Г11M2АФБ-Ш.

| Время от момента старта, мин. | Напряжение, В | Сила тока, кА |
|-------------------------------|---------------|---------------|
| 0 | 55,0 | 5,0 |
| 5 | 57,0 | 8,0 |
| 10 | 59,0 | 13,0 |
| 15 | 60,0 | 15,0 |
| 20 | 62,0 | 18,0 |
| 25 | 62,0 | 19,0 |
| 30 | 62,0 | 19,5 |
| 35 | 60,0 | 17,0 |
| 40 | 58,0 | 16,5 |
| 45 | 57,0 | 16,5 |
| 50 | 57,0 | 16,0 |

Скорость переплава в стационарный период процесса поддерживали равной 450 кг/час. Электрические параметры стационарного режима переплава были установлены следующие: средняя сила тока 15,5 кА, среднее напряжение 52В.

Подачу дробленого азотированного феррохрома ФХН-10 (ТУ 0840-024-21600649-2009) осуществляли во время переплава со скоростью подачи 3,1 кг/час. Азотированный феррохром благодаря своей плотности, которая выше чем плотность шлака и ниже плотности металла, попадает на границу раздела металл – шлак. Благодаря более высокой раскисленности, чем переплавляемый металл, присутствие азотированного феррохрома на этой границе обеспечивает формирование необходимого градиента окисленности шлака для создания устойчивого потока азота из газовой фазы в металлическую ванну (см. раздел 3). Этот эффект и содержание азота в самом феррохроме гарантировало компенсацию колебаний содержания азота в расходимых электродах и обеспечило равномерность его распределения в слитке ЭШП. Кроме того, выделение избыточного азота из феррохрома обеспечивает дополнительное перемешивание шлака, что в свою очередь дополнительно интенсифицирует эффект "накачки" азота в металлическую ванну.

Режим вывода усадочной раковины слитка электрошлакового переплава в табл. 4.22.

Выдержка слитка в кристаллизаторе после процесса переплава составила 95 мин.

Химический состав слитка стали 04Х20Н6Г11М2АФБ-Ш диаметром 600 мм приведен в табл. 4.23.

Нормативные требования к химическому составу слитка стали 04Х20Н6Г11М2АФБ-Ш выполнены в полном объёме.

Дополнительно были проведены испытания образцов стали 04Х20Н6Г11М2АФБ и 04Х20Н6Г11М2АФБ-Ш на магнитную проницаемость, результаты приведены в табл. 4.24.

Таблица 4.22. Электрический режим периода вывода усадочной раковины слитка стали 04X20H6Г11M2АФБ-Ш

| Начало режима: масса последнего расходуемого электрода - 250 кг Окончание режима: масса электрода -40 кг | | |
|---|---|---|
| Время от момента начала вывода усадочной раковины, мин | Абсолютное снижение напряжения от текущего, В | Абсолютное повышение сопротивления от текущего, мОм |
| 0 | 0 | 0 |
| 7 | -1,0 | 0,3 |
| 14 | -1,5 | 0,6 |
| 21 | -3,0 | 1,0 |
| 28 | -3,5 | 1,2 |
| 35 | -5,0 | 1,6 |
| 42 | -8,0 | 2,0 |
| 49 | -8,0 | 2,4 |
| 56 | -8,3 | 2,8 |
| 63 | -8,5 | 3,3 |
| 70 | -8,5 | 3,8 |

Таблица 4.23. Химический состав опытного слитка стали 04X20H6Г11M2АФБ-Ш диаметром 600 мм

| Компоненты | Требования НТД (ТУ 24.10.22-194-07516250-2018) | | Слиток Е183-196 | |
|------------|---|----------|-----------------|---------------|
| | Минимум | Максимум | Дно слитка | Голова слитка |
| С | 0 | 0,06 | 0,031 | 0,034 |
| Si | 0,1 | 0,4 | 0,245 | 0,248 |
| Mn | 10,0 | 12,0 | 11,060 | 11,065 |
| P | 0 | 0,021 | 0,013 | 0,013 |
| S | 0 | 0,011 | 0,001 | 0,001 |
| Cr | 18,5 | 19,5 | 18,87 | 19,35 |
| Ni | 6,5 | 8,0 | 7,53 | 7,52 |
| Mo | 1,2 | 1,7 | 1,425 | 1,425 |
| Al | не нормируется | | 0,02 | 0,01 |
| V | 0,10 | 0,20 | 0,132 | 0,129 |
| Nb | 0,10 | 0,23 | 0,130 | 0,131 |
| Азот | 0,40 | 0,53 | 0,437 | 0,460 |

Таблица 4.24. Магнитная проницаемость образцов из стали 04X20H6Г11M2АФБ и 04X20H6Г11M2АФБ-Ш (требования ТУ 24.10.22-194-07516250-2018 $\mu \leq 1,01 \text{ Гс/Э}$)

| Номер плавки | Сталь | Среднее значение магнитной проницаемости $\mu_{\text{сред}}$, Гс/Э |
|--------------|-------------------|---|
| 6-18-2-1754 | 04X20H6Г11M2АФБ | 1,001 |
| 6-18-2-1975 | 04X20H6Г11M2АФБ | 1,002 |
| 6-18-2-2779 | 04X20H6Г11M2АФБ | 1,001 |
| E183-196 | 04X20H6Г11M2АФБ-Ш | 1,001 |

Оценивая результаты термодинамического моделирования фазового равновесия различных комбинаций химического состава стали 04X20H6Г11M2АФБ и фактически полученные результаты по легированию стали азотом важно отметить следующее:

- 1) по результатам моделирования в равновесном состоянии в жидком металле при температуре возможного ввода азотированных ферросплавов в полупродукт в интервале 1550–1600°С при всех проанализированных комбинациях химического состава концентрация азота в жидком металле находится в пределах 0,34–0,46% масс. независимо от количества вводимого азотированного ферросплава;
- 2) в реализованной на предприятии А технологии производства слитков стали 04X20H6Г11M2АФБ и 04X20H6Г11M2АФБ-Ш удалось приблизить содержание азота в металле к максимальному возможному значению, определённого расчетным путём;
- 3) при атмосферном давлении в стали 04X20H6Г11M2АФБ при соблюдении нормативных требований к химическому составу невозможно получить концентрацию азота выше 0,46 % масс.

Таким образом, усовершенствована технология производства азотсодержащих сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11M2АФБ, позволяющие избежать выпуска продукции

несоответствующего качества по содержанию азота, решена важная народнохозяйственная проблема импортозамещения в Российской Федерации сталей для изготовления бандажей для сверхмощных электрогенераторов из стали 12Х18АГ18, решена важная проблема инновационного развития техники специального назначения из немагнитной коррозионностойкой стали 04Х20Н6Г11М2АФБ.

Выводы

1. Предложена и реализована система построения сталеплавильных технологий, позволяющая избежать повышения содержания азота в полупродукте при выплавке в дуговой сталеплавильной печи, блокировать рост его во время обработки на установки ковш-печь и, тем самым, обеспечить за счет поддержания высоких значений градиента окисленности шлака по его толщине и интенсификации перемешивания, содержание азота в готовой углеродистой стали не более 80 ppm.

2. Экспериментально установленные параметры завершения окислительного периода рафинирования полупродукта в дуговой сталеплавильной печи, а именно обдув поверхности шлака кислородом с интенсивностью до 10 $\text{нм}^3/\text{час}$ (для обеспечения постоянного окислительного характера поверхности раздела шлак – печная атмосфера), подачи известняка в печь (1,7–1,75 $\text{кг}/\text{т}\cdot\text{мин}$) вместо извести для интенсификации перемешивания шлака выделяющимся при разложении известняка пузырьками CO_2 и перемешивания металла и шлака в печи аргоном через донные дутьевые устройства с максимальным расходом до 0,3 $\text{м}^3/\text{мин}$ на одно продувочное устройство, исключая оголение металла, позволили получить среднее содержание азота на выпуске 52 ppm.

3. Подтверждена возможность проведения внепечной обработки стали на установке ковш-печь, исключая рост концентрации азота в ходе обработки за счет обдува поверхности шлака кислородом с общим расходом 7–15 $\text{нм}^3/\text{мин}$ для обеспечения окислительного характера атмосферы на границе шлак – газ, перемешивания металла аргоном с расходом не выше 0,25 $\text{нм}^3/\text{мин}$ на пористую

пробку для гарантированного предотвращения оголения металла из-под шлака, доводки стали до марочного состава по углероду отдачей порошковой проволокой с углеродистым наполнителем. Это обеспечило сохранение содержания азота в стали 70 на начальном уровне внепечной обработки, либо снижение на 16 ppm от начальной концентрации.

4. Показана возможность дополнительного удаления азота из расплава стали в процессе её выплавки в 120-тонной дуговой печи за счет интенсификации перемешивания шлака при поддержании градиента окисленности его по толщине. Она реализована увеличением интенсивности вдувания порошка углерода для вспенивания шлака выше 1,0 кг/сек, что обеспечивает линейное снижение содержания азота.

5. Установлена и экспериментально подтверждена зависимость концентрации азота в стали от характера и степени износа футеровки x (количество плавок) шахтной дуговой сталеплавильной печи: $[\%N] = 0,0039 + 3,4824 \cdot 10^{-6} \cdot x$, коэффициент детерминации 0,4227.

6. Усовершенствованы технологии производства азотсодержащих сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11M2АФБ, позволяющие избежать выпуска продукции несоответствующего качества по содержанию азота, решена важная народнохозяйственная проблема импортозамещения в Российской Федерации сталей для изготовления бандажей для сверхмощных электрогенераторов из стали 12X18АГ18, решена важная проблема инновационного развития техники специального назначения из немагнитной коррозионностойкой стали 04X20H6Г11M2АФБ.

7. Разработана технология электрошлакового переплава азотсодержащей стали 12X18АГ18 с гарантированным равномерным содержанием азота по высоте и сечению слитка. Это достигается путём использования флюса с температурой плавления 1100°C, равномерного дозирования азотированного феррохрома в течение стационарного периода переплава с расходом, обеспечивающем

превышение целевого содержания азота в металле на 0,02 % масс., и созданием в плавильном пространстве атмосферы из азота.

8. Разработана и внедрена технология производства слитков азотсодержащих сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) и 04X20H6Г11М2АФБ в дуговых сталеплавильных печах с обеспечением всех качественных характеристик, предъявляемых нормативными требованиями.

Основные материалы настоящего раздела опубликованы в работах [439, 440, 443, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506].

РАЗДЕЛ 5

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЁМОВ ПОВЫШЕНИЯ
КАЧЕСТВА СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ ЗА СЧЁТ
УПРАВЛЯЕМОГО СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ АЗОТА, УГЛЕРОДА И
КАРБОНИТРИДНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ**

Статистический анализ серийной продукции из жаропрочных никелевых сплавов предприятия А показал, что содержание азота в жаропрочных сплавах на никелевой основе меняется довольно в широких пределах (табл. 5.1) и среднее его содержание имеет достаточно высокий уровень, мало снижаемый при втором рафинирующем переделе – вакуумно-дуговом переплаве.

Таблица 5.1. Содержание азота в серийно выпускаемой продукции из жаропрочных никелевых сплавов Предприятия А (данные 2016-2019 годов)

| Наименование сплава | Количество наблюдений | Средняя величина концентрации азота, % масс. | Минимальное содержание азота, % масс. | Максимальное содержание азота, % масс. | Дисперсия |
|---------------------|-----------------------|--|---------------------------------------|--|-----------|
| ЭП 648-ВИ | 486 | 0,02600 | 0,01100 | 0,06000 | 8,217E-05 |
| ВЖ159-ВИ | 83 | 0,01496 | 0,00910 | 0,05500 | 3,339E-05 |
| ВЖ159-ВД | 92 | 0,01425 | 0,00880 | 0,03440 | 1,698E-05 |
| ЭП 718-ВИ | 295 | 0,01260 | 0,00800 | 0,03900 | 8,217E-05 |
| ЭП 718-ВД | 305 | 0,01040 | 0,00700 | 0,02800 | 8,217E-05 |
| Inconel 718-ВИ | 101 | 0,01674 | 0,01000 | 0,03700 | 1,707E-05 |
| Inconel 718-ВД | 113 | 0,01539 | 0,01000 | 0,02500 | 1,707E-05 |

Как уже было указано в разделе 1 высокие эксплуатационные требования к изделиям из жаропрочных и коррозионностойких никелевых сплавов обуславливают постоянный рост требований эффективности рафинирования этих сплавов в металлургических процессах выплавки и переплава. Например, содержание азота в жаропрочном никелевом сплаве для изделий ответственного назначения требуется понизить до уровня ниже 10 ppm, а кислорода – ниже 5 ppm [507, 508]. Как было рассмотрено в разделе 3 основными источниками поступления

азота в жидкий металл являются шихтовые материалы и среда, в которой осуществляется выплавка или переплав никелевых сплавов [5, 491]. Учитывая высокую разницу во времени существования жидкого металла в контакте с рафинирующей средой в первичном процессе выплавки в ВИП и рафинирующими переплавами, авторы работ [5, 491] делают вывод о превалирующем влиянии подбора шихтовых материалов на степень чистоты никелевого сплава по азоту, что подтверждает результаты работы [507], что частично подтверждается и фактическими сведениями из табл. 5.1. При этом необходимо отметить, что чистые по азоту шихтовые материалы не менее чем на 50% дороже применяемых в традиционной технологии выплавки.

Для снижения содержания азота в ЖНС с учетом влияния условий проведения выплавки на растворимость азота в жидких сплавах на основе никеля (раздел 3) были предложены к реализации в опытно-промышленном производстве следующие технологические приёмы:

- активизация вакуум – кислородного раскисления полупродукта на основе никеля за счет подачи в завалку закапсулированного оксида никеля в оболочке из металлического никеля при одновременном удешевлении шихты за счет использования хрома с более высоким содержанием углерода;
- переход от дуплексного технологического процесса производства слитков ЖНС: ВИП-ВДП, к триплексному технологическому процессу: ВИП-ЭШП-ВДП с целью снижения содержания агломератов нитридов и снижения оксидных неметаллических включений при электрошлаковом переплаве с обязательным соблюдением следующих требований:
 - температура плавления флюса для ЭШП должна быть в интервале $1100 \div 1150^{\circ}\text{C}$;
 - флюс для ЭШП должен содержать оксид титана;

- переплав должен проводиться в защитной атмосфере аргона при избыточном давлении аргона в рабочей камере электрошлаковой печи для исключения вовлечения воздуха в реакционные зоны.

5.1. Освоение технологии выплавки низкоуглеродистого коррозионностойкого никелевого сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ)

Выплавка перспективного для создания химических реакторов коррозионностойкого сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) [6] осуществлялась в два этапа: первый этап – получение паспортной рафинированной шихтовой никель-молибденовой или никель-молибден-хромовой заготовки (ПРШЗ); второй этап – получение химического состава сплава в соответствии с требованиями НТД (табл.5.2).

Таблица 5.2. Требования к химическому составу сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) согласно ТУ 14-131-1264-2018

| Элемент | Массовая доля элементов, % масс. | | Допустимые отклонения, % масс. |
|----------|----------------------------------|----------|--------------------------------|
| | минимум | максимум | |
| Углерод | 0 | 0,005 | +0,001 |
| Кремний | 0 | 0,10 | +0,05 |
| Марганец | 0 | 0,50 | |
| Сера | 0 | 0,020 | |
| Фосфор | 0 | 0,025 | |
| Хром | 23,0 | 24,0 | ±0,5 |
| Никель | основа | | |
| Молибден | 12,0 | 14,0 | +0,5 |
| Титан | 0,03 | 0,16 | |
| Ниобий | 0,02 | 0,10 | |
| Железо | 0 | 0,5 | +0,5 |
| Алюминий | 0 | 0,25 | |
| Магний | 0 | 0,04 | |

Основная задача первого этапа (выплавка ПРШЗ) – максимальное обезуглероживание и производство шихтового материала с уменьшенной по

сравнению с чистым молибденом температурой плавления. Расчетная температура плавления сплавов системы Ni-Mo, полученная путем моделирования в пакете прикладных программ Thermo-Calc, представлена на рис.5.1.

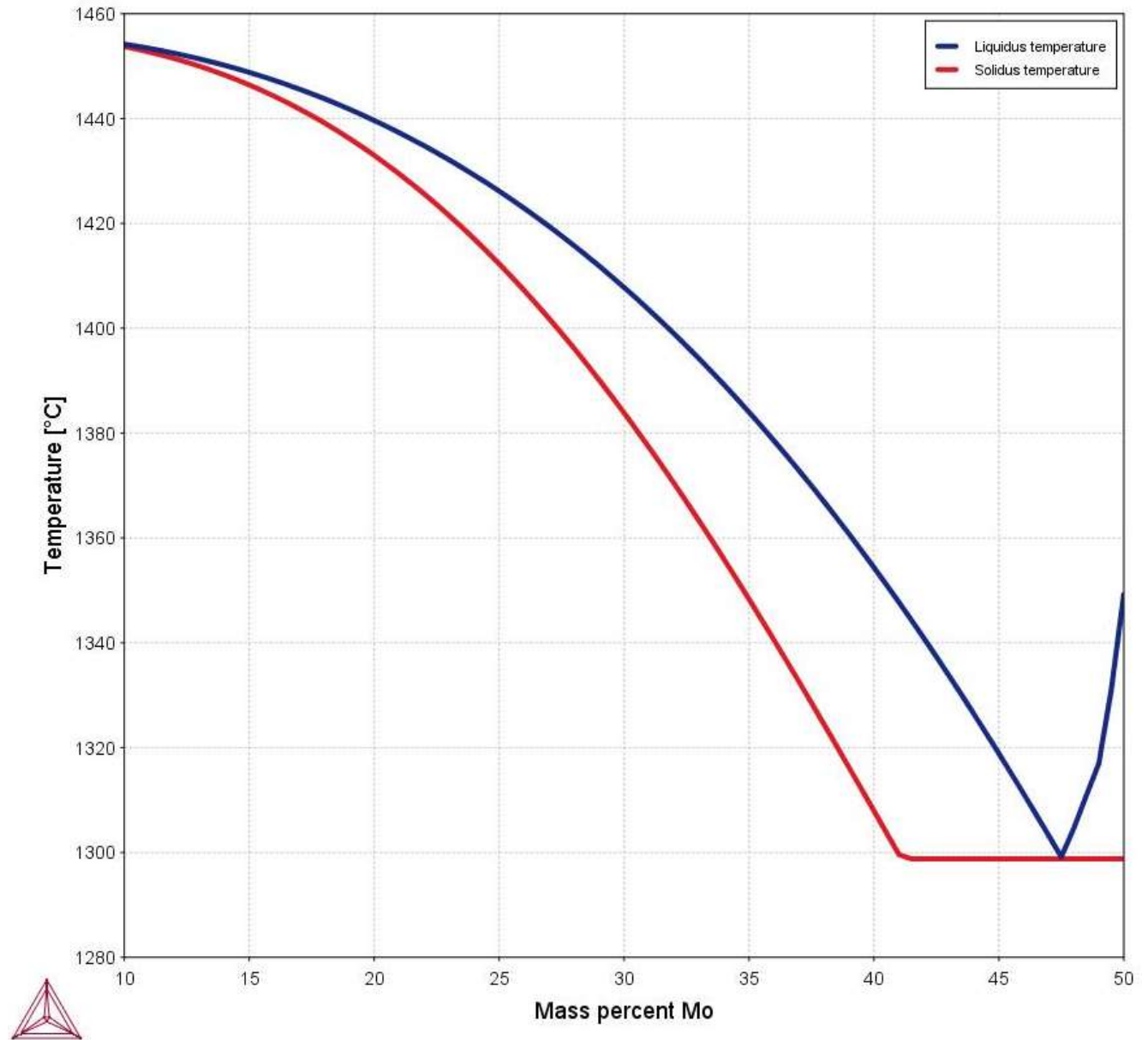


Рисунок 5.1. Температуры ликвидус и солидус для сплавов системы Ni-Mo

Еще большее снижение температуры ликвидус можно получить, переходя от двухкомпонентной основы ПРШЗ к трехкомпонентному сплаву системы Ni-Mo-Cr (рис.5.2), при этом учитывая рекомендацию, полученную в разделе 3, чтобы в лигатуре концентрация хрома была ниже концентрации молибдена.

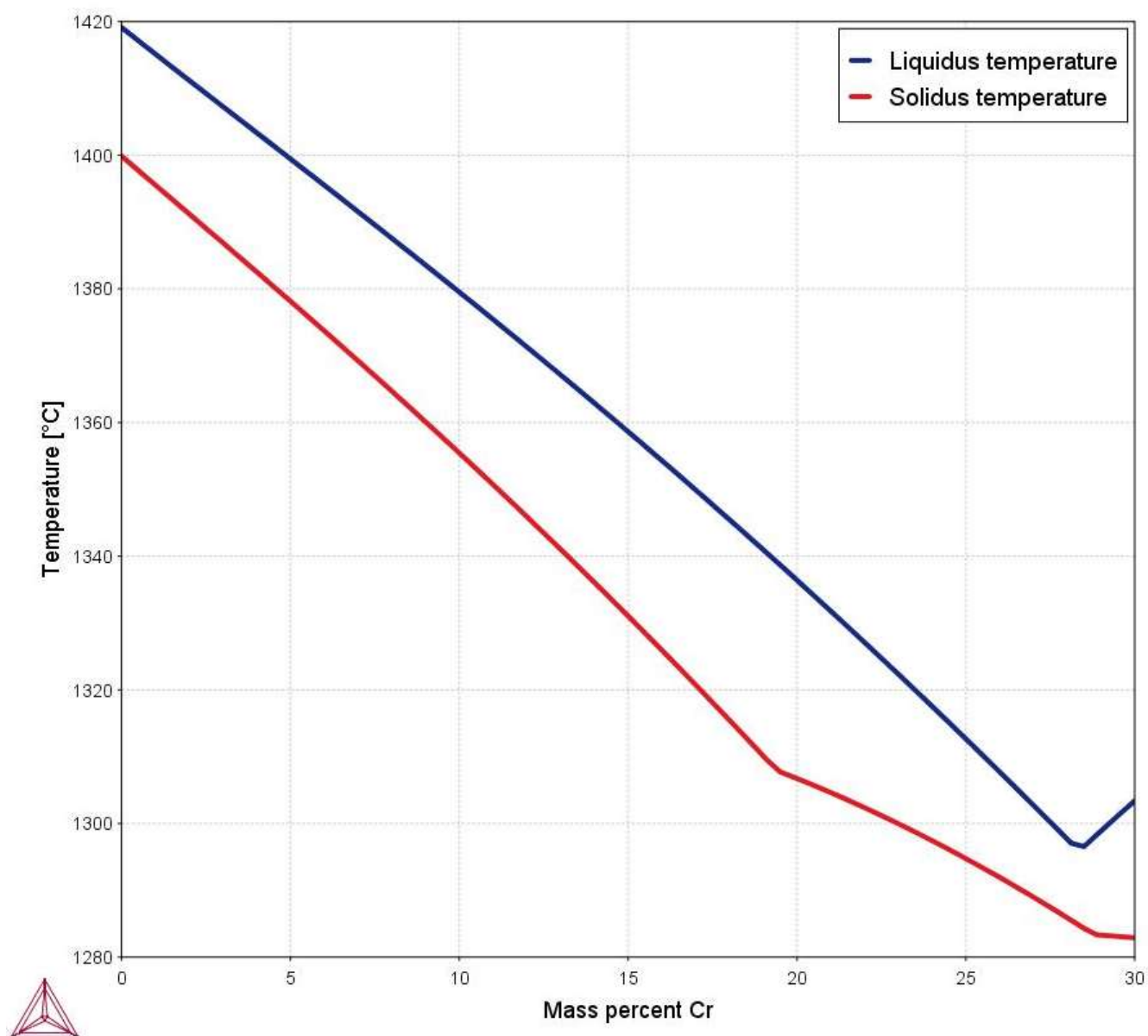


Рисунок 5.2. Температуры ликвидус и солидус для сплавов системы Ni-27%Mo-Cr

Первый опыт выплавки Ni-Mo-Cr ПРШЗ с содержанием 27% молибдена и 10% хрома несмотря на ввод в качестве окислителя оксида никеля не привел к достижению уровня содержания углерода ниже максимального значения требований ТУ (табл. 5.2). Фактическое содержание углерода составило 0,007% масс. В процессе выплавки ПРШЗ визуально наблюдалось кипение жидкого металла при окончании плавления завалки. Содержание азота в ПРШЗ составило менее 0,003% масс.

Однако при проведении второго этапа из-за продолжительного периода доведения по химическому составу до целевого состава не удалось удержать концентрацию азота на достигнутом при получении ПРШЗ, фактический состав полученного сплава представлен в табл. 5.3.

Таблица 5.3. Химический состав опытного слитка сплава
ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ), % масс.

| C | Si | Mn | S | P | Cr | Mo | Ti | Nb | Fe | Al | Mg | N | O | Ni |
|-------|------|------|-------|-------|------|------|-------|------|------|-------|------|-------|-------|------|
| 0,007 | 0,05 | 0,04 | 0,001 | 0,001 | 23,2 | 12,5 | 0,075 | 0,05 | 0,29 | 0,077 | 0,01 | 0,005 | 0,003 | осн. |

Полученный слиток выходил за рамки нормативных требований по содержанию углерода, но все же был принят к дальнейшему производству согласно пункту 3 табл. 2 ТУ 14-131-1264-2018: "Сплав поставляется методом "селект" по углероду". Образцы опытного слитка были отправлены заказчику для изучения коррозионной стойкости.

Учитывая положительный опыт по снижению содержания углерода и вызванное этим процессом соответствующее снижение концентрации азота в ходе первого этапа выплавки опытного слитка было принято несколько изменений в опытно-промышленном производстве:

- 1) ввод оксида никеля в шихтовку осуществляется на обоих этапах выплавки, расход оксида никеля составлял удвоенное количество от стехиометрической величины;
- 2) в шихтовку выплавки ПРШЗ отдаётся только никель Н1У, молибден МШ-В и оксид никеля, закапсулированный в никель;
- 3) в шихтовку второго этапа вместо хрома ЭРХ-1 отдаётся ЭРХ-2 с более высоким содержанием кислорода и азота.

Целевой состав опытно-промышленного производства сплава ХН62М-ВИ представлен в табл. 5.4.

Выплавку сплава ХН62М-ВИ провели в индукционной вакуумной печи ИСВ-0,6, плавка И18-13.

Таблица 5.4 – Расчетный целевой состав сплава ХН62М-ВИ, % масс.

| | | | | | | | | | | | |
|------|----|--------|------|------|--------|--------|------|------|------|------|------|
| Cr | Mo | C | Fe | Mn | P | S | Si | Ti | Nb | Al | Mg |
| 23,5 | 13 | ≤0,002 | ≤0,1 | ≤0,1 | ≤0,015 | ≤0,012 | ≤0,1 | 0,08 | 0,06 | 0,12 | 0,03 |

Выплавка проводилась после промывной плавки на основе никеля. Состав шихты на проведение второго этапа (выплавку целевого состава сплава) представлен в табл. 5.5.

Таблица 5.5. Состав шихты на выплавку ХН62М-ВИ

| Наименование материала | Марка материала | Доля в весе шихтовки, % |
|------------------------|-----------------|-------------------------|
| Никель | Н1У | 46,878% |
| Хром | ЭРХ-2 | 22,549% |
| Оксид никеля | NiO | 0,297% |
| ПРШЗ | NiMo | 25,219% |
| Ниобий | Н6Ш0 | 0,138% |
| Молибден | МШ-В | 4,747% |
| Алюминий | A99 | 0,105% |
| Титан | BT1-0 | 0,067% |
| Всего | | 100% |

Температура полного расплавления шихты составила 1515°C. После 15 мин выдержки для полного завершения обезуглероживания, дополнительно включали электромагнитное перемешивание на 5 мин и отобрали пробу полупродукта. Химический состав пробы приведен в табл. 5.6.

Таблица 5.6. Химический состав 1-й контрольной пробы сплава ХН62М-ВИ, взятой после расплавления шихты

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|------|-------|-----|-------|--------|--------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
| Ni | Cr | Mo | C | Fe | Mn | P | S | Si | Ti | Nb | Al | Mg | N |
| 65,77 | 25,66 | 7,90 | 0,004 | 0,3 | 0,033 | ≤0,001 | ≤0,001 | ≤0,001 | 0,014 | ≤0,001 | 0,015 | 0,0004 | 0,003 |

После получения сведений о химическом составе пробы довели температуру расплава до 1550°C и произвели корректировку химического состава по молибдену. После выдержки с включённым электромагнитным перемешиванием, в расплав ввели прутки ниобия до целевого значения содержания. После

соответствующей выдержки отобрали вторую контрольную пробу для проведения контроля химического состава сплава. Химический состав второй контрольной пробы сплава приведен в табл. 5.7.

Таблица 5.7. Химический состав 2-й контрольной пробы сплава ХН62М-ВИ, взятой после расплавления шихты

| Ni | Cr | Mo | C | Fe | Mn | P | S | Si | Ti | Nb | Al | Mg | N |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 63,19 | 23,25 | 12,57 | 0,004 | 0,27 | 0,034 | ≤0,001 | ≤0,001 | ≤0,001 | 0,084 | 0,065 | 0,021 | 0,0005 | 0,004 |

По результатам химического анализа второй контрольной пробы в расплав добавили титан и алюминий до целевого содержания. Произвели выдержку с электромагнитным перемешиванием в течение 10 мин.

В печь напустили аргон до давления 100 мбар. Присадили лигатуру никель-магний до расчетного содержания по магнию. Произвели электромагнитное перемешивание, отобрали конечную пробу и приступили к разливке. Результат химического анализа конечной пробы представлен в табл. 5.8.

Таблица 5.8. Химический состав от конечной пробы плавки И18-13 сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ)

| Ni | Cr | Mo | C | Fe | Mn | P | S | Si | Ti | Nb | Al | Mg | N | O |
|-------|-------|-------|-------|------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|
| 63,18 | 23,40 | 12,52 | 0,004 | 0,29 | 0,034 | ≤0,001 | ≤0,001 | ≤0,01 | 0,078 | 0,068 | 0,088 | 0,01 | 0,005 | 0,002 |

Разливку осуществляли при температуре 1470°C.

Химический состав слитка И18-13 сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) соответствует требованиям нормативной документации. Изменение содержания углерода по ходу двух этапов обезуглероживания подтвердил целесообразность использования для этой операции оксида никеля. Ожидаемое и зафиксированное фактически снижение содержания азота в расплаве в период обезуглероживания сменилось ростом концентрации азота в период рафинирования и доводки сплава по химическому составу до целевого значения. Это может быть связано только с растворением азота в расплаве из газовой фазы плавильной камеры за счет натекания атмосферного воздуха и поступлением азота с шихтовыми материалами.

Сравнение фактических значений содержания азота в сплавах на никелевой основе после их выплавки в вакуумно-индукционной печи и после их рафинирования в вакуумной дуговой печи (табл. 5.1) с результатами, полученными при выплавке опытно-промышленного слитка сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) позволило сформулировать следующие выводы:

- 1) рафинирование в процессе ВДП приводит к снижению содержания азота в никелевом сплаве до 10% от уровня расходуемого электрода, полученного в ВИП;
- 2) основное снижение содержания азота в сплавах на никелевой основе возможно на стадии их выплавки в ВИП при проведении специальной селекции шихтовых материалов с выделением таковых с предельно низким содержанием азота и при проведении специальных операций по обезуглероживанию расплава с помощью активации вакуум-кислородного обезуглероживания или с помощью продувки расплава инертным газом;
- 3) активация вакуум-кислородного обезуглероживания расплава металла путем добавки капсулированного оксида никеля позволяет снизить содержание азота до 50 ppm.

Таким образом, разработана и испытана промышленная технология производства коррозионностойкого никелевого сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) для инновационного энергетического машиностроения, решена важная народнохозяйственная проблема импортозамещения в РФ.

5.2. Исследование поведения азота при вакуумном дуговом переплаве жаропрочного никелевого сплава ВЖ 159

Расходуемые электроды получали путем выплавки в вакуумной индукционной печи номинальной емкостью 3 тонны (ВИП-3,0) фирмы "Inteco" и последующей разливки в цилиндрический слиток в вакууме. Вакуумный дуговой переплав, полученных из слитков ВИП расходуемых электродов проводили в двух

промышленных печах: VAR L 450 P 2,5 (фирмы "ALD Vacuum Technologies GmbH") и VAR HC/PM/700/6/20 (фирмы "Inteco") в кристаллизаторы двух типоразмеров - диаметром 380 мм и 450 мм. Во всех плавках поддерживали одинаковую скорость переплава 3,2–3,4 кг/мин и одинаковый электрический режим. Давление в печи ВДП находилось в пределах от 0,0013 мбар до 0,02 мбар. Для дальнейших исследований использовали результаты химического анализа металла 28 плавок ВДП.

Пробы для химического анализа отбирали из головной части всех слитков, согласно действующей на предприятии инструкции. Сравнение химического состава металла расходуемых электродов и слитков ВДП выполняли на основании данных, полученных на спектрометре QSN-750 фирмы OBLF (Германия) методом атомно-эмиссионного спектрального анализа (ГОСТ Р 54153-2010).

Содержание азота в расходуемых электродах находилось в пределах 93–330 ppm, в слитках ВДП – 96–248 ppm. Содержание азота в никелевом сплаве после переплава предопределяется концентрацией азота в расходуемом электроде, характер зависимости прямой сильный, коэффициент корреляции $R=0,773$ (см. рис.5.3).

Результат множественной регрессии по влиянию 27 факторов на содержание азота в слитке ВДП $[N]^{VAR}$ показывает, что значимым влиянием обладают содержания ниобия $[Nb]^*$, бора $[B]^*$ и азота $[N]^*$ в расходуемом электроде:

$$[N]^{VAR} = 0,0106 \times [Nb]^* + 3,4578 \times [B]^* + 0,5206 \times [N]^* - 0,0347 \quad (5.1)$$

Множественный коэффициент корреляции $R=0,831$, скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2=0,652$, стандартная ошибка оценки: 0,0019.

Изменение скорости переплава в приведенном выше диапазоне и изменение давления под колпаком печи ВДП не оказывают значимого влияния на содержание азота в слитке ВДП.

Содержание азота в слитке ВДП обусловлено балансом потоков азота в жидкий металл и из него во всех реакционных зонах ВДП [509, стр.31-39].

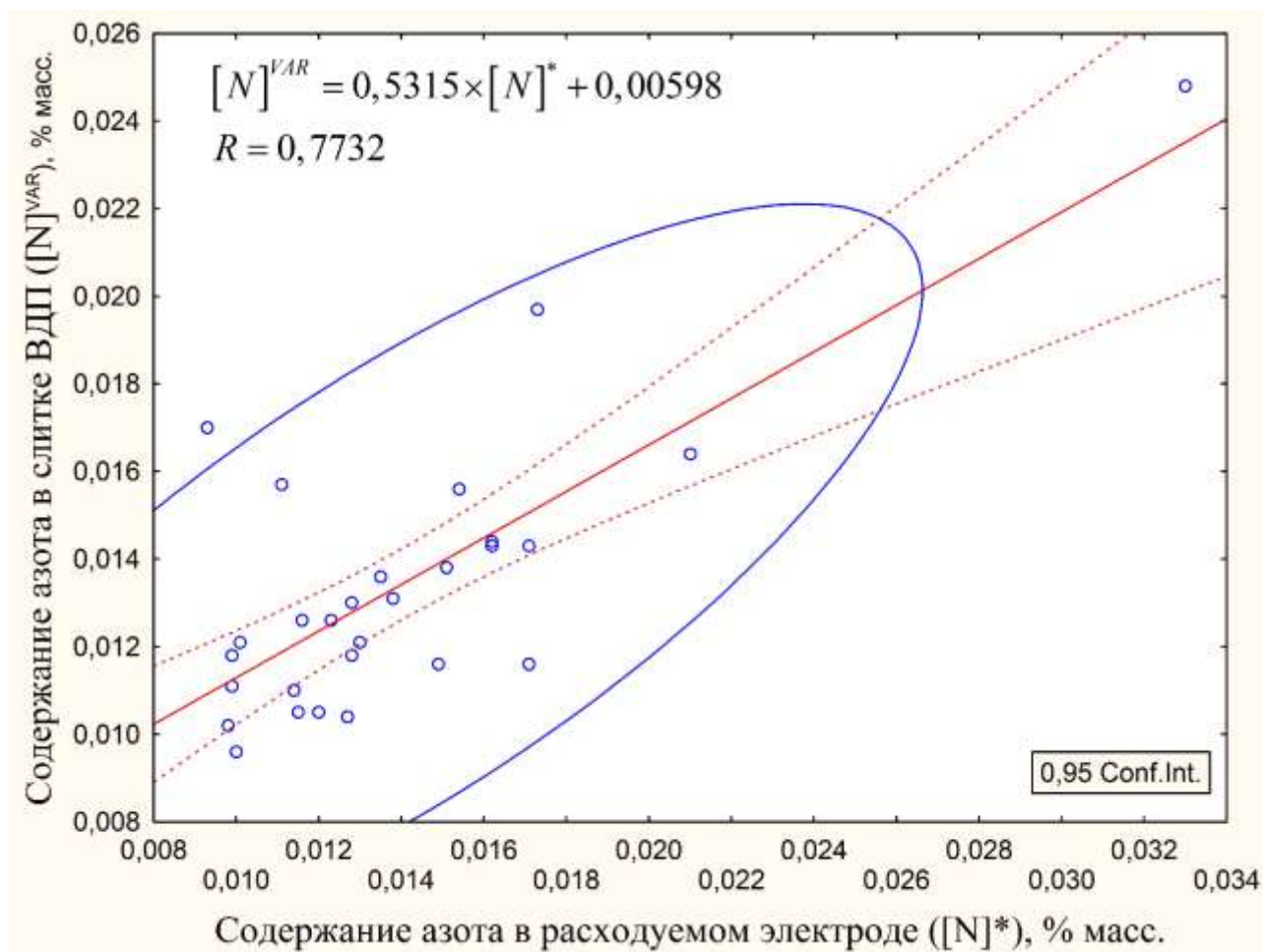


Рисунок 5.3. Влияние содержание азота в расходуемом электроде на концентрацию азота в слитке ВДП

При этом основными факторами, способствующими удалению азота из металла, авторы работы [509] считают увеличение диаметра кристаллизатора ВДП и уменьшение массовой скорости переплава. Поскольку в нашем случае скорость переплава изменялась в очень узком интервале значений, то влияние этого фактора на содержание азота в слитках не зафиксировано. Аналогично не отмечено и влияние изменения диаметра кристаллизатора на содержание азота в слитке после переплава. Ожидаемая прямая связь концентрации азота после ВДП с его концентрацией в расходуемом электроде (рис.5.3) усиливается влиянием ниобия и бора, которые являются нитридообразующими компонентами и снижают активность азота в никеле. Снижения концентрации азота при ВДП падает и

полностью исчезает при уменьшении содержания его в расходуемом электроде ниже 12–13 ppm (см. рис.5.3). Это обусловлено двумя факторами:

- высокой растворимостью азота в сплавах, содержащих большое количество хрома [194];
- недостаточным разрежением (вакуумом) в реакционных зонах ВДП, которое может быть обусловлено как техническими требованиями для устойчивости процесса переплава, так и натеканием.

Равновесное парциальное давление азота в печи ВДП, соответствующее уровню концентраций азота в слитках ВДП, рассчитывали согласно стандартной методике, описанной в разделе 2. Для расчета равновесного парциального давления азота использовали средний химический состав сплава ВЖ 159 по результатам анализа 28 слитков ВДП, результаты расчета величины равновесного парциального давления азота над расплавом на основе Ni приведены в табл.5.9.

Таблица 5.9. Результаты расчета равновесного парциального давления азота над никелевым сплавом ВЖ 159

| Содержание азота в сплаве, ppm | Минимальное | Среднее | Максимальное |
|--|-------------|---------|--------------|
| | 96 | 126 | 248 |
| Равновесное парциальное давление азота над расплавом, мбар | 0,0007 | 0,0012 | 0,0048 |

Таким образом, достигаемое разрежение в печи ВДП 0,002–0,005 мбар в лучшем случае совпадает с равновесным парциальным давлением азота при максимальном содержании азота в сплаве, а для достижения содержания азота в сплаве ниже 12 ppm необходимо значительно большее разрежение в камере ВДП, что не может быть достигнуто без нарушения устойчивости дугового разряда.

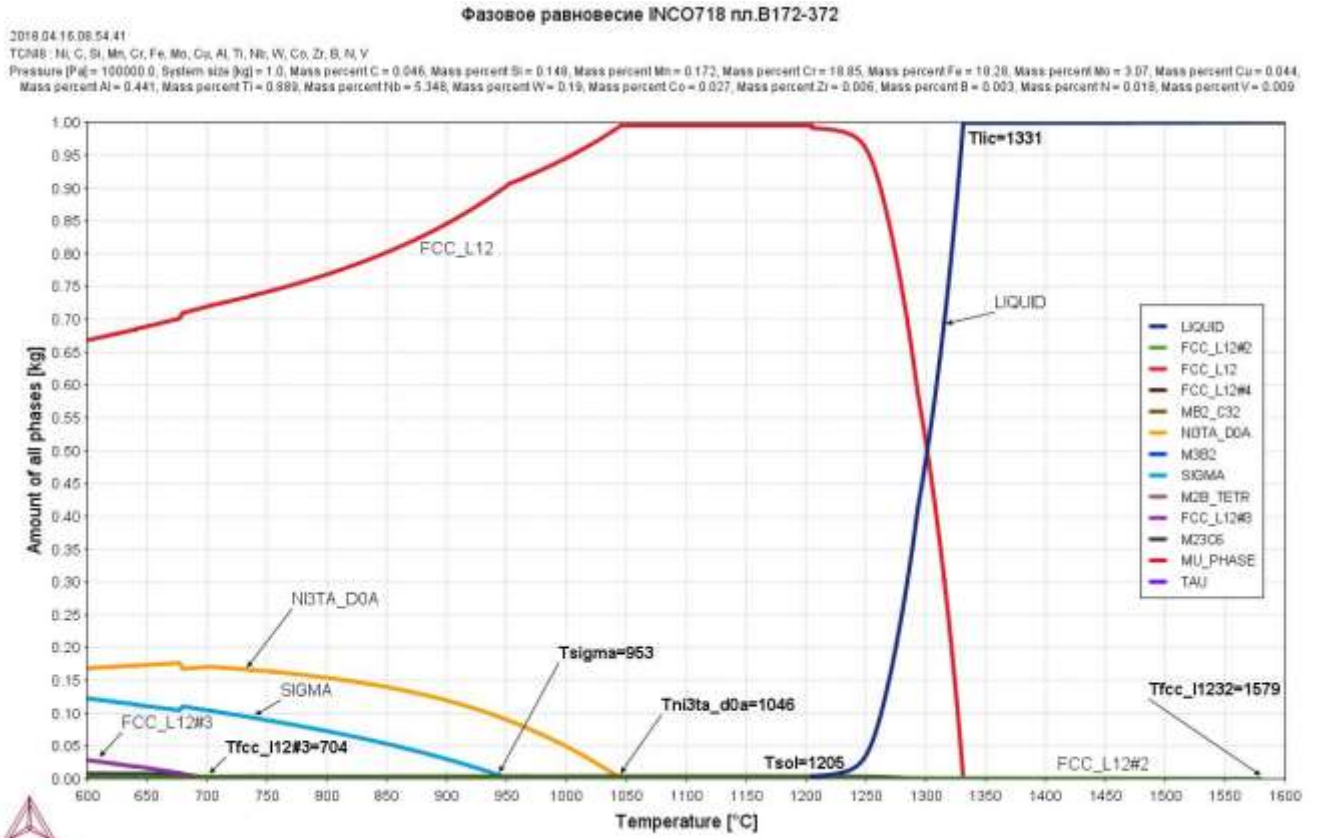
Уменьшение парциального давления азота при невозможности снизить давление в вакуумной камере достижимо в том случае, если заменить атмосферу воздуха, которая проникает в вакуумную камеру при натекании на нейтральный газ (см. предварительный расчет в разделе 3).

5.3. Управление качеством сплава Inconel 718 при реализации комплексной технологии триплекс – процесса: ВИП–ЭШП–ВДП

Корень проблемы азота в жаропрочных никелевых сплавах кроется в нерастворимости азота в первичной гамма-фазе сплава, что соответствует низкой растворимости азота в твердом никеле. Добавление относительно большого количества хрома в состав сплава существенно не меняет эту ситуацию. Как показывают результаты моделирования фазового равновесия жаропрочного никелевого сплава (далее ЖНС), азот, содержащийся в расплаве, скорее всего, к концу затвердевания полностью выделяется в виде отдельной фазы – в виде нитрида. Содержание азота в сплаве Inconel 718 находится в пределах 100–250 ppm (табл.5.1), поэтому механические свойства сплава в значительной степени контролируются прямым влиянием карбонитридных и интерметаллических выделений. Поскольку карбонитриды изоморфны первичной фазе сплава, они оказывают существенное косвенное влияние на поведение сплава. Кроме того, поскольку частицы карбонитрида могут присутствовать в расплаве сплава (рис.5.4, 5.5), они играют значительную роль в агломерации включений с образованием дефектов, которые находятся в диапазоне размеров, влияющих на свойства сплава, даже если диапазон размеров отдельных частиц может быть ниже, чем требуется, например, для образования зародышей трещин в условиях усталостного нагружения.

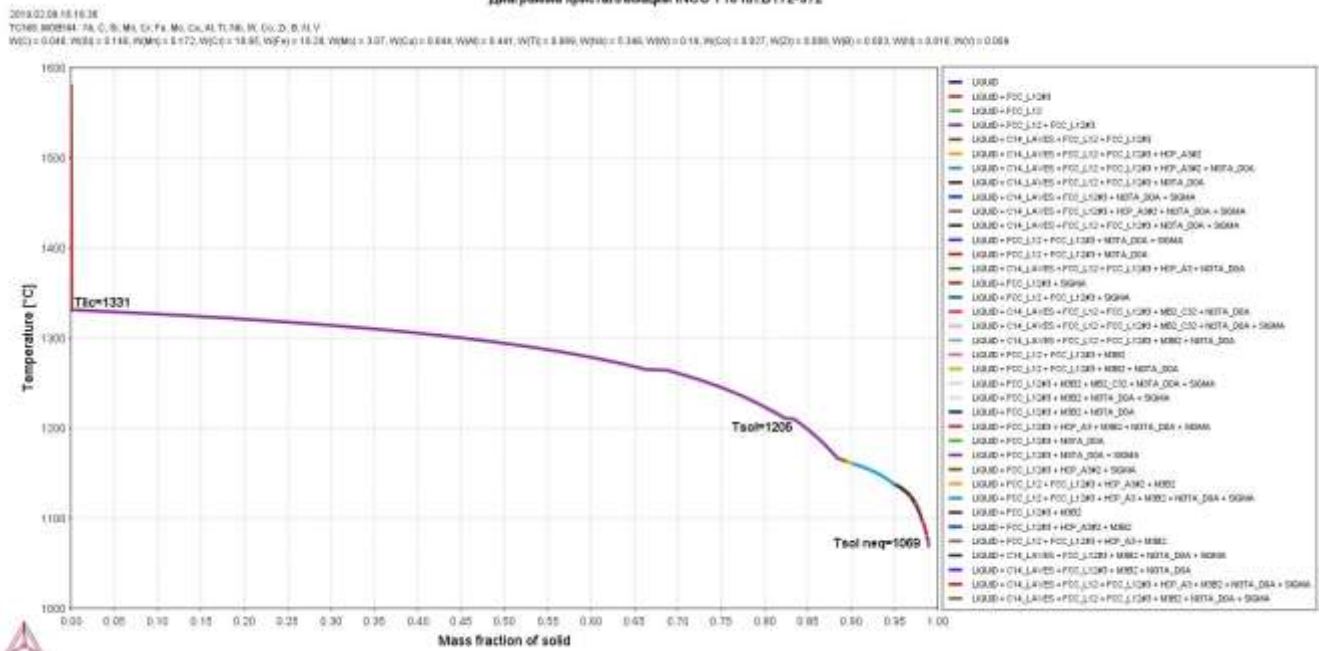
В то же время известно, что электрошлаковый переплав благодаря наличию рафинирующей фазы в виде шлака способствует радикальному очищению металла от неметаллических включений и их скоплений. Поэтому было проведено изготовление опытно-промышленной партии сплава Inconel 718 по триплексной технологической схеме: ВИП–ЭШП–ВДП.

В вакуумной индукционной печи ВИП-4,6 была проведена выплавка сплава Inconel 718 (две плавки, номера плавков ЗИ18-593 и ЗИ18-594) с получением пяти цилиндрических слитков диаметром 190 мм в каждой плавке.



а)

Диаграмма кристаллизации INCO 718 пл.В172-372



б)

Рисунок 5.4. Результаты моделирования фазового равновесия и процесса неравновесной кристаллизации (модель Шейля-Гулливера) слитка В172-372

сплава Inconel 718 в пакете прикладных программ Thermo-Calc:

а) фазовое равновесие слитка В172-372 сплава Inconel 718; б) диаграмма неравновесного процесса кристаллизации слитка В172-372 сплава Inconel 718.

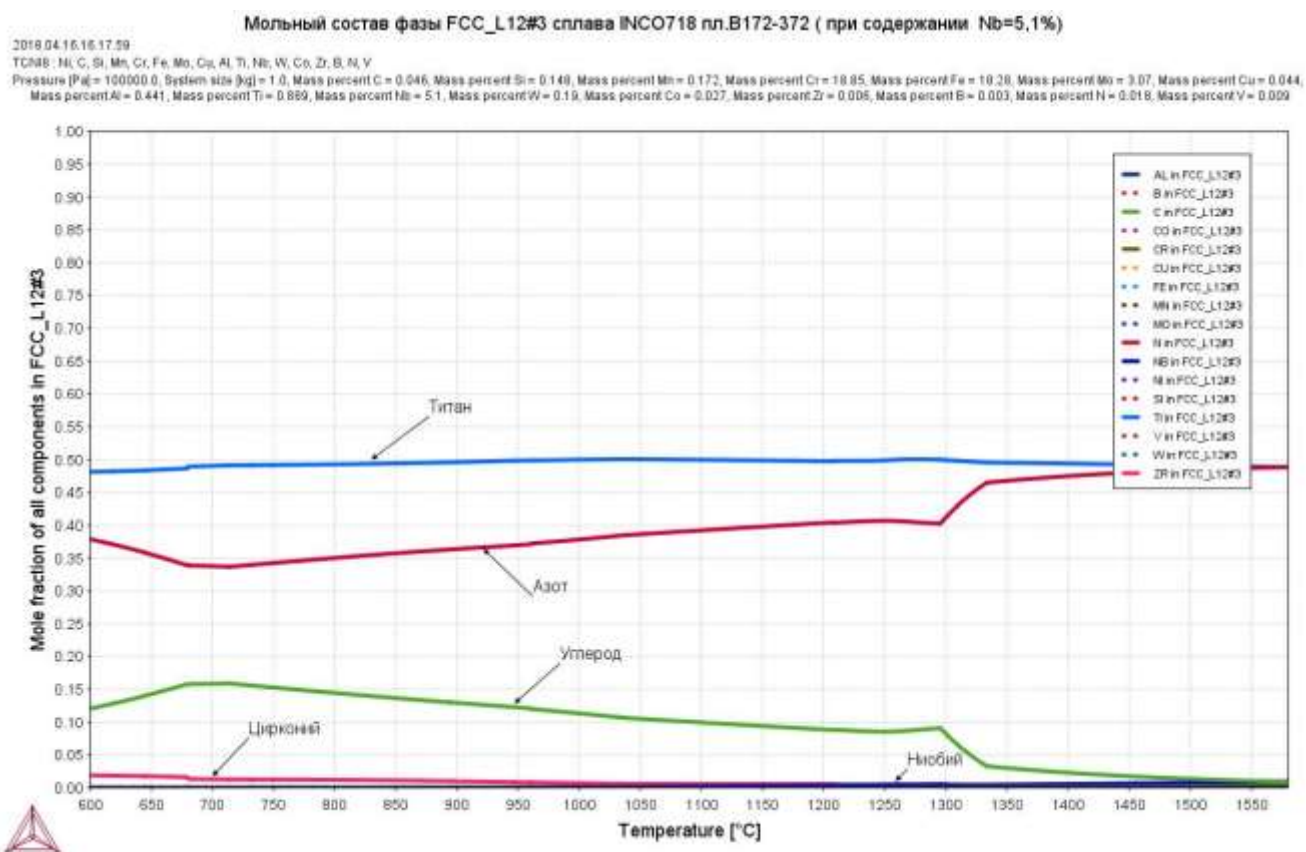


Рисунок 5.5. Результат моделирования равновесного состава карбонитридной фазы (фаза FCC_L12#3) слитка В172-372 сплава Inconel 718 в пакете прикладных программ Thermo-Calc

Затем провели два электрошлаковых переплава (номера плавки E183-211 и E183-212) с получением двух слитков ЭШП диаметров 300 мм последовательным сплавлением по пять слитков – расходимых электродов, полученных в ВИП, в каждый слиток ЭШП. Слиток ЭШП E183-212 после подготовки был переплавлен в вакуумной дуговой печи в слиток диаметром 388 мм (плавка В192-36). Образцы слитков ЭШП и ВДП были исследованы в рамках соответствия металла стандарту AMS 5662N. На рис. 5.6–5.9 показаны схемы порезки слитков ЭШП и ВДП и темплетов от этих слитков в соответствии с методикой эксперимента, изложенной в разделе 2.

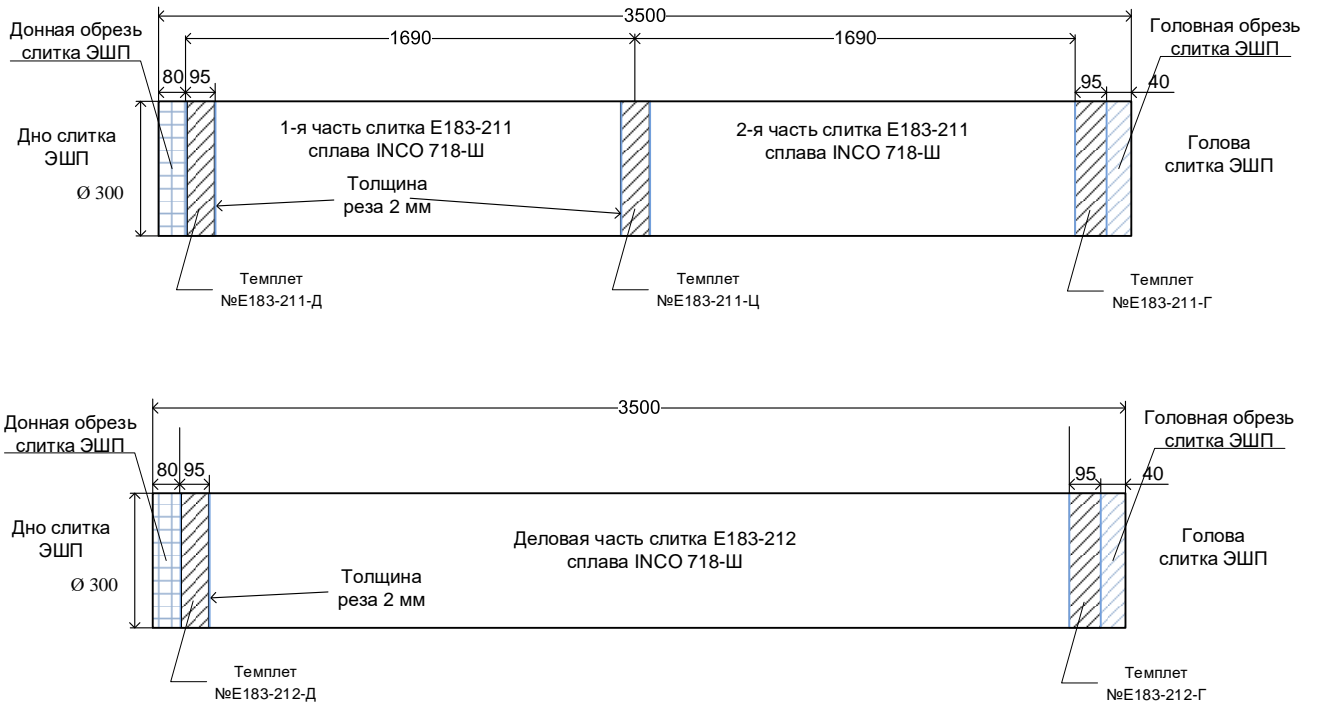


Рисунок 5.6. Схема порезки слитков E183-211 и E183-212 сплава Inconel 718

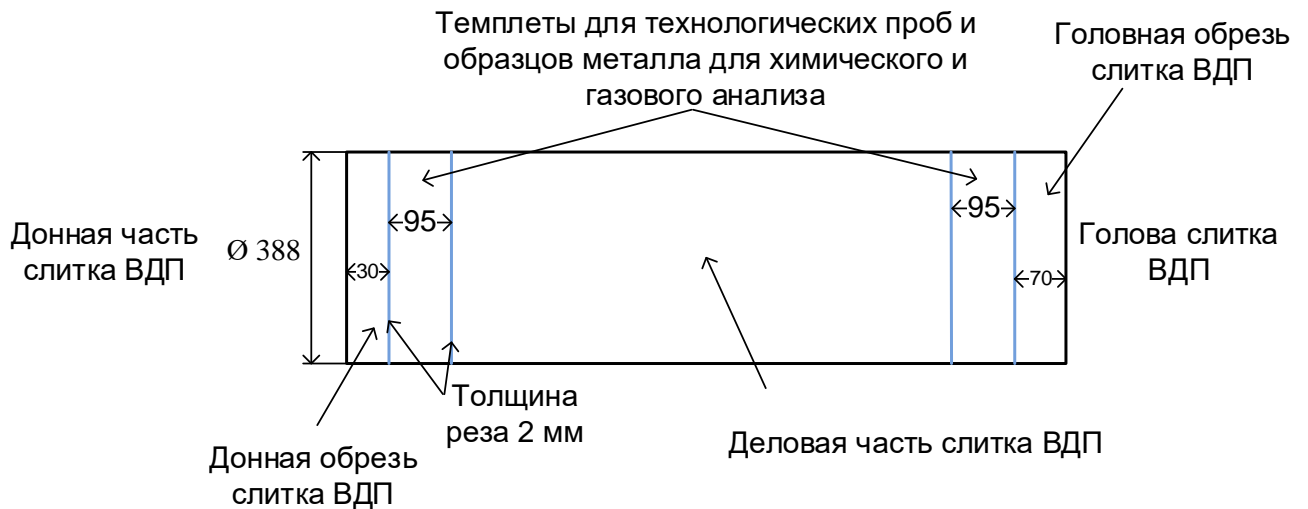


Рисунок 5.7. Схема порезки слитка B192-36 сплава Inconel 718

Химический состав металла слитков ВИП – расходуемых электродов для ЭШП, слитков ЭШП и слитка ВДП представлен в таблице 5.10.

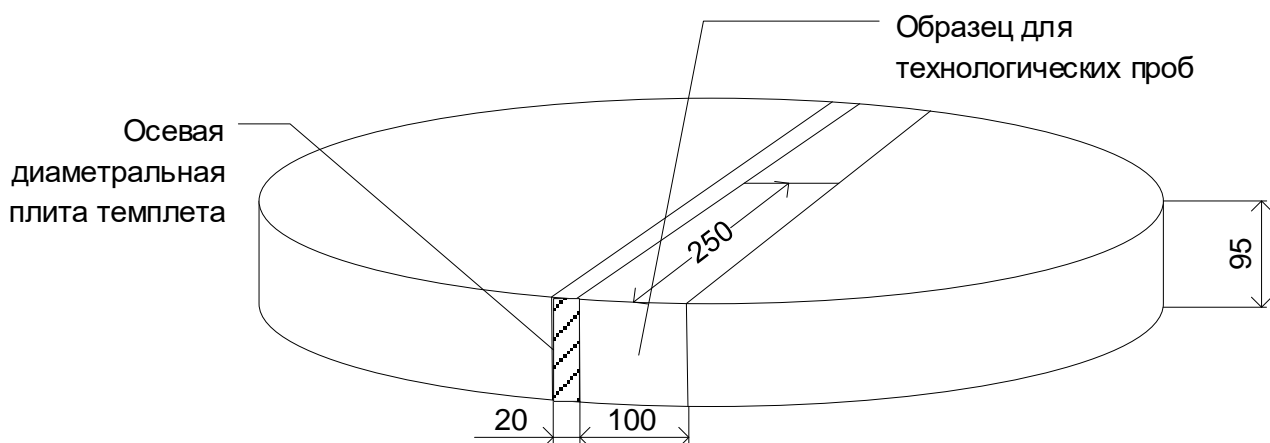


Рисунок 5.8. Схема порезки поперечных темплетов E183-211-Д, E183-211-Ц, E183-211-Г, E183-212-Д, E183-212-Г, B192-36-Д и B192-36-Г

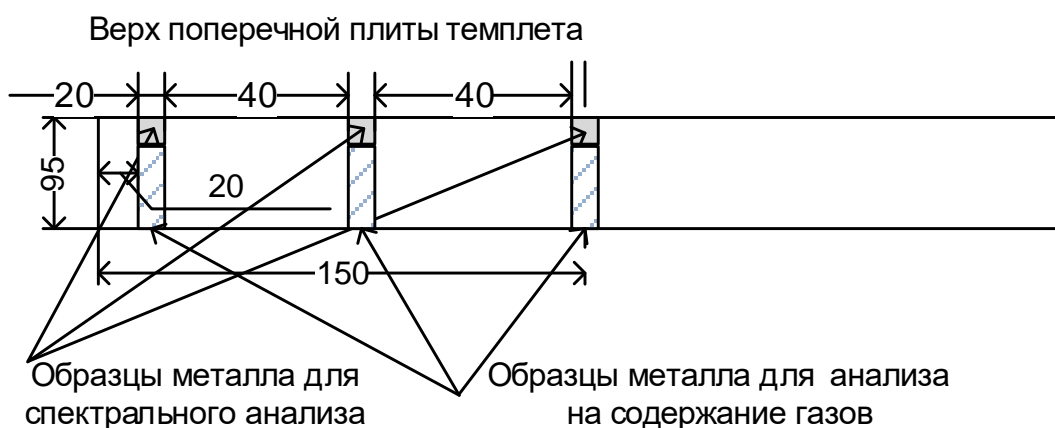


Рисунок 5.9. Схема порезки осевой диаметральной плиты поперечных темплетов E183-211-Д, E183-211-Ц, E183-211-Г, E183-212-Д, E183-212-Г, B192-36-Д и B192-36-Г

5.3.1. Выплавка сплава Inconel 718 в вакуумной индукционной печи

Выплавка в ВИП проводилась седьмой и восьмой по счету плавкой в кампании после во время выплавки серии заказов по Inconel 718. Состав металлошихты плавков ЗИ-18-593 и ЗИ-18-594 приведены в табл. 5.11.

В печь загрузили чистое железо, металлический хром, металлический молибден, никель, и никель-ниобиевую лигатуру. Расплавление проходило при мощности 500 кВт при давлении в плавильной камере печи 0,01 мбар.

Таблица 5.10. Химический состав металла слитков ВИП – расходоуемых электродов для ЭШП, слитков ЭШП и слитка ВДП сплава Inconel 718

| Компонент сплава | Химический состав, % масс. | | | | | | | | | | | | |
|------------------|----------------------------|----------------|-----------------------------|--------|---|--------|---------|-----------------------------|--------|---------------------------------------|---------|--------------------|--|
| | Требования AMS5662N | | Слитки плавки ВИП 3И-18-594 | | Слиток ЭШП E183-211 (из расходоуемых электродов пл.3И-18-594) | | | Слитки плавки ВИП 3И-18-593 | | Слиток ЭШП E183-212 (из пл.3И-18-593) | | Слиток ВДП В192-36 | Среднее содержание в слитках ВДП (2018 – 2019г.г.) |
| | Мин. | Макс. | Дно | Центр | Голова | Дно | Центр | Голова | Дно | Голова | Дно | Голова | |
| C | - | 0,08 | 0,029 | 0,028 | 0,029 | 0,028 | 0,029 | 0,021 | 0,024 | 0,023 | 0,018 | 0,034 | |
| Si | - | 0,35 | 0,068 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,018 | 0,028 | 0,031 | 0,031 | 0,039 | 0,104 | |
| Mn | - | 0,35 | 0,094 | 0,094 | 0,096 | 0,094 | 0,096 | 0,093 | 0,092 | 0,095 | 0,081 | 0,061 | |
| P | - | 0,015 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,0013 | |
| S | - | 0,015 | <0,001 | 0,0011 | 0,0018 | 0,0014 | 0,0014 | <0,001 | 0,0022 | 0,0020 | 0,0013 | 0,0034 | |
| Cr | 17 | 21 | 17,55 | 17,85 | 17,86 | 17,86 | 18,17 | 18,17 | 17,83 | 17,86 | 18,06 | 18,07 | |
| Ni | 50 | 55 | 54,12 | 53,72 | 53,70 | 53,70 | 53,46 | 53,46 | 54,02 | 54,04 | 53,9 | 53,24 | |
| Mo | 2,8 | 3,3 | 3,11 | 3,05 | 3,04 | 3,04 | 3,01 | 3,01 | 3,08 | 3,05 | 2,97 | 3,021 | |
| Cu | - | 0,3 | 0,016 | 0,016 | 0,017 | 0,016 | 0,020 | 0,020 | 0,017 | 0,018 | 0,02 | 0,036 | |
| Ti | 0,65 | 1,15 | 0,959 | 1,025 | 0,942 | 0,942 | 0,968 | 0,968 | 1,004 | 0,958 | 0,944 | 0,961 | |
| B | - | 0,006 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,0034 | |
| Al | 0,2 | 0,8 | 0,430 | 0,507 | 0,557 | 0,557 | 0,565 | 0,565 | 0,487 | 0,450 | 0,531 | 0,455 | |
| Fe | ост. | ост. | 18,16 | 18,14 | 18,18 | 18,18 | 18,05 | 18,05 | 17,81 | 18,30 | 18,0 | 18,40 | |
| Nb | 4,75 | 5,5 | 5,256 | 5,326 | 5,322 | 5,322 | 5,345 | 5,345 | 5,364 | 5,267 | 5,167 | 5,191 | |
| Co | - | 1 | 0,001 | 0,003 | 0,004 | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,006 | 0,06 | 0,072 | |
| Pb | - | 0,0005 | - | - | - | - | 0,0001 | 0,0001 | - | - | - | 0,00018 | |
| Se | - | 0,0003 | - | - | - | - | 0,0003 | 0,0003 | - | - | - | 0,00030 | |
| Bi | - | 0,00003 | - | - | - | - | 0,00003 | 0,00003 | - | - | - | 0,00003 | |
| Азот | | | 0,0100 | 0,0100 | 0,0110 | 0,0110 | | | 0,0090 | 0,0080 | 0,0090 | 0,0148* | |
| Водород | | не нормируется | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | 0,0003 | | | 0,0003 | 0,0002 | 0,00005 | | |
| Кислород | | | 0,0015 | 0,0015 | 0,0020 | 0,0020 | | | 0,0020 | 0,0015 | 0,0012 | 0,0014* | |

Примечание: * - данные получены методом атомно-эмиссионного спектрального анализа.

Таблица 5.11. Состав шихты на выплавку опытно-промышленной партии сплава Inconel 718 по стандарту AMS 5662N

| Наименование материала | Марка материала | Доля в металлошихте пл.3И-18-593, % | Доля в металлошихте пл.3И-18-594, % |
|--------------------------|-----------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Основная завалка | | | |
| Чистое железо | ПРШЗ | 17,81 | 17,81 |
| Хром | ЭРХ-1 | 17,84 | 17,85 |
| Никель | Н1У | 52,59 | 52,60 |
| Никель-ниобий | НиНб-1 | 6,19 | 6,19 |
| Молибден | МШ-В | 3,00 | 3,00 |
| Дополнительные материалы | | | |
| Титан | ОТ-4 | 1,01 | 0,99 |
| Алюминий | А99 | 0,45 | 0,45 |
| Никель-бор | НБ-1 | 0,75 | 0,75 |
| Никель-магний | НМг5 | 0,25 | 0,25 |
| Марганец | Мн965 | 0,11 | 0,11 |
| Всего | | 100 | 100 |

После полного расплавления шихты была измерена температура расплава - 1500°С, произведена выдержка в течение 10 мин и электромагнитное перемешивание в течение 5 мин. По результатам первой контрольной пробы в расплав присаживался электродный боя до целевого содержания по углероду 0,02% масс. Затем произвели выдержку 20 мин и 5 мин электромагнитное перемешивание расплава. Далее присадили металлический хром для достижения целевого содержания 18% масс., никель-ниобиевую лигатуру – до целевого содержания 5,3% масс. Произвели выдержку 10 мин и 5 мин электромагнитное перемешивание. Затем присадили алюминий до целевого содержания 0,55% масс. и отходы производства изделий из титанового сплава ОТ4 до целевого содержания 1,0% масс. Ti. Произвели выдержку и электромагнитное перемешивание в течение 5 мин. Далее присадили лигатуру никель-бор до расчетного содержания по бору 0,004% масс. Произвели выдержку и электромагнитное перемешивание 5 мин. Отобрали вторую контрольную пробу расплава. По результатам химического экспресс-

анализа второй была произведена коррекция содержания алюминия до целевого содержания 0,55% масс. и титана до целевого содержания 1,0% масс. Произвели выдержку и электромагнитное перемешивание. Отобрали третью контрольную пробу металла. По получению результатов химического анализа третьей пробы в плавильной камере ВИП подняли давление до 100 мбар за счет напуска аргона. При этом давлении присадили марганец для доведения расплава до целевого содержания марганца 0,075% масс. После выдержки и перемешивания присадили лигатуру никель-магний в количестве, обеспечивающем расчетное содержание магния 0,01% масс. Произвели электромагнитное перемешивание, отобрали конечную пробу металла и приступили к выпуску металла из печи. Результат конечной пробы представлен в табл.5.10.

Разливку осуществляли при температуре 1445°C в цилиндрические изложницы через промежуточный ковш.

5.3.2. Электрошлаковый переплав сплава Inconel 718

Переплав проводился методом вытягивания слитка в короткий кольцеобразный кристаллизатор диаметром 300 мм. Метод начала плавки – твердый старт

В качестве защитной атмосферы использовали смесь аргона (92%) и азота (8%). Более высокая для аргона запрещена руководством по технической эксплуатации агрегата заводом-изготовителем печи.

Для переплава использовали промышленный флюс АКФ225ТМ в количестве 25кг, паспортный состав флюса: CaO=17,0–22,0%; Al₂O₃=20,0–25,0%; CaF₂=45,0–52,0%; TiO₂=2,0–4,0%.

Скорость переплава поддерживалась на уровне 205–220 кг/ч на плавке E183-211 и 205–210 кг/ч на плавке E183-212 с незначительными отклонениями в установившемся периоде переплава.

Фактические электрические параметры в установившемся стационарном режиме переплава:

- для пл. E183-211 сила тока 7,0–7,5 кА, напряжение 38–42 В; сопротивление 6,0–6,3 мОм,
- для пл. E183-212 сила тока 6,5–7,0 кА; напряжение 39,0–42,0 В; сопротивление 6,0–6,5 мОм.

На пл. E183-211 при переплаве четвертого расходуемого электрода наблюдалось повышение фактических колебаний и сопротивления, что, вероятнее всего, может быть связано с возможными несплошностями самого расходуемого электрода.

Для пл. E183-211 общее время переплава составило 9 часов 15 минут из которых продолжительность старта составила 30 минут, вывод усадочной раковины 21 минута и остальное время занял установившийся период переплава. Расход электроэнергии 1084 кВт-ч/т. Масса слитка E183-211 составила 2133 кг.

Для пл. E183-212 общее время переплава составило 9 часов 10 минут из которых продолжительность старта составила 30 минут, вывод усадочной раковины 21 минута. Расход электроэнергии 1382,8 кВт-ч/т. Масса слитка E183-212 составила 2100 кг.

5.3.3. Контроль качества слитков электрошлакового переплава сплава Inconel 718

Химический состав слитков ЭШП соответствует требованиям стандарта AMS5662N.

Твердость сплава Inconel 718.

Исследование твердости образцов согласно требований стандарта AMS5662N проводится только на образцах сплава, прошедших термическую обработку: закалка с 970°С, выдержка 1 час, на воздухе; 718° С, выдержка 8 часов, охлаждение с печью до 621° С в течение 2 часов, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе (общее время дисперсионного упрочнения 18 часов). В табл. 5.12 приведены результаты замера твердости на термообработанных образцах от темплетов слитков E183-211 и E183-212.

Таблица 5.12. Сравнение средних значений замера твердости на образцах сплава Inconel 718 от темплетов слитков ЭШП и нормативных требований

| Слиток плавки | Темплеты | Твердость, НВ |
|-------------------------------|--------------------------|---------------|
| E183-211 | Донная часть слитка | 415 |
| | Центральная часть слитка | 415 |
| | Головная часть слитка | 388 |
| E183-212 | Донная часть слитка | 388 |
| | Головная часть слитка | 415 |
| Требования стандарта AMS5662N | не менее | 331 |

По показателям твердости металл опытных слитков ЭШП удовлетворяет требованиям стандарта. Описать

Макро- и микроструктура слитков ЭШП сплава Inconel 718 диаметром 300 мм.

Макроструктура слитка ЭШП изучалась только на одном из слитков E183-211, поскольку второй слиток E183-212 после отбора необходимых темплетов предназначался для вакуумного дугового переплава. Согласно заключения металлографического исследования макроструктура слитка E183-211 (участок отобран из центральной части слитка рис. 5.10) литая с четко выраженной направленностью роста кристаллов.

Микроструктура исследовалась на перекованных образцах металла. Согласно стандарта AMS5662N параграф 3.5.1.1.2.2 исследованию подлежит образец площадью от 9 до 50 кв. дюймов (58 до 323 см²), допускается средний размер зерна №4 по ASTM или мельче, до 20% поперечного сечения средний размер зерна с №2 по №4 при оценке по методике, изложенной в стандарте ASTM E 112; согласно параграфу 3.5.1.1.3 образец не должен иметь фаз Лавеса, полосчатость игольчатой фазы должны соответствовать стандартам покупателя.

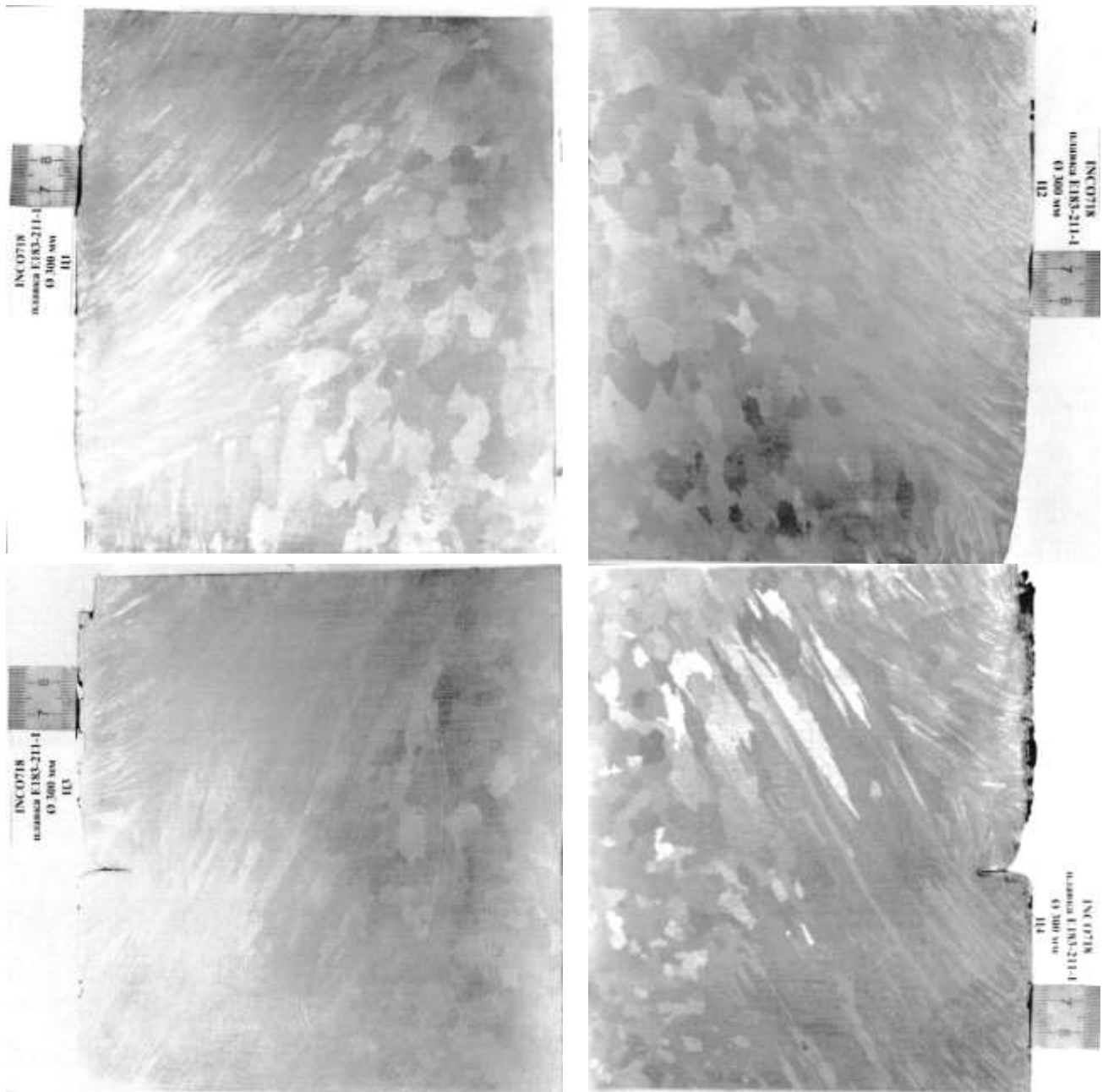
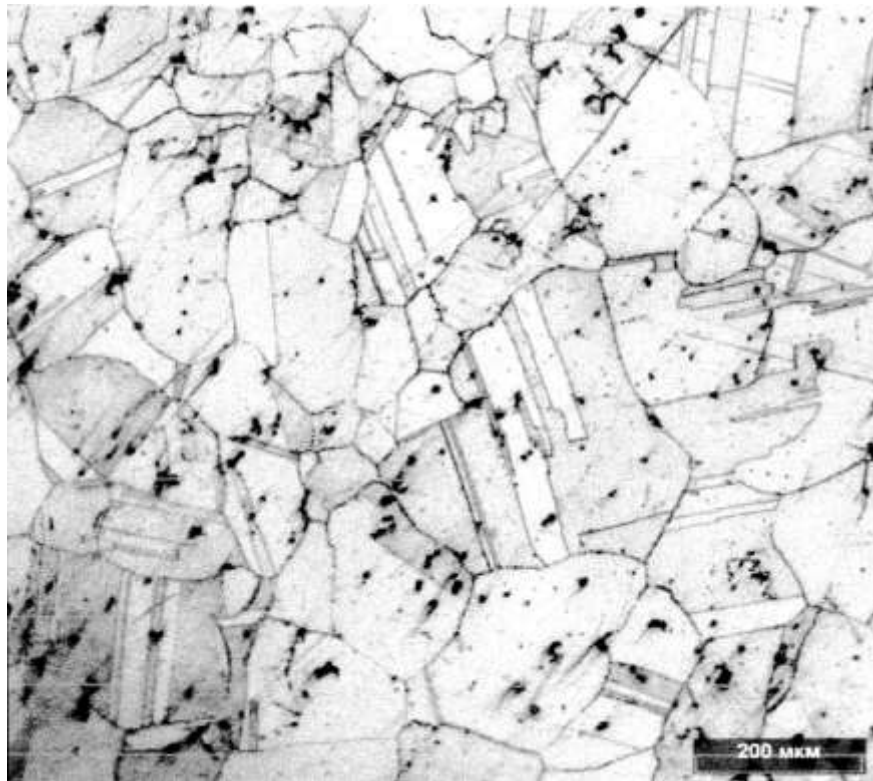
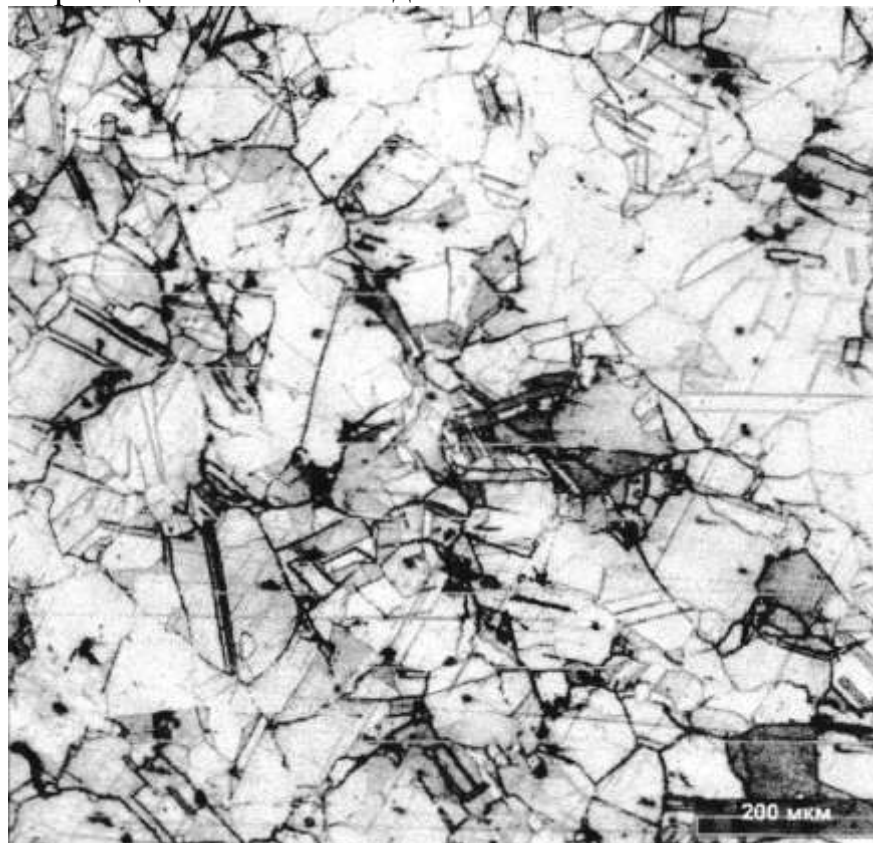


Рисунок 5.10. Макроструктура продольного темплета центральной части слитка E183-211

Образцы от трех темплетов слитка E183-211 характеризуются следующими размерами зерна: от донного темплета – №3, №4, №2, от темплета из центра слитка №5 и №4, от темплета из головной части слитка – №8. Во всех образцах фаза Лавеса отсутствует, на образцах от темплетов из центра слитка и головной части наблюдаются выделения игольчатой фазы (рис. 5.11, 5.12).



Образец от темплета из донной части слитка E183-211



Образец от темплета из центральной части слитка E183-211

Рисунок 5.11. Микроструктура образцов от донного и центрального темплетов слитка E183-211 после травления в реактиве Каллинга (увеличение в 100 раз)

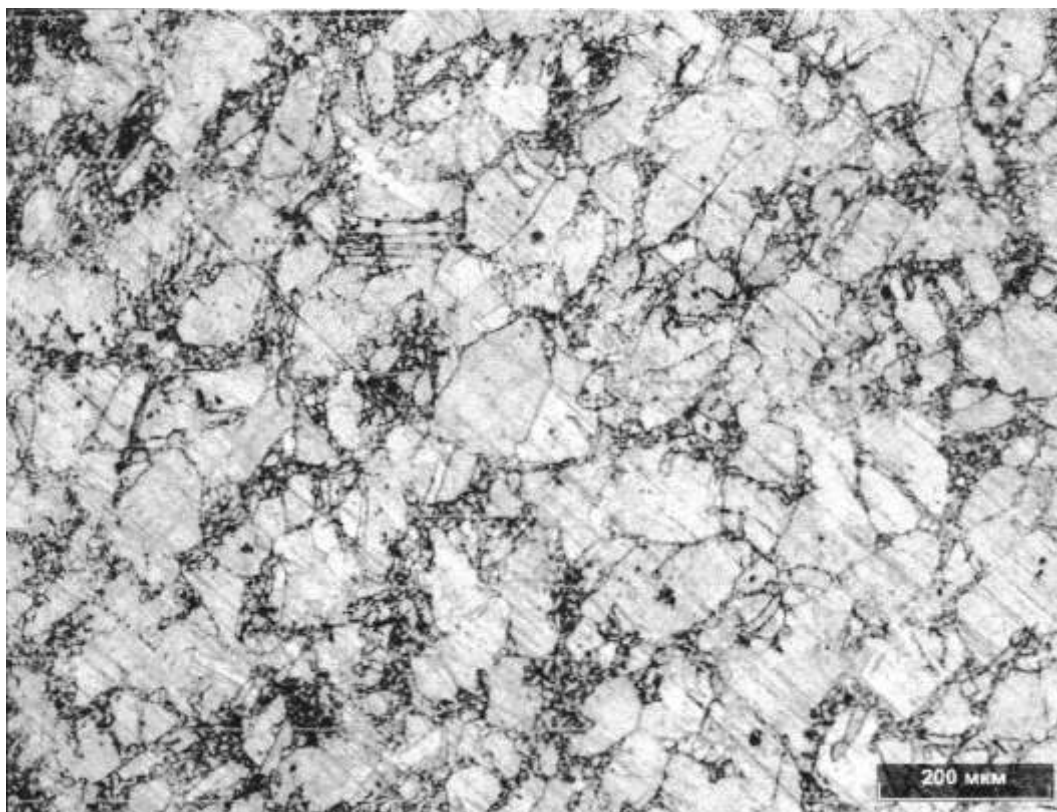


Образец от темплета из головной части слитка E183-211

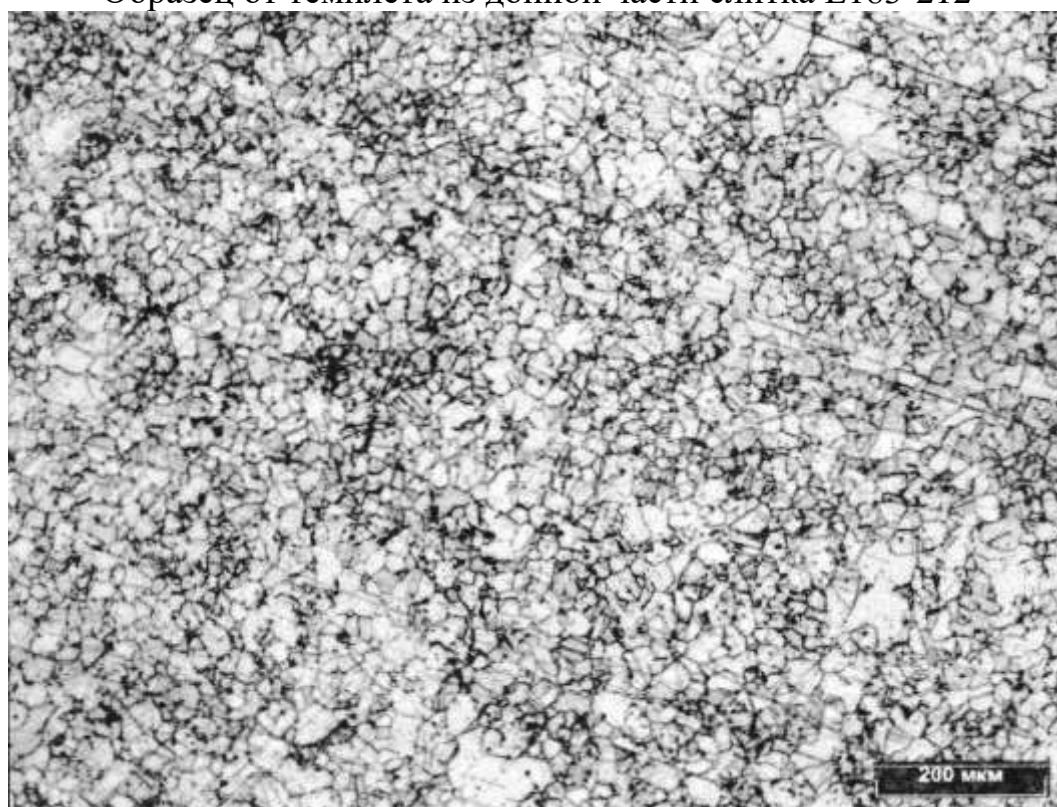
Рисунок 5.12. Микроструктура образцов от темплета из головной части слитка E183-211 после травления в реактиве Каллинга (увеличение в 100 раз)

Образцы от двух темплетов слитка E183-212 характеризуются следующими размерами зерна: от донного темплета - №4, №5, №9, от темплета из головной части слитка - №8, №7 и отдельные зёрна №6. Во всех образцах фаза Лавеса отсутствует, наблюдаются выделения игольчатой фазы (рис. 5.13).

Металлографические исследования металла опытных слитков ЭШП сплава Inconel 718 подтвердили полное соответствие требованиям стандарта AMS5662N.



Образец от темплета из донной части слитка E183-212



Образец от темплета из головной части слитка E183-212

Рисунок 5.13. Микроструктура образцов от донного и центрального темплетов слитка E183-212 после травления в реактиве Каллинга (увеличение в 100 раз)

5.3.4. Вакуумный дуговой переплав электрошлакового расходуемого электрода сплава Inconel 718

Из слитка ЭШП плавки E183-212 подготовили расходуемый электрод для вакуумного дугового переплава. Переплав расходуемого электрода из сплава Inconel 718 проводили в кристаллизатор диаметром 388 мм, номер плавки - В192-36. Технология подготовки и проведения переплава сплава Inconel 718 плавки В192-36 полностью соблюдена в соответствии с требованиями Предприятия А (предприятия-изготовителя). Процесс во всех периодах переплава протекал стабильно и без отклонений. В качестве дополнительного охлаждения применяли гелий, подаваемый в зазор между слитком и стенкой кристаллизатора. Фактические (средние) параметры переплава в установившемся режиме: сила тока – 4,80 кА; напряжение – 26 В, скорость переплава – 170 кг/ч. По окончании переплава слиток выдерживали в кристаллизаторе под вакуумом 1 час 40 минут. Расход электроэнергии на плавку составил 1352,5 кВт·ч/т.

От слитка пл. В192-36 после технологической обрезки (головная обрезь не менее 100 мм, донная – не менее 30 мм) вырезали темплеты от донной и головной частей слитка (ширина темплета 20+5 мм) для определения химического состава, проведения металлографических испытаний и испытаний механических свойств. Химический состав сплава Inconel 718 пл. В192-36 приведен в табл.5.10.

5.3.5. Контроль качества слитка вакуумного дугового переплава сплава Inconel 718

Исследование макроструктуры слитка ВДП оценивали по поперечным темплетам слитка (донному и головному). Макроструктура поперечных темплетов плотная, по величине зерна с незначительной разнотернистостью: у поверхности зерно несколько крупнее, чем в центре сечения (рис.5.14). Дефектов не обнаружено.



Донный темплет слитка В192-36



Темплет от головной части слитка В192-36

Рисунок 5.14. Макроструктура поперечных темплетов слитка В192-36

Образцы от донного темплета слитка В192-36 характеризуются следующими размерами зерна: на у поверхности слитка №2 и №1, на половине радиуса №2, №1, и №7, в центре сечения №3, №2, №6, №7. Во всех образцах донного темплета фаза Лавеса и игольчатая фаза отсутствуют (рис. 5.15).

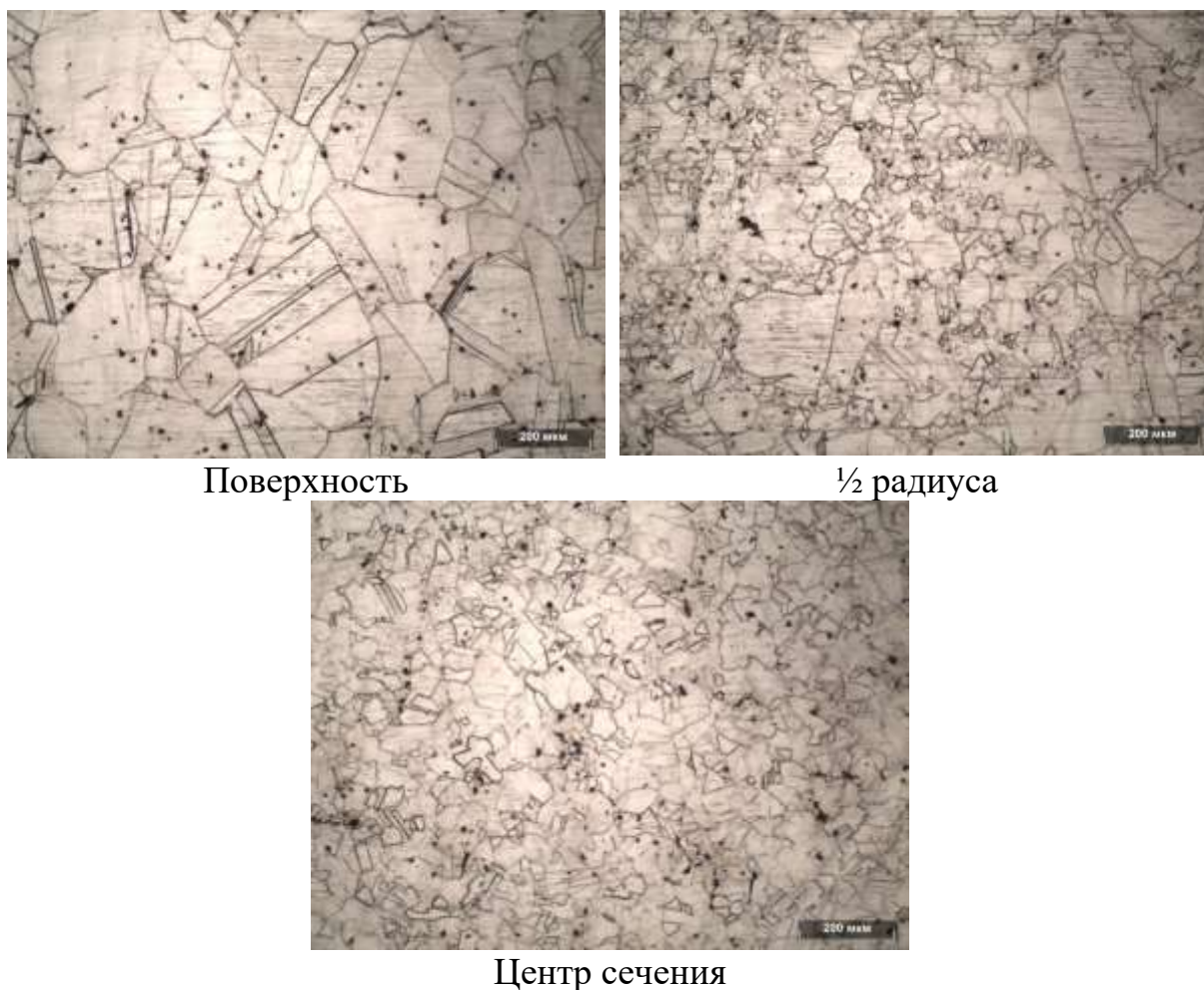


Рисунок 5.15. Микроструктура образцов от донного темплета слитка В192-36 после травления в реактиве Каллинга (увеличение в 100 раз)

Образцы от темплета головной части слитка В192-36 характеризуются следующими размерами зерна: на у поверхности слитка №3 и №2, на половине радиуса №3, №2, и №7, в центре сечения №6, №5. Во всех образцах темплета от головной части слитка фаза Лавеса и игольчатая фаза отсутствуют (рис. 5.16).

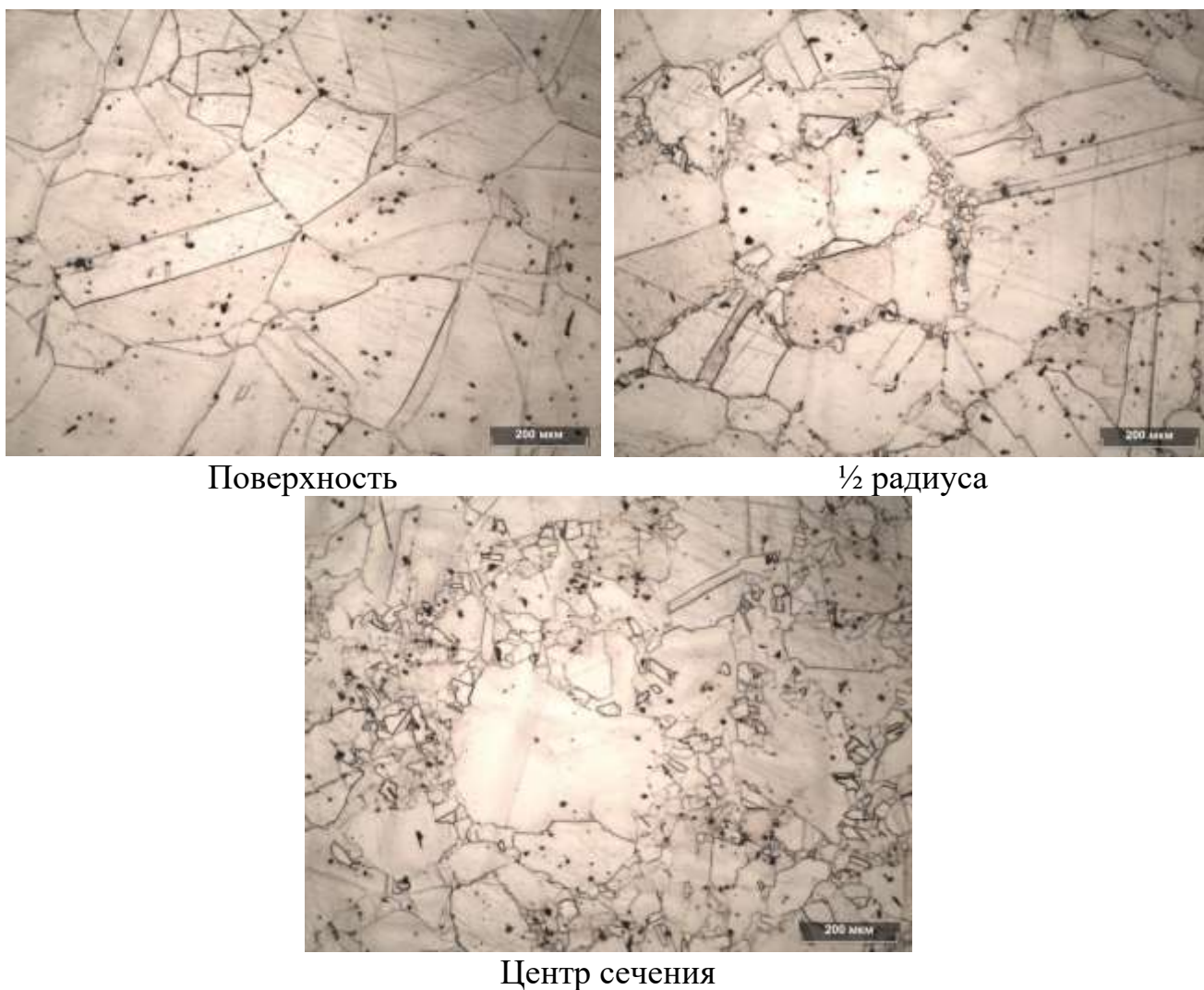


Рисунок 5.16. Микроструктура образцов темплета от головной части слитка В192-36 после травления в реактиве Каллинга (увеличение в 100 раз)

Химический состав слитка В192-36 (табл.5.10) металлографические исследования образцов сплава Inconel 718 подтвердили полное соответствие требованиям стандарта AMS5662N.

5.3.6. Механические свойства металла, полученного на различных стадиях реализации триплекс - процесса

Результаты механических испытаний металла образцов, изготовленных из опытных слитков ЭШП и ВДП сплава Inconel 718, приведены в табл. 5.13, 5.14. В табл.5.15 приведены результаты испытаний на длительную прочность.

Таблица 5.13. Сравнение уровня механических свойств образцов опытных слитков сплава Inconel 718 в испытаниях при комнатной температуре (24°C)

| Характеристика | Нормативные требования AMS 5662N | Средняя величина за период 2018 - 2019 г.г. | Слиток E183-211 | | | Слиток E183-212 | | Слиток B192-36 | |
|---------------------------------------|----------------------------------|---|-----------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|
| | | | дно слитка | центр слитка | голова слитка | дно слитка | голова слитка | дно слитка | голова слитка |
| Предел прочности σ_B , МПа | не менее 1276 | 1338 | 1280 | 1323 | 1393 | 1415 | 1367 | 1482 | 1437 |
| Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа | не менее 1034 | 1134 | 1106 | 1148 | 1167 | 1227 | 1224 | 1221 | 1231 |
| Относительное удлинение δ , % | не менее 12 | 18,44 | 12,6 | 18,5 | 19,5 | 17,5 | 17,4 | 16,0 | 19,8 |
| Относительное сужение Ψ , % | не менее 15 | 35,58 | 31 | 40 | 44 | 40 | 45 | 26 | 40 |

Таблица 5.14. Сравнение уровня механических свойств образцов опытных слитков сплава Inconel 718 в испытаниях при повышенной температуре (649°C)

| Характеристика | Нормативные требования AMS 5662N | Средняя величина за период 2018 - 2019 г.г. | Слиток E183-211 | | | Слиток E183-212 | | Слиток B192-36 | |
|---------------------------------------|----------------------------------|---|-----------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|
| | | | дно слитка | центр слитка | голова слитка | дно слитка | голова слитка | дно слитка | голова слитка |
| Предел прочности σ_B , МПа | не менее 1000 | 1083 | 1075 | 1046 | 1127 | 1160 | 1093 | 1144 | 1145 |
| Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа | не менее 862 | 959 | 1008 | 980 | 1028 | 1027 | 941 | 1002 | 1032 |
| Относительное удлинение δ , % | не менее 12 | 16,33 | 18,5 | 6,7 | 26 | 20 | 34 | 17,5 | 15,2 |
| Относительное сужение Ψ , % | не менее 15 | 24,96 | 53 | 36 | 68 | 30 | 39 | 21,5 | 35,7 |

Таблица 5.15. Сравнение уровня длительной прочности образцов опытных слитков сплава Inconel 718 в испытаниях при одинаковом режиме термообработки (закалка с 970°C, выдержка 1 час, на воздухе; 718°C, выдержка 8 часов, охлаждение с печью до 621°C в течение 2 часов, выдержка 8 часов, охлаждение на воздухе (общее время дисперсионного упрочнения 18 часов))

| Характеристика | Нормативные требования AMS 5662N | Средняя величина за период 2018 - 2019 г.г. | Слиток E183-211 | | | Слиток E183-212 | | Слиток B192-36 | |
|---------------------------|----------------------------------|---|-----------------|--------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|---------------|
| | | | дно слитка | центр слитка | голова слитка | дно слитка | голова слитка | дно слитка | голова слитка |
| Длительная прочность, час | не менее 23 | 55,01 | 54,4 | 43,3 | 63,35 | 65,1 | 69,2 | 58 | 65 |

Таким образом, по результатам контроля опытных слитков ЭШП и ВДП из сплава Inconel 718 по всем показателям – химическому составу, геометрическим размерам и качеству поверхности, макроструктуре, микроструктуре – металл соответствует требованиям стандарта AMS5662N.

Поставленная цель – снижение содержания азота (см. табл.5.10) путём очищения металла вакуумной индукционной плавки от скоплений карбонитридных включений достигнут: содержание азота в опытном слитке вакуумного дугового переплава В192-36 в 1,64 раза меньше, чем среднее содержание азота в сплаве Inconel 718 поточного производства.

Дальнейшее совершенствование технологических приёмов, обеспечивающих низкое содержание азота в сплавах на никелевой основе связано с последовательной реализацией описанных выше предложений в сквозном технологическом процессе:

- 1) проведение выплавки в ВИП с интенсификацией вакуум-кислородного обезуглероживания с применением в завалку капсулированного оксида никеля;
- 2) обеспечение замены натекания воздуха в плавильную камеру ВИП натеканием нейтрального газа или смеси нейтрального газа с кислородом в зависимости от периода плавки;
- 3) проведение электрошлакового переплава при получении значений содержания азота в металле ВИП более 90 ppm;
- 4) обеспечение замены натекания воздуха в кристаллизатор ВДП натеканием нейтрального газа с атомной массой выше молекулярной массы азота и/или воздуха.

Таким образом, в условиях Предприятия А опробована и внедрена триплекс – технология производства слитков жаропрочного никелевого сплава Inconel 718, позволившая получать металл с содержанием азота не выше 65 ppm, что обеспечило решение проблемы импортозамещения данного вида сплава для нужд авиадвигателестроения РФ.

Выводы

1. Существующее промышленное производство жаропрочных и коррозионностойких сплавов на никелевой основе характеризуется повышенной концентрацией азота в готовой продукции относительно образцов премиального уровня качества ведущих иностранных производителей.

2. Термодинамическим моделированием установлено, что в равновесной газовой фазе над расплавом в вакуумной индукционной печи активность углерода для сплавов системы Ni-Mo ниже чем для сплавов систем N-Cr, Ni-Cr-Mo. Это явление использовано при разработке двухступенчатой технологии выплавки в вакуумной индукционной печи коррозионностойкого сплава на никелевой основе ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) с гарантированно низким содержанием углерода (до 50 ppm). За счет активации вакуум-кислородного обезуглероживания расплава металла путем добавки капсулированного оксида никеля на каждой ступени выплавки гарантированно обеспечили конечное содержание азота в металле не выше 50 ppm.

3. Содержание азота в слитке ВДП $[N]^{VAR}$ предопределяется концентрацией его в расходуемом электроде $[N]^*$, так для никелевого сплава установлена эмпирическая зависимость $[N]^{VAR} = 0,5315 \cdot [N]^* + 0,006$. Помимо основного фактора (содержания азота в расходуемом электроде) имеются еще два существенных фактора: содержание легирующих компонентов сплава в расходуемом электроде – ниобия $[Nb]^*$ и бора $[B]^*$. Полученная эмпирическая зависимость содержания азота в сплаве ВЖ 159 после ВДП от значимых факторов влияния имеет вид $[N]^{VAR} = 0,0106 \times [Nb]^* + 3,4578 \times [B]^* + 0,5206 \times [N]^* - 0,0347$.

4. Для интенсификации деазотирования сталей и сплавов при вакуумном дуговом переплаве, особенно при ВДП расходуемых электродов с низкой исходной концентрацией азота, необходимо исключить внешнее натекание воздуха, заменив его натеканием аргона.

5. Разработана технология триплекс-процесса (ВИП-ЭШП-ВДП) получения жаропрочного никелевого сплава Inconel 718, позволившая получать металл с содержанием азота не выше 65 ppm, что в 1,64 раза меньше, чем величина среднего содержания азота в сплаве Inconel 718 действующего производства. Металл опытных слитков, полученных по триплекс-технологии, по всем показателям – химическому составу, геометрическим размерам и качеству поверхности, макроструктуре, микроструктуре – соответствуют требованиям стандарта AMS5662N.

6. Дальнейшее совершенствование технологических приёмов, обеспечивающих низкое содержание азота в сплавах на никелевой основе связано с последовательной реализацией в сквозном технологическом процессе следующих рекомендаций:

- проведение выплавки в ВИП с интенсификацией вакуум-кислородного обезуглероживания с применением в завалку капсулированного оксида никеля;
- обеспечение замены натекания воздуха в плавильную камеру ВИП натеканием нейтрального газа или смеси нейтрального газа с кислородом в зависимости от периода плавки;
- проведение электрошлакового переплава при получении значений содержания азота в металле ВИП более 90 ppm;
- обеспечение замены натекания воздуха в кристаллизатор ВДП натеканием нейтрального газа с атомной массой выше молекулярной массы азота и/или воздуха.

Основные материалы настоящего раздела опубликованы в работах [443, 498, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе изложены новые научные результаты и технологические решения, внедрение которых позволило решить важную научно-техническую проблему управления содержанием азота и углерода в сталях и никелевых сплавах в плавильных процессах, что вносит значительный вклад в развитие металлургии чёрных и цветных металлов. Установлена зависимость влияния парциального давления кислорода в газовой фазе на растворимость углерода в расплаве железа системы Fe–C–O, определены численные зависимости коэффициента распределения азота в системах расплав железа – азотсодержащая газовая фаза от температуры, концентрации и активности азота в газовой фазе. Установлены граничные значения параметров, при которых определяющей составляющей потока азота в системе металл – шлак – газ является часть, формируемая градиентом окисленности оксидных, фторидных и оксидно-фторидных шлаков. Научно обоснованы технологии производства электродуговой углеродистой стали без использования вакууматора с содержанием азота не выше 80 ppm, азотсодержащих сталей с регламентированным содержанием азота, коррозионностойких сплавов на никелевой основе с низким содержанием азота и углерода и жаропрочных сплавов на никелевой основе с содержанием азота не выше 65 ppm, что гарантирует высокие эксплуатационные характеристики металлургической продукции.

Основные научные и практические результаты работы заключаются в следующем:

1. Анализ существующих способов управления содержанием азота в расплаве на основе железа или никеля показывает наличие ограничений как при попытках получить металл с низким содержанием азота, так и при осуществлении легирования сталей азотом. Производство электродуговой стали без вакуумирования ограничивает содержание азота в стали не ниже 100 ppm, что является неприемлемым для большого ряда марок сталей. Применение вакуумной обработки обеспечивает различную эффективность удаления азота в жидком

металле, не превышающую 80% и зависящую от исходного содержания азота в расплаве. При исходном содержании азота не выше 40 ppm, эффективность обработки стремится к нулевому значению, что идёт в разрез с современными требованиями к перспективным сталям и сплавам на никелевой основе. Для получения гарантированно низких концентраций углерода (ниже 100 ppm) в сплавах на основе никеля в процессе вакуумной индукционной плавки многократно применяют длительную операцию углеродного кипения. Однако, для производства никелевых сплавов с высоким содержанием хрома реализация такой технологии не обеспечивает гарантированно низкой концентрации углерода в сплаве, что вызывает применение дополнительных видов переплавов – ВДП и/или ЭЛП.

2. В результате проведенного комплекса исследований актуальной научно-практической проблемы, связанной с развитием научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода, заключающегося в установлении зависимостей содержания углерода в расплаве железа от температуры и парциальных давлений углерода и кислорода в газовой фазе, межфазного распределения азота в системах азот – инертный газ – железо и аммиак – инертный газ – железо, а также определяющей роли влияния градиента концентраций окислительного компонента шлака на мощность и направление потока азота в системе газ – шлак – металл, независимо от выбора природы шлаков, и усовершенствовании на их основе систем мониторинга и управления технологическим процессом. Полученные результаты позволили разработать методы управления качеством рафинирования и кристаллизации, и решить важную народно-хозяйственную проблему повышения эффективности производства металла в различных электроплавильных агрегатах.

3. На базе теоретического анализа систем Fe–H₂–H₂O, Fe–CO–CO₂ получены уточненные зависимости коэффициентов Генри и изменения свободной энергии Гиббса для реакций растворения кислорода и углерода в жидком железе. Их использование, совместно с разработанной термодинамической моделью высокотемпературных систем газ – металл, адекватно описывающей двойные и

тройные системы Fe–O, Fe–N, Fe–C–O, Fe–Cr–N, в составе термодинамического блока автоматизированных систем проектирования и управления сталеплавильными процессами в современных металлургических агрегатах, позволило создать и внедрить эффективные производственные системы управления технологическими процессами.

4. На основании теоретического анализа и термодинамического моделирования установлена зависимость коэффициента распределения азота между металлическим расплавом и азотсодержащей газовой фазой, имеющая вид $L_N = 296 \cdot x_{\{N\}} + 2236 \cdot a_{\{N\}} + 1161717/T - 282$, и обоснован практический вывод: с целью повышения эффективности деазотации при обработке стали в камерном вакууматоре необходимо внешнее натекание воздуха заменить натеканием аргона или смесями аргон–кислород.

5. Предложена и реализована система построения сталеплавильных технологий, позволяющая избежать повышения содержания азота в полупродукте при выплавке в ДСП, блокировать рост его во время обработки на УКП и, тем самым, обеспечить содержание азота в готовой углеродистой стали не более 80 ppm за счет поддержания высоких значений градиента окисленности шлака по его толщине и интенсификации перемешивания.

6. На основании развития теоретических представлений о поведении азота в сталеплавильных процессах и учёта особенностей растворимости азота при снижении температуры многокомпонентного металлического расплава и его кристаллизации предложена и реализована на практике технология получения коррозионностойких немагнитных сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11M2АФБ, легированных азотом на уровень, близкий к пределу его растворимости при атмосферном давлении.

7. На базе термодинамического моделирования фазового равновесия высоколегированных сталей и процессов их затвердевания получены эмпирические уравнения для прогноза значений температур ликвидус–солидус сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), 12X18АГ18, 04X20H6Г11M2АФБ и уравнения

растворимости азота в них, что позволило уточнить целевой состав выплавляемых марок стали и исключить возникновение газовой пористости при кристаллизации.

8. Экспериментально установленные параметры завершения окислительного периода рафинирования полупродукта в ДСП, а именно обдув поверхности шлака кислородом с интенсивностью $0,02-0,1 \text{ м}^3/(\text{т}\cdot\text{мин})$ (для обеспечения постоянного окислительного потенциала поверхности раздела шлак – печная атмосфера), подача известняка в печь ($1,4-1,9 \text{ кг}/(\text{т}\cdot\text{мин})$) вместо извести для интенсификации перемешивания шлака выделяющимся при разложении известняка пузырьками CO_2 и перемешивание металла и шлака в печи аргоном через донные дутьевые устройства с максимальным расходом до $0,3 \text{ м}^3/\text{мин}$ на одно продувочное устройство, исключаящим оголение металла, позволили получить среднее содержание азота на выпуске 52 ppm.

9. Показана возможность проведения внепечной обработки стали на УКП, исключаяющей рост концентрации азота в металле за счет обдува поверхности шлака кислородом с общим расходом $0,50-1,25 \text{ м}^3/\text{мин}$ для обеспечения окислительного характера атмосферы на границе шлак – газ, перемешивания металла аргоном с расходом не выше $0,25 \text{ м}^3/\text{мин}$ на пористую пробку для гарантированного предотвращения оголения металла из-под шлака, доводки стали до марочного состава по углероду отдачей порошковой проволокой с углеродистым наполнителем. Это обеспечило сохранение содержания азота в стали 70 на начальном уровне внепечной обработки, либо снижение на 16 ppm от начальной концентрации.

10. Показана возможность дополнительного удаления азота из расплава стали в процессе её выплавки в 120-т дуговой печи за счет интенсификации перемешивания шлака при поддержании градиента окисленности его по толщине. Она реализована увеличением интенсивности вдувания порошка углерода для вспенивания шлака выше $1,0 \text{ кг}/\text{с}$, что обеспечивает линейное снижение содержания азота.

11. Установлена и экспериментально подтверждена зависимость концентрации азота в стали от характера и степени износа футеровки x (количество

плавов) шахтной ДСП: $[\% N] = 0,0039 + 3,4824 \cdot 10^{-6} \cdot x$, коэффициент детерминации 0,4227.

12. Разработана технология электрошлакового переплава азотсодержащей стали 12X18AG18 с гарантированным равномерным содержанием азота по высоте и сечению слитка. Это достигается путём использования флюса с температурой плавления 1100°C, равномерного дозирования азотированного феррохрома в течение стационарного периода переплава с расходом, обеспечивающим превышение целевого содержания азота в металле на 0,02 % масс, и созданием в плавильном пространстве атмосферы азота.

13. Разработана и внедрена технология производства слитков азотсодержащих сталей 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) и 04X20H6Г11М2АФБ в ДСП с обеспечением всех качественных характеристик, предъявляемых нормативными требованиями.

14. Термодинамическим моделированием установлено, что в равновесной газовой фазе над расплавом в ВИП активность углерода для сплавов системы Ni–Mo ниже, чем для сплавов систем Ni–Cr, Ni–Cr–Mo. Это явление использовано при разработке двухступенчатой технологии выплавки в ВИП коррозионностойкого сплава на никелевой основе ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) с гарантированно низким содержанием углерода (до 50 ppm).

15. Для интенсификации деазотирования сталей и сплавов при вакуумном дуговом переплаве, особенно при ВДП расходующих электродов с низкой исходной концентрацией азота, необходимо исключить внешнее натекание воздуха, заменив его натеканием аргона.

16. Разработана технология триплекс-процесса (ВИП-ЭШП-ВДП) жаропрочного никелевого сплава Inconel 718, позволившая получать металл с содержанием азота не выше 65 ppm.

17. Технология выплавки углеродистой стали 70 с содержанием азота не выше 0,008 % масс. внедрена в ЭСПЦ Молдавского металлургического завода, регулирование интенсивности вдувания углеродного порошка внедрена в ЭСПЦ

Донецкого металлургического завода, системы мониторинга, автоматизированного проектирования и управления сталеплавильными процессами внедрены в ЭСПЦ Молдавского металлургического завода, ЭСПЦ Белорусского металлургического завода, суммарный экономический эффект составил 186,246 млн. руб. РФ. Доля соискателя в суммарном экономическом эффекте составляет 30% (55,874 млн. руб. РФ).

18. Выполненные научные и технологические исследования являются основой разработки технологий вакуумной обработки сталей и сплавов на никелевой основе, позволяющих достигать содержание азота в готовой продукции ниже 15 ppm., а также производства сплавов на никелевой основе с содержанием углерода не выше 20 ppm.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhang, L. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness / L. Zhang, B.G. Thomas // *ISIJ International* – 2003, vol. 43, №3. – P.271–291.
2. Lule, R. The Production of Steels Applying 100% DRI for Nitrogen Removal, The Experience of ArcelorMittal Lazaro Cardenas Flat Carbon / R. Lule, F. Lopez, J. Espinoza, R. Torres, R.D. Morales // *AISTech 2009 Proceedings - Volume I.* – 2009. – P.489–498.
3. Щербаков, А.И. Разработка технологии выплавки высокопрочной мартенситностареющей стали ВКС-180-ИД (01Н18К9М5Т), легированной РЗМ / А.И. Щербаков, С.А. Крылов, В.А. Калинин, В.А. Игнатов // *Труды ВИАМ* – 2015, №2 – С.19–25.
4. Donachie, M.J. Superalloys: a technical guide / M.J. Donachie, S.J. Donachie - 2nd ed. – 2002. – 402p.
5. Сидоров, В.В. *Металлургия литейных жаропрочных сплавов: технология и оборудование.* Под общ. ред. Е.Н. Каблова. / В.В. Сидоров, Д.Е. Каблов, В.Е. Ригин – М.: ВИАМ, 2016. – 368с.
6. Харин, П.А. Эксплуатационные и технологические свойства сплава ХН62М-ВИ / П.А. Харин, Н.Г. Зинченко, Т.М. Медведева и др. // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2019, № 3. – С. 48–58.
7. Явойский, В.И. *Теория процессов производства стали* / В.И. Явойский. Издание 2-е, доп. и перераб. – М.: Металлургия, 1967. – 792с.
8. *Металлургия стали* // Е.В. Абросимов, И.И. Аншелес, В.А Кудрин и др., под ред. В.И. Явойского. – М.: Металлургиздат, 1961. – 680с.
9. Явойский, В.И. *Теория продувки сталеплавильной ванны* / В.И. Явойский, Г.А. Дорофеев, И.Л. Повх – М.: Металлургия, 1974. – 496с.
10. Kawakami, K. Fundamental Consideration about the Melting of low nitrogen rimmed Steel at Mizue LD Plant (Behavior of Nitrogen in oxygen converter Steelmaking–II) / K. Kawakami, T. Fujii, M. Kishida // *Tetsu-to-Hagane* – 1963, vol.49, No10. – P.1380–1382.

11. Yamazaki, I. Behavior of Nitrogen in molten Steel during refining process with combined blowing Converter: Development of low nitrogen Steel production process II (Steelmaking, The 113th ISIJ Meeting) / I. Yamazaki, Y. Watanabe, T. Obana et al. // *Tetsu-to-Hagane* – 1987, vol. 73, No 4. – P. S161.
12. Fruehan, R.J. Fundamentals and Practice for Producing low nitrogen Steels // *ISIJ International* - 1996, Vol. 36, Supplement. – P. S58–S61.
13. Misra, S. Hydrogen and Nitrogen Control in Steelmaking at U. S. Steel / S. Misra, Y. Li, I. Sohn // *AISTech 2009 Proceedings - Volume I*. – 2009 – P. 829–840.
14. Морозов, А.Н. Водород и азот в сталях / А.Н. Морозов – М.: Металлургия, 1968. – 284с.
15. Molinero, J. New technologies for low nitrogen EAF steelmaking / J. Molinero, J.J. Laraudogoitia, E. Bilbao // *6th Eur. Elec. Steelmak. Conf.*, Dusseldorf, June 13 – 15, 1999: Proc. – Dusseldorf, 1999. – P. 51–57.
16. Стомахин, А.Я. О взаимодействии металлического расплава с азотом в электрической дуге // *Известия вуз. Черная металлургия*. – 1970, №4. – С. 87–90.
17. Derda, W. Controlling of the Nitrogen content during EAF – Technology and continuous Casting of Steel / W. Derda, J. Siwka, Cz. Nowosielski // *Archives of Metallurgy and Materials* – 2008, vol. 53, iss. 2 – P. 523–529.
18. Emi, T. Steelmaking Technology for the Last 100 Years: Toward Highly Efficient Mass Production Systems for High Quality Steels // *ISIJ International* – 2015, vol. 55, iss. 1 – P. 36–66.
19. Кнюппель, Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть 1. Термодинамические и кинетические закономерности. / Пер с нем. Г.Н. Еланского – М.: Металлургия, 1973. – 312с.
20. Turkdogan, E.T. Physicochemical Aspects of Reactions in Ironmaking and Steelmaking Processes // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* – 1984, vol. 24, iss. 8 – P. 591–611.

21. Григорян, В.А. Теоретические основы электросталеплавильных процессов / В.А. Григорян, Л.Н. Белянчиков, А.Я. Стомахин – М.: Металлургия, 1987. – 270с.
22. Явойский, В.И. Научные основы современных процессов производства стали / В.И. Явойский, А.В. Явойский // М.: Металлургия, 1987. – 184с.
23. Ghosh, A. Secondary Steelmaking: Principles and Applications – CRC Press LLC, 2001 – 344p.
24. Роцин, В.Е. Электрометаллургия и металлургия стали / В.Е. Роцин, А.В. Роцин – Челябинск: Издательский Центр ЮУрГУ, 2013. – 571с.
25. Holappa, L. Chapter 1.7 – Inclusion Engineering / L. Holappa, O. Wijk // Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes, Part A, Editor: S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – P.347–372.
26. Кисслинг, Р. Чистая сталь – дискуссионное понятие / Р. Кисслинг // Чистая сталь. Сборник научных трудов. Перевод с англ. Под ред. Шалимова А.Г. – М.: Металлургия, 1987. – С.9–18.
27. Morita, Z. An Introduction to Iron and Steel Processing / Z. Morita, T. Emi – Tokyo, Japan: The Foundation, 1997. – Режим доступа: <http://www.jfe-21st-cf.or.jp/index2.html>. - Загл. с экрана (по состоянию на 08.06.2021).
28. Xiao, W. The Research of Low-Oxygen Control and Oxygen Behavior during RH Process in Silicon-Deoxidization Bearing Steel / W. Xiao, M. Wang, Y. Bao // Metals – 2019, vol. 9, iss. 8, № 912. – Режим доступа: <https://doi.org/10.3390/met9080812> – Загл. с экрана (по состоянию на 08.06.2021).
29. Rosenberg, S.J. Nickel and Its Alloys – National Bureau of Standards Monograph 106 Issued, May, 1968. – 164p.
30. Superalloys. Edited by Mahmood Aliofkhaezai – AvE4EvA MuViMix Records, 2015. – 341p.
31. Rohde, L.E. Neuere Untersuchungen über das Aluminium-Sauerstoff Gleichgewicht in Eisenschmelzen / L.E. Rohde, M. Wahlster // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1971, Jg.42, h.3. – S.165–174.

32. Михалич, В. Определение термодинамических параметров процесса раскисления методом ЭДС / В. Михалич, В.П. Лузгин, А.Г. Фролов, В.И. Явойский // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1974, №11. – С.33–36.
33. Куликов, И.С. Раскисление металлов / И.С. Куликов – М.: Металлургия, 1975. – 504с.
34. Михайлов, Г.Г. Термодинамические принципы оптимизации процессов раскисления стали и модифицирования неметаллических включений. Т.1: дис. докт. техн. наук: 05.16.02, 02.00.04 / Михайлов Геннадий Геннадиевич; Челябин. политех. ин-т. – Челябинск, 1985. – 482с.
35. Ицкович, Г.М. Раскисление и модифицирование неметаллических включений / Г.М. Ицкович – М.: Металлургия, 1981. – 296с.
36. Куликов, И.С. Термодинамика оксидов: справочник / И.С. Куликов – М.: Металлургия, 1986. – 340с.
37. Куликов, И.С. Термодинамика карбидов и нитридов: справочник / И.С. Куликов. – Челябинск: Металлургия, 1988. – 320с.
38. Zenichi, Sh. Measurement of Equilibrium reaction among Aluminium, Oxygen and Carbon in Liquid Iron / Sh. Zenichi, Y. Tetsuo // Tetsu-to-Hagane – 1953, vol. 39, №4. – P.393–402.
39. Гокен, Н.А. Равновесие между алюминием и кислородом, растворёнными в жидком железе / Н.А. Гокен, Дж. Чипмен // Проблемы современной металлургии – 1953, №5. – С.34–45.
40. Araki, T. Equilibrium Constant of Reaction $Al_2O_3(s)=2Al+3O$ / T. Araki et al. // Tetsu-to-Hagane – 1958, v.44, №3. – P.217–219.
41. Производство стали в основной мартеновской печи / Ком-т физ. химии металлургии стали Отд. черных металлов Америк. о-ва горных инженеров и инженеров-металлургов; Пер. с англ. В.К. Половко и В.В. Ховрина; Под ред. М.Н. Королева. – 2-е изд., пересмотр. и расшир. – М.: Металлургиздат, 1959. – 709с.
Доп. тит. л.: Basic open hearth steelmaking. By the Physical chemistry of steelmaking committee. Iron and steel division AJME. 2-a ed., completely rev. and

- enl. Ed. by W. O. Philbrook and M. B. Bever. – New York, Amer. inst. of mining and metallurgical eng., 1951.
42. Кузнецов, В.М. Раскислительная способность алюминия в жидком железе / В.М. Кузнецов, А.М. Самарин // Физико-химические основы производства стали. – М.: Издательство АН СССР, 1961. – С.11–17.
 43. Чипман, Дж. Физическая химия жидкой стали / Дж. Чипман, Дж. Эллиот // Производство стали в электропечах – М.: Metallurgia, 1965. – С.92–166.
 44. Sawamura, H. On the Equilibrium Values of the Reaction $Al_2O_3(s)=2Al+3O$ Recommended by the Nineteenth Committee (Steelmaking) of the Japan Society for the Promotion of Science / H. Sawamura // Tetsu-to-Hagane – 1964, v.50, №8. – P.1217–1220.
 45. Новохатский, И.А. Фазовые равновесия и распределение элементов в системе Fe-Al-O / И.А. Новохатский, Б.Ф. Белов // Известия АН СССР. Металлы. – 1966, №1. – С.38–48.
 46. Kobayashi, K. Study on the Interaction between Aluminum and Oxygen in Liquid Iron / K. Kobayashi, Y. Omori, K. Sanbonji // Tetsu-to-Hagane – 1967, v.53, №3. – P.323–330.
 47. Эллиот, Д.Ф. Термохимия сталеплавильных процессов / Д.Ф. Эллиот, Д.Ф. Глейзер, М. Рамакришна – М.: Metallurgia, 1969. – 252с.
 48. Fruehan, R.J. Activities in Liquid Fe-Al-O and Fe-Ti-O Alloys / R.J. Fruehan // Metallurgical and Materials Transactions B – 1970, v.1, №12 – P.3403–3410.
 49. Явойский, В.И. Окисленность стали и методы ее контроля / В.И. Явойский, В.П. Лузгин, А.Ф. Вишкарев – М.: Metallurgia, 1970. – 286с.
 50. Владимиров, Л.П. Теоретическое и экспериментальное определения раскислительной способности алюминия новейшими методами исследования / Л.П. Владимиров, Н.М. Копица // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971, №11. – С.18–22.
 51. Шевцов, В.Е. Термодинамика растворов кислорода в системе Fe-Al / В.Е. Шевцов // Известия АН СССР. Металлы – 1981, №1. – С.60–63.

52. Suzuki, M. Equilibrium in Fe–Si–Al–O system / M. Suzuki // *Tetsu-to-Hagane* – 1982, v.68, №11. – P.933.
53. Ghosh, A. An Assessment of Thermodynamic Parameters for Deoxidation of Molten Iron by Cr, V, Al, Zr and Ti / A. Ghosh, G.V.R. Murthy // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* – 1986, v.26, №7 – P.629–637.
54. Олетт, М. Влияние добавок кальция, магния или РЗМ на чистоту стали / М. Олетт, С. Гателье / *Чистая сталь* – М.: Металлургия, 1987. – С.128–143.
55. Янке, Д. Электрохимические методы определения растворенного кислорода в жидкой стали / Д. Янке // *Чистая сталь* – М.: Металлургия, 1987. – С.157–176.
56. Sakaо, H. Equilibrium Constants for the Deoxidation of Liquid Iron with Silicon and Aluminum / H. Sakaо // *Tetsu-to-Hagane* – 1990, v.76, №1 – P.17–24.
57. Михайлов, Г.Г. Термодинамика раскисления стали / Г.Г. Михайлов, Д.Я. Поволоцкий – М.: Металлургия, 1993. – 144с.
58. Kang, Y. Aluminum Deoxidation Equilibrium of Molten Iron–Aluminum Alloy with Wide Aluminum Composition Range at 1873K / Y. Kang, M. Thunman, D. Sichen et al. // *ISIJ International*. – 2009, vol. 49, №10 – P.1483–1489.
59. Крамаров, А.Д. Исследование реакций железа и марганца с кремнием в кислом тигле / А.Д. Крамаров, С.Я. Резникова // *Сталь* – 1949, №9 – С.775–782.
60. Явойский, В.И. Режим марганца при основной мартеновской плавке / В.И. Явойский // *Сталь* – 1951, №1. – С.34–41.
61. Гоксен, Н.А. Равновесие между кремнием и кислородом в жидком железе / Н.А. Гоксен, Д. Чипмен // *Проблемы современной металлургии* – 1953, №4 – С.3–28.
62. Schenck, H. Gleichgewichte von Kohlenstoff und Sauerstoff in flüssigem Eisen und ihre Beeinflussung durch geringe Siliziumgehalte / H. Schenck // *Archiv für das Eisenhüttenwesen* – 1959, Jg.30, h.8 – S.451–460.
63. Matoba, S. Silicon-Oxygen Equilibrium in Liquid Iron / S. Matoba, K. Gunji, T. Kuwana // *Tetsu-to-Hagane* – 1959, v.45, №12 – P.1328–1334.
64. Сюй Цзэн-Цзи Растворимость кислорода в жидких железокремниевых сплавах при атмосферном давлении и в условиях вакуума / Сюй Цзэн-Цзи,

- А.Ю. Поляков, А.М. Самарин // Известия АН СССР. ОТН. Metallургия и топливо – 1961, №2 – С.115–118.
65. Новохатский, И.А. Термодинамика распределения элементов при раскислении железа кремнием / И.А. Новохатский, Б.В. Белов // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1967, №6 – С.9–15.
66. Fröberg, M.G. Das Gleichgewicht von Silizium und Sauerstoff im flüssigen Eisen / M.G. Fröberg // Stahl und Eisen – 1969, Jg.80, h.5 – S.290–301.
67. Явойский, В.И. Активность кислорода в сплавах железа в ваннах сталеплавильных агрегатов в процессе плавки / В.И. Явойский, А.Ф. Вишкарев, В.П. Лузгин // Физико-химические основы производства стали – М.: Наука, 1971 – С.306–314.
68. Владимиров, Л.П. Об активности кислорода и кремния в расплавах Fe-O-Si / Л.П. Владимиров, Н.М. Копица, В.В. Суменкова // Известия АН СССР. Металлы – 1973, №5 – С.89–95.
69. Явойский, В.И. Исследование термодинамики процесса раскисления железа методом ЭДС / В.И. Явойский, Л.П. Владимиров, В.П. Лузгин и др. // Известия АН СССР. Металлы – 1974, №2. – С.14–21.
70. Watanabe, T. Study of the Deoxidation Ability of Silicon in the Molten Stainless Steel / T. Watanabe, T. Tohoge // Tetsu-to-Hagane – 1974, v.60, №14 – P.2126–2134.
71. Шевцов, В.Е. Термодинамика растворов кислорода в Fe-Si расплавах / В.Е. Шевцов, В.А. Бровков, В.Л. Лехтмец // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1977, №11. – С.42–45.
72. Авербух, С.М. Равновесие кремния и марганца с кислородом в расплавленном железе / С.М. Авербух, Л.А. Смирнов // Научные сообщения IV Всесоюзной конференции по строению и свойствам металлических и шлаковых расплавов – Свердловск, 1980. – С.471–474.
73. Линчевский, Б.В. Термодинамика и кинетика взаимодействия газов с жидкими металлами / Б.В. Линчевский – М.: Metallургия, 1986. – 222с.

74. Steelmaking data sourcebook: Revised Edition by the Japan Society for the Promotion of Science, the 19th Committee on Steelmaking – N.Y., Gordon and Breach Science Publishers, 1988. – 325p.
75. Ishii, F. Deoxidation Equilibrium of Silicon in Liquid Nickel and Nickel-Iron Alloys / F. Ishii, S. Ban-ya // ISIJ International - 1992, v. 32, №10 – P.1091–1096.
76. Ölsen, W. Die Reaktion zwischen Eisen-Mangan-Schmelzen und den Schmelzen ihrer Aluminate / W. Ölsen, G. Heynert // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1950, Jg.21, h.10. – S.567–575.
77. Fischer, W.A. Die Manganverteilung zwischen Eisenschmelzen und Eisen (II) – Oxydschlacken in MgO-Tiegel bei 1520-1770°C / W.A. Fischer, H.T. Fleischer // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1961, Jg.32, h.1. – S.1–10.
78. Владимиров, Л.П. Исследование физико-химических свойств расплавов Fe-O-Mn / Л.П. Владимиров, Ю.В. Анищенко, Н.М. Копица // Журнал физической химии – 1973, т.47, №3 – С.548–551.
79. Авербух, С.М. Равновесие марганца с кислородом в расплавленном железе / С.М. Авербух, Л.А. Смирнов // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1981, №3 – С.18–23.
80. Turkdogan, E.T. Lable deoxydation desulphurisation and inclusions in Steel / E.T. Turkdogan // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1983, №1 – S.1–10.
81. Marshall, Sh. The Carbon-oxygen Equilibrium in Liquid Iron / Sh. Marshall, J. Chipman // Transactions of the American Society for Metals – 1942, v.30, №9 – P.695–746.
82. Глушкин, Л.Я. Влияние температуры на равновесие системы Fe-C-O / Л.Я. Глушкин // Сталь – 1950, №10 – С.871–876.
83. Turkdogan, E.T. The reaction of carbon and oxygen in molten iron / E.T. Turkdogan, L.S. Davis, L.E. Leake, C.G. Stevens // Journal of the Iron and Steel Institute, London - 1955, v.181, №2 – P.123–128.
84. Ростовцев, С.Т. Теория металлургических процессов / С.Т. Ростовцев – М.: Металлургиздат, 1956. – 466с.

85. Turkdogan, E.T. Thermodynamics of Iron-Carbon Melts / E.T. Turkdogan, L.E. Leake, C.R. Masson // *Acta Metallurgica* – 1956, v.4, №1 – P.396–406.
86. Филиппов, С.И. Экспериментальное изучение реакции углерода и кислорода в жидком железе / С.И. Филиппов // *Физико-химические основы производства стали* – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – С.220–225.
87. Matoba, S. Equilibrium of Carbon and Oxygen in Molten Iron saturated with Carbon / S. Matoba, S. Ban-ya // *Tetsu-to-Hagane* – 1957, v.43, №8 – P.790–796.
88. Меджибожский, М.Я. Интенсификация мартеновской плавки вдуванием воздуха в ванну / М.Я. Меджибожский – М.: Metallurgizdat, 1959. – 174с.
89. Фува, Т. Равновесие углерод – кислород в жидком железе / Т. Фува, Дж. Чипман // *Проблемы современной металлургии* – 1961, №3 – С.3–11.
90. Ban-ya, S. Activity of Carbon and Oxygen in Liquid Iron / S. Ban-ya, S. Matoba // *Tetsu-to-Hagane* – 1962, v.48, №8 – P.925–932.
91. Сюй Цзен-Цзи Термодинамические характеристики реакции взаимодействия углерода и кислорода в жидком железе / Сюй Цзен-Цзи, А.Ю. Поляков, А.М. Самарин // *Известия АН СССР. ОТН. Металлургия и топливо* – 1961, №1 – С.5–9.
92. Есин, О.А. Физическая химия пирометаллургических процессов. Изд. 2-е / О.А. Есин, П.В. Гельд – М.: Металлургия, 1966. – 704с.
93. Бурцев, В.Т. Раскислительная способность углерода в расплавах железа, кобальта и никеля / В.Т. Бурцев, В.Г. Глебовский, В.И. Кашин и др. // *Известия АН СССР. Металлы* – 1974, №1 – С.3–8.
94. Matoba, S. Thermodynamics of liquid Fe-C-O System / S. Matoba, S. Ban-ya // *Tetsu-to-Hagane* – 1980, v.66, №9 – P.1406–1422.
95. Schürmann, E. Einfluss des Bodenspülens und des Nachspülens auf die Gleichgewichtseinstellung im System Eisen-Kohlenstoff-Sauerstoff / E. Schürmann, K-H Obst, L. Fiege, H-P Kaiser, H. Schäfer // *Stahl und Eisen* – 1985, v.105, №8 – S.459–462

96. Шенк, Г. Физико – химия металлургических процессов. Часть 1: Химико-металлургические реакции и их законы / Пер. с нем. под ред. Б.Л. Фрадкина – Харьков, ДНТВУ, 1935 – 384с.
97. Карнаухов, М.М. Металлургия стали. Часть третья. Основной мартеновский процесс / М.М. Карнаухов, Издание второе исправленное и дополненное – М., Л.: Metallurgizdat, 1934, – 256с.
98. Орлов, В.И. Содержание газов в ванне мартеновской печи / В.И. Орлов, Р.М. Иванов, Х.Д. Еринин // Применение кислорода в сталеплавильном производстве. Сборник МИСиС XXXVII – М.: Metallurgizdat, 1957 – С.98–123.
99. Шабанов, Д.А. Поведение азота при плавке сплавов железа в дуговой вакуумной печи // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1958, №11 – С.37–40.
100. Даркен, Л.С. Физическая химия металлов / Л.С. Даркен, Р.В. Гурри / Перевод с англ. В.А. Мчедлишвили, А.А. Вертмана, И.С. Куликова, под ред. Н.Н. Сироты – М: Metallurgizdat, 1960 – 584с.
101. Филиппов, С.И. Закономерности поглощения азота металлом при окислительной плавке // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1960, №1 – С.28–32.
102. Otaki, H. Behavior of Nitrogen in the Oxygen Converter Steelmaking (Preprints for the 64th Grand Lecture Meeting of The Iron and Steel Institute of Japan) / H. Otaki, K. Kawakami, A. Noda, T. Itaoka // Tetsu-to-Hagane – 1962, v.48, №11 – P.1371–1372.
103. Чуйко, Н.М. Дегазация жидкой стали при вакуумировании в ковше при переливе и при продувке металла инертными газами под вакуумом / Н.М. Чуйко, А.Т. Перевязко, В.Б. Рутковский и др. // Газы в литом металле – М.: Наука, 1964. – С.28–35.
104. Клячко, Ю.А. Влияние вакуумирования и электрошлакового переплава на содержание газов и неметаллических включений в стали / Ю.А. Клячко, И.В. Тулепова // Газы в литом металле – М.: Наука, 1964. – С.36–38.

105. Yagi, N. On Some Problems of Nitrogen in Oxygen Converter Steelmaking (Technical Papers (Part I) for the 67th Grand Lecture Meeting of The Iron and Steel Institute of Japan) / N. Yagi, K. Komoda, T. Saito et al. // Tetsu-to-Hagane – 1964, v.50, №3 – P.414–417.
106. Ikeda, T. On the Behavior of Nitrogen during the Production of Low Carbon Rimmed Steel (Technical Papers (Part I) for The 73rd I.S.I.J. Meeting) / T. Ikeda, K. Marukawa // Tetsu-to-Hagane – 1967, v.53, №3 – P.294–296.
107. Хитрик, С.И. Выплавка особонизкоуглеродистых нержавеющей сталей с низким содержанием азота / С.И. Хитрик, М.И. Гасик, Н.А. Карпов и др. // Физико-химические основы производства стали – М.: Наука, 1968 – С.184–186.
108. Шалимов, Ал. Г. Дегазация стали при продувке аргоном в вакууме / Ал.Г. Шалимов, Г.Н. Огороков, В.А. Бояршинов // Физико-химические основы производства стали – М.: Наука, 1968 – С.220–223.
109. Алявдин, В.А. Поведение азота при выплавке и разливке трансформаторной стали / В.А. Алявдин // Физико-химические основы производства стали – М.: Наука, 1968 – С.367–369.
110. Добрица, Ю.Т. Поведение азота по ходу кислородно-конвертерной плавки / Ю.Т. Добрица, В.П. Лузгин, В.И. Явойский и др. // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1971, №1 – С.35–38.
111. Рабинович, А.В. Баланс азота при электроплавке стали Х18Н10Т / А.В. Рабинович, Е.И. Кадинов // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1971, №7 – С.60–63.
112. Терещенко, В.Т. Метод дегазации конвертерной стали / В.Т. Терещенко, В.С. Сапиро, М.Н. Стрелец и др. // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1973, №9 – С.35–38.
113. Еланский, Г.Н. Поведение азота при выплавке сварочной стали в 5-т дуговых печах / Г.Н. Еланский, Р.П. Коротева, В.А. Кудрин и др. // Металлург – 1979, №7 – С.33–35.

114. Зинченко, С.Д. Поведение азота при выплавке и разливке низкоуглеродистой конвертерной стали / С.Д. Зинченко, Р.М. Иванов, М.А. Богаткин и др. // *Металлург* – 1980, №1 – С.23–24.
115. Безобразов, С.В. Продувка высокохромистых расплавов системы железо-хром-углерод азотсодержащими газами / С.В. Безобразов, В.И. Хяккинен, А.Г. Пономаренко // *Совершенствование технологии ферросплавов. Тематический отраслевой сборник* – М.: *Металлургия*, 1981 – С.11–15.
116. Нейгебауэр, Г.О. Деазотация железа шлаком при глубоком раскислении алюминием / Г.О. Нейгебауэр, Б.Н. Моргалев, В.И. Дмитриенко, А.Ф. Филатов // *Известия АН СССР. Металлы* – 1982, №4 – С.20–26.
117. Choh, T. Estimation of Oxygen and Nitrogen Absorption of Liquid Steel during Tapping from Converter / T. Choh, K. Iwata, M. Inouye // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* – 1983, v.23, №8 – P.680–689.
118. Меджибожский, М.Я. Математическое моделирование и экспериментальное исследование поступления азота в металл во время выпуска плавки в ковш / М.Я. Меджибожский, Б.И. Разинкин, Л.В. Ребров // *Известия вузов. Чёрная металлургия* – 1985, №4 – С.38–43.
119. Свяжин, А.Г. Физико-химические основы производства стали с заданным, в том числе особо низким, содержанием азота / А.Г. Свяжин // *Теория и практика повышения качества стали. Тематический сборник научных трудов* – М.: *Металлургия*, 1985 – С.26–40.
120. Taga, M. Behaviour of Nitrogen in molten Steel between a Ladle and a Tundish: Development of low Nitrogen Steel Production Process I (Steelmaking, The 110th ISIJ Meeting) / M. Taga, Y. Shirota, Y. Yamanaka et al. // *Tetsu-to-Hagane* – 1985, v.71, №12 – P.S1083.
121. Дмитриенко, В.И. Деазотация обезуглероженного железа при струйном вакуумировании / В.И. Дмитриенко, Г.О. Нейгебауэр // *Известия вузов. Чёрная металлургия* – 1985, №12 – С.39–44.

122. Соболев, В.В. Кинетика удаления водорода и азота при вакуумных переплавах стали / В.В. Соболев, Н.А. Нестеров // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1986, №1 – С.39–42.
123. Лопухов, Г.А. Дегазация металлургических расплавов / Г.А. Лопухов, Е.З. Кацов // Теория металлургических процессов. Том 6. Итоги науки и техники. – М.: ВИНТИ АН СССР, 1987 – С.3–67.
124. Сойфер, В.М. Выплавка стали в кислых электропечах. – М.: Металлургия, 1987. – 120с.
125. Морозов, А.Н. Современное производство стали в дуговых печах. – Челябинск: Металлургия, 1987. – 176с.
126. Shinme, K. Acceleration of Nitrogen Removal in Stainless Steel under Reduced Pressure / K. Shinme, T. Matsuo, M. Morishige // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan – 1988, v. 28, №.4 – P.297–304.
127. Бигеев, А.М. Металлургия стали. Учебник для вузов. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1988. – 480с.
128. Шюрман, Э. Изменение содержания азота от передельного чугуна в доменной печи до стали в конвертере / Э. Шюрман, Ф. Мюншер, Р. Хаммер и др. // Чёрные металлы – 1989, №7 – С.18–24.
129. Рябов, В.В. Выплавка стали с низким содержанием азота в конвертерах верхнего дутья / В.В. Рябов, А.Г. Свяжин, В.Э. Киндоп, В.А. Федосеенко // Технология производства стали в конвертерных и мартеновских цехах. Сборник трудов ИЧМ – М.: Металлургия, 1989. – С.74–78.
130. Григоренко, Г.М. Водород и азот в металлах при плазменной плавке // Г.М. Григоренко, Ю.М. Помарин – Киев, Наукова думка, 1989. – 200с.
131. Пичугин, В.В. Поглощение азота при выпуске низкоуглеродистого металла / В.В. Пичугин, Е.Х. Шахпазов, А.Г. Свяжин / Известия вузов. Чёрная металлургия – 1990, №2 – С.19–21.
132. Плущкель, В. Металлургические реакции, обеспечивающие установление минимальных содержаний углерода, фосфора, серы и азота в стали // Чёрные металлы – 1990, №6 – С.20–30.

133. Хес, Э. Агрегаты и технологии, применяемые в кислородно-конвертерных цехах для достижения низких содержаний углерода, фосфора, серы и азота в стали / Э. Хес // Чёрные металлы – 1990, №6 – С.35–41.
134. Лубяной, Д.А. Поведение азота при плавке чугуна в индукционных печах с кислой футеровкой / Д.А. Лубяной, Г.О. Нейгебауэр, В.П. Цымбал, А.Н. Дробышев // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1991, №2 – С.76–80.
135. Yamanaka, R. Denitrogenization Mechanism from Molten Steel by Flux Treatment / R. Yamanaka, K. Ogawa, H. Iritani, S. Koyama // ISIJ International - 1992, v.32, №1 – P.136–141.
136. Янке, Д. Изменение содержания азота при производстве чёрных металлов / Д. Янке // Чёрные металлы – 1992, №2 – С.3–11.
137. Банненберг, Н. Изменение содержания азота в металле в процессе обработки в ковше / Н. Банненберг, Б. Бергман // Чёрные металлы – 1992, №2 – С.11–19.
138. Скуин, К. Содержание азота, обусловленное технологией плавки и легированием в коррозионно- и кислотостойких хромоникельмолибденовых сталях, стабилизированных титаном / К. Скуин // Чёрные металлы – 1992, №2 – С.19–21.
139. Шелгаев, Ю.Н. Выплавка коррозионноустойчивой азотсодержащей стали в дуговых печах постоянного тока / Ю.Н. Шелгаев, Н.И. Воробьёв, В.Г. Евченко, Л.Г. Гуревич // Сталь – 1992, №3 – С.24–26.
140. Pilliod, C.F. Variables Affecting the Nitrogen Content of Carbon and Low-Alloy Acid Electric Arc Furnace Steels / C.F. Pilliod // Transactions of the American Foundrymen's Society – 1992, v.100, №8 – P.23–25.
141. Регулирование содержания азота в стали, разливаемой на слябовой УНРС / Пер. с фр. и реф. А.Ф. Вишкарев // Новости чёрной металлургии за рубежом – 1996, №2 – С.50–51 по статье Van der Knoop W. Nitrogen control in liquid Steel for Slab Casting / W. van der Knoop, W. Moonen, J. Past // La Revue de Metallurgie – 1995, v.92, №4 – P.503–510.

142. Вихлевщук, В.А. Исследование закономерностей внеагрегатной деазотации стали / В.А. Вихлевщук, В.А. Мелеков, Н.И. Лысенко, И.П. Хритин // *Металл и литьё Украины* – 1996, №7-8 – С.21–23.
143. Чурсин, В.П. Легирование стали азотом введением карбамида / Г.М. Чурсин, В.П. Григорьев, Ю.В. Кряковский // *Известия вузов. Чёрная металлургия* – 1997, №5 – С.22–24.
144. Эндерс, В.В. Влияние состава металлошихты на содержание азота в кордовой стали / В.В. Эндерс, Д.С. Якшук, Е.И. Лейнвебер, Ю.В. Дьяченко // *Сталь* – 1998, №11 – С.29–31.
145. Якшук, Д.С. Исследование поведения азота при выплавке стали в дуговой сталеплавильной печи / Д.С. Якшук, Е.И. Лейнвебер // *Материалы международной научно-технической конференции «Производство стали в XXI веке. Прогноз, процессы, технологии, экология» Киев: 15-16 мая 2000г., Днепропетровск 17-19 мая 2000г. – Киев, Днепродзержинск, 2000. – С.191–194.*
146. Фоменко, А.П. Исследование технологических процессов выплавки кордовой стали в сверхмощной дуговой печи / А.П. Фоменко, В.В. Эндерс, Д.С. Якшук и др. // *Сталь* – 2000, №5 – С.35–37.
147. Ono-Nakazato, H. Measurement and Calculation of Nitrogen Removal Rate from Molten Iron to Gas Phase through CaO-Al₂O₃ Melts / H. Ono-Nakazato, D. Miyata, K. Tamura, T. Usui // *ISIJ International* – 2000, v.40, Supplement – P.S106–S109.
148. Lee, M. The production of low Phosphorus and Nitrogen Steels in an EAF using HBI / M. Lee, D. Trotter, O. Mazzei // *Scandinavian Journal of Metallurgy* – 2001, v.30, №5 – P.286–291.
149. Вергун, А.С. Поведение азота в передельном чугуна в процессе выплавки и выпуска его в ковш / А.С. Вергун, А.Ф. Шевченко, А.Л. Руденко, Л.Н. Руденко // *Металлургическая и горнорудная промышленность* – 2002, №2 – С.6–8.
150. Ono-Nakazato, H. Rate of Nitrogen Desorption from CaO-Al₂O₃ Melts to Gas Phase / H. Ono-Nakazato, S. Morisawa, T. Usui // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 2002, v.33B, №6 – P.393–401.

151. Григоренко, Г.М. О поведении азота в системе газ-шлак-металл / Г.М. Григоренко, Ю.М. Помарин, В.В. Лакомский, В.Ю. Орловский // Проблемы специальной электрометаллургии – 2002, №3 – С.36–38.
152. Трегубенко, Г.Н. Ассимиляция азота сталью при легировании нетрадиционными азотсодержащими лигатурами / Г.Н. Трегубенко // Metallургическая и горнорудная промышленность – 2002, №3 – С.26–29.
153. Neuschütz, D. Nitrogen Removal and Arc Voltage Increase in EAF Steelmaking by Methane Injection into the Arc / D. Neuschütz, D. Spirin // Steel Research International -2003, v.74, №1 – P.19–25.
154. Кузьменко, А.Г. О рациональной технологии азотирования металла при производстве трансформаторной стали / А.Г. Кузьменко, Е.Ф. Мазуров, В.Т. Черненко и др. // Электрометаллургия – 2003, №3 – С.16–20.
155. Старов, Р.В. Снижение содержания азота при производстве электропечной стали / Р.В. Старов, И.В. Деревянченко, А.Б. Сычков и др. // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Чёрная металлургия» - 2003, №9 – С.26–28.
156. Стомахин, А.Я. Выплавка и непрерывная разливка стали с содержанием азота до 0,002% / А.Я. Стомахин // Известия вузов. Чёрная металлургия – 2004, №3 – С.27–30.
157. Kawakami, M. Possibility of Several Steelmaking Reactions by the Injection of H₂ into Molten Steel / M. Kawakami, T. Maeda, T. Takenaka, S. Yokoyama // Tetsu-to-Hagane – 2004, v.90, №6 – P.422–428.
158. Würzinger, P. Production of maraging Steel grades and the Influence of specified and nonspecified Elements for special Applications / P. Würzinger, R. Rabitsch, W. Meyer // Journal of Materials Science – 2004, v.39, №24 – P.7295–7302.
159. Dorel, A. Nitrogen Control in EAF Steelmaking by DRI Fines Injection / A. Dorel, G.A. Brooks, G.A. Irons // A Final Report Prepared for American Iron & Steel Institute and Department of Energy Technology Roadmap Program. Project №0009. Cooperative Agreement DE-FC36-97ID13554 - 31.03.2004. – 54p. – Режим

доступа: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/840951-gXP6N9/native/840951.pdf> - Загл. с экрана (по состоянию на 08.06.2021).

160. Морозов, Г.И. Азотирование низкоуглеродистой коррозионностойкой стали на установке ВКО / Г.И. Морозов, В.В. Роженцев, Д.Е. Кушнерев, А.С. Швалев // Сталь – 2005, №5 – С.15–16.
161. Misra, S. Hydrogen and Nitrogen Pickup Ladle Additions / S. Misra, R.P. Stone, M. Kan, R.J. Fruehan // Iron and Steel Technology – 2006, v.3, №3 – P.236–245.
162. Лакомский, В.В. О транспорте азота через жидкий шлак / В.В. Лакомский, Ю.М. Помарин, Г.М. Григоренко, В.Ю. Орловский // Современная электрометаллургия – 2006, №3 – С.8–10.
163. Mattar, T. Effect of Nitrogen Alloying and the Electroslag Refining Process on the Properties of AISI M41 Steel / T. Mattar, K.E. Fawakhry, H. Halfa, M.E. Demerdash // Metallurgical and Materials Transactions B – 2006, v.37B, №12. – P.987–995.
164. Лакомский, В.В. Азотирование металла при ЭШП из газовой фазы / В.В. Лакомский, Ю.М. Помарин, А.Д. Рябцев, Г.М. Григоренко // Современная электрометаллургия – 2006, №4 – С.3–5.
165. Поживанов, М.А. Выплавка стали для автолиста / М.А. Поживанов, Е.Х. Шахпазов, А.Г. Свяжин – М.: Интерконтакт Наука, 2006. – 166с.
166. Fan, P. Distribution of Nitrogen between Molten Steel and Slags Containing Titanium Monoxide / P. Fan, W.D. Cho // Metallurgical and Materials Transactions B – 2007, v.38B, №8 – P.713–717.
167. Шалимов, А.Г. Производство электростали с пониженным содержанием азота / А.Г. Шалимов, А.М. Неменов // Metallurg – 2010, №4. – С.45–54.
168. Кузнецов, М.С. Исследование процессов рафинирования металлического расплава от азота и водорода с целью совершенствования технологии производства низколегированной стали / Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. - М.: НИТУ "МИСиС", 2011. – 26с.

169. Xiong, Sh. Change and control of nitrogen in molten steel production process / Sh. Xiong, H. Zeng, Y. Cao, QX. Wang // Journal of Chongqing University (English Edition) – 2014, Vol.13, №1. – P.11–16.
170. Zhu, HC. Effects of Nitrogen Segregation and Solubility on the Formation of Nitrogen Gas Pores in 21.5Cr-1.5Ni Duplex Stainless Steel. / HC. Zhu, ZH. Jiang, HB Li et al. // Metallurgical and Materials Transactions B – 2017, vol.48, iss.10. – P.2493–2503.
171. Семькин, С.И. Поведение кислорода и азота в расплаве в процессе кислородно-конвертерной плавки / С.И. Семькин, Л.Г. Тубольцев, В.П. Корченко // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2017, Вып. 31. – С.174–196.
172. Zhao, Y. Strategies for nitrogen control during the production of interstitial-free steel / Y. Zhao, Y. Yang, M. Barati, A. McLean // Ironmaking & Steelmaking – 2017, №7 – P. 485–491.
173. Щукина, Л.Е. Исследование и разработка процесса легирования металла азотом в агрегатах специальной электрометаллургии с целью повышения качества стали / Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М.: НИТУ "МИСиС", 2018. – 116с.
174. Ahlin Bjorn, T.I. Nitrogen Removal in a Vacuum Tank Degasser: An Investigation on the Nitrogen Removal Performance 2019 Independent thesis Advanced level (degree of Master (Two Years)), Student thesis – Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, 2019. – 36p.
175. Yoshida, Y. Establishment of Special Steel Production System at Kakogawa Works -Construction of No.3 Secondary Refining Equipment and No.6 Continuous Caster / Y. Yoshida, H. Okada, H. Sakai et al. // Kobelco Technology Review – 2020, №38. – P.53–59.
176. Goldstein, D.A. Mathematical Model for Nitrogen Control in Oxygen Steelmaking / D.A. Goldstein, R.J. Fruehan // Metallurgical and Materials Transactions B – 1999, v.30B, №10 – P.945–956.

177. Pitkälä, J. CFD Modeling of Nitrogen Dissolution into a Steel Bath during Gas Purging / J. Pitkälä, J. Xia, A. Jokilaakso // Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8 December 1999 – P.35–39. – Режим доступа: www.cfd.com.au/cfd_conf99/papers/024PITK.PDF - Загл. с экрана (по состоянию на 08.06.2021).
178. Эндерс, В.В. Азот в сталеплавильных процессах / В.В. Эндерс // Литьё и металлургия – 2002, №1. – С.95–100.
179. Wei, J.-H. Mathematical Modeling of the Vacuum Circulation Refining Process of Molten Steel / J.-H. Wei // Journal of Shanghai University (English edition) – 2003, v.7, №2 – P.97–117.
180. Yu, S. Mathematical Modeling of Nitrogen Removal from the Vacuum Tank Degasser / S. Yu, J. Miettinen, L. Shao, S. Louhenkilpi // Steel Research International – 2015, Volume 86, Issue 5 – P.466–477.
181. Лопухов, Г.А. Контроль вспенивания шлака в дуговой сталеплавильной печи // Электromеталлургия – 1999, №12. – С.44–45.
182. Лопухов, Г.А. Науглероживатели для выплавки высокоуглеродистой стали в дуговой печи // Электromеталлургия – 1999, №12. – С. 43–44.
183. Fruehan, R.J. Future Steelmaking Technologies and the Role of basic Research / R.J. Fruehan // Metallurgical and Materials Transactions B – 1997, v.28B, №10 – P.734–753.
184. Морозов, А.Н. Внепечное вакуумирование стали / А.Н. Морозов, М.М. Стрекаловский, Г.И. Чернов, Я.Е. Кацнельсон – М.: Металлургия, 1975. – 288с.
185. Сапиро, В.С. Способ удаления азота при интенсивной продувке раскисленной стали оксидом углерода / В.С. Сапиро В.С., В.В. Приходько, С.Н. Тимошенко // Чёрная металлургия – 1991, №4. – С.60–61.
186. Кудрин, В.А. Внепечная обработка чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1992. – 336с.

187. Кнюппель, Г. Раскисление и вакуумная обработка стали. Часть II. Основы и технология ковшовой металлургии / Г. Кнюппель; пер. с нем. Г.Н. Еланского. – М.: Металлургия, 1984. – 414с.
188. Новик, Л.М. Внепечная вакуумная металлургия стали – М.:Наука,1986. – 190с.
189. Янке, Д. Металлургические основы вакуумной обработки жидкого металла / Д. Янке // Чёрные металлы – 1987, №19 – С.3–11.
190. Шраде, К. Новый подход к увеличению производительности установок циркуляционного вакуумирования / К. Шраде, М. Хюлен, З. Зульфиди // Чёрные металлы – 2007, №5 – С.24–29.
191. Фомин, В.И. Результаты дегазации металла в циркуляционном вакууматоре / В.И. Фомин, А.В. Бойко, А.А. Бондарчук и др. // Сталь – 2009, №12 – С.29–30.
192. Xu, Y. Kinetic Model of Decarburization and Denitrogenation in Vacuum Oxygen Decarburization Process for Ferritic Stainless Steel / Y. Xu, Z. Chen, G. Zhang // Metallurgical and Materials Transactions B – 2009, v.40B, №6 – P.345–352.
193. Ма, F. Опыт обеспечения состава автолистовых IF-сталей / F. Ma, M. Song, H. Wan // Металлург – 2009, №3 – С.40–42.
194. Аверин, В.В. Азот в металлах. / В.В. Аверин, А.В. Ревякин, В.И. Федорченко, Л.Н. Козина. – М.: Металлургия,1976. – 224с.
195. Хяккинен, В.И. Взаимодействие металлических расплавов на основе хрома с газообразным азотом и совершенствование технологии азотирования феррохрома / В.И. Хяккинен: автореф. дисс.... канд. техн. наук: специальность 06.16.02 "Металлургия черных металлов". – Челябинск, Челябинский политехнический институт имени Ленинского комсомола, 1986. – 22с.
196. Аргон в металлургии (по материалам фирмы «Badische Anilin- und Soda-Fabrik», ФРГ) / Под ред. П. П. Арсентьева. – М.: Металлургия, 1971. – 120с.
197. Шраде, К. Новый подход к увеличению производительности установок циркуляционного вакуумирования / К. Шраде, М. Хюлен, З. Зульфиади // Чёрные металлы – 2007, №5. – С.24–29.

198. Гель, И. Установка циркуляционного вакуумирования по способу КТВ на заводе фирмы Erdemir TAS, Турция / И. Гель, С. Чапар, Т. Айхерт, А. Куббе // Чёрные металлы – 1999, №5. – С.29–35.
199. Самарин, А.М. К вопросу об активностях углерода и кислорода в расплавах железо-углерод-кислород / А.М. Самарин, Р.А. Карасев // Известия АН СССР. Отделение технических наук – 1953, №8 – С.1130–1135.
200. Старк, Б.В. Критика работы Маршалла и Чипмана по вопросу активности углерода и кислорода в жидкой стали / Б.В. Старк // Известия АН СССР. Отделение технических наук – 1948, №5 – С.655–671.
201. Самарин, А.М. Активности углерода и кислорода, растворенных в жидком железе / А.М. Самарин, Л.А. Шварцман // Известия АН СССР. Отделение технических наук – 1949, №8 – С.1231–1234.
202. Yagihashi, T. On the Treatment of the Reaction between Gas-Mixture H_2O-H_2 and Molten Iron in Steel-Making / T. Yagihashi // Science reports of the Research Institutes, Tohoku University. Ser. A, Physics, chemistry and metallurgy – 1952, v.4 – P.139–149.
203. Аверин, В.В. Активность кислорода в жидком железе / В.В. Аверин, А.Ю. Поляков, А.М. Самарин // Известия АН СССР. Отделение технических наук – 1955, №3 – С.90–107.
204. Gokcen, N.A. Equilibria in Reactions of Hydrogen, and Carbon Monoxide with Dissolved Oxygen in Liquid Iron; Equilibrium in Reduction of Ferro Oxide with Hydrogen, and Solubility of Oxygen in Liquid Iron / N.A. Gokcen // Transactions AIME. Journal of Metals – 1956, v.206, November – P.1558–1567.
205. Matoba, S. On the Activity of Oxygen in Molten Iron / S. Matoba, K. Gunji // Tetsu-to-Hagane – 1956, v.42, №1 – P.58–69.
206. Флоридис, Т.П. Активность кислорода в жидких сплавах на основе железа / Т.П. Флоридис, Дж. Чипмен // Проблемы современной металлургии – 1958, №2 – С.3–12.
207. Самарин, А.М. Физико-химические основы раскисления стали – М.: Изд-во АН СССР, 1959 – 64с.

208. Самарин, А.М. Кислород в сплавах железа // В сборнике Теоретические основы металлургических процессов. – Ротапринтное издание Института металлургии им. А.А. Байкова АН СССР. – М.: 1959. – С.3–31.
209. Sakaо, H. Equilibrium between Dissolved Oxygen in Liquid Iron and H₂-H₂O Gas Mixtures / H. Sakaо, K. Sano // Transactions of the Japan Institute of Metals – 1960, v.1, №1 – P.38–42.
210. Эллиотт, Д.Ф. Равновесие углерода – кислорода в жидком железе / Д.Ф. Эллиотт // Физическая химия сталеварения – М.: Металлургиздат, 1963 – С.71–77.
211. Omori, Y. Activity of Oxygen in Liquid Iron / Y. Omori, K. Suzuki, F. Aratani, K. Sanbongi // Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University – v.23(2), 1968 – P.115–127.
212. Сюй Цзэн-Цзи Термодинамические характеристики реакции взаимодействия углерода и кислорода в жидком железе / Сюй Цзэн-Цзи, А.Ю. Поляков, А.М. Самарин // Применение вакуума в металлургии. Вып.3 – М.: Изд-во АН СССР, 1963 – С.3–9.
213. El-Kaddah, N.H. Equilibria in Reactions of CO and CO₂ with Dissolved Oxygen and Carbon in Liquid Iron / N.H. El-Kaddah, D.G.C. Robertson // Metallurgical Transactions B – 1977, v.8B, №12 – P.569–579.
214. Chiang, T. The Activity Coefficient of Oxygen in Binary Liquid Metal Alloys / T. Chiang, Y.A. Chang // Metallurgical Transactions B – 1976, v.7B, №9. – P.453–467.
215. Вагнер, К. Термодинамика сплавов. Перевод с англ. А.Г. Спектора. Под ред. А.А. Жуховицкого / К. Вагнер – М.: Металлургиздат, 1957 – 180с.
216. Поляков, А.Ю. Теоретические основы рафинирования сталеплавильной ванны. – М.: Наука, 1975. – 208с.
217. Chipman, J. Equilibrium in the oxidation of liquid iron by steam and the free energy of ferrous oxide in liquid steel. // Journal of the American Chemical Society – 1933, v.55, №.8 – P.3131–3139.

218. Chipman, J. Effect of Temperature upon Interaction of Gases with Liquid Steel / J. Chipman, A.M. Samarin // Transactions of AIME, Iron and Steel Division – 1937, vol. 125. – P.331–351.
219. Sigworth, G.K. Thermodynamics of Liquid Dilute Iron Alloys / G.K. Sigworth, J.E Elliott // Metal Science – 1974, v.8 – P.298–310.
220. Белов, Б.Ф. Определение предельной растворимости кислорода в расплавленных железе, кобальте и никеле / Б.Ф. Белов, И.А. Новохатский, Ю.А. Лобанов // Известия АН СССР. Металлы – 1967, №3 – С.53–62.
221. Vogel, M.E. Messung und Modellierung der Sauerstoffaktivität in Schmelzen aus hochlegiertem Stahlguss / Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur – 2002 – 126р. // Режим доступа: http://deposit.ddb.de/cgiin/dokserv?idn=965771237&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=965771237.pdf – Загл. с экрана (по состоянию на 08.06.2021).
222. Фромм, Е. Газы и углерод в металлах / Е. Фромм, Е. Гебхардт – М.: Металлургия, 1980. – 712с.
223. Кубашевски, О. Диаграммы состояния двойных систем на основе железа. Справочник; пер. с англ. Л.М. Бернштейна / О. Кубашевски, под ред. Л.А. Петровой – М.: Металлургия 1985. – 184с.
224. Omori, Y. Study on the Activity of Oxygen in liquid Iron – Chromium and Iron – Vanadium Alloys / Y. Omori, K. Sanbongi // Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University – 1968, v.23, №2 – P.129–136.
225. Хансен, М. Структура двойных сплавов. Том 2 / М. Хансен, К. Андерко. Пер.с англ. П.К. Новика, М.Б. Гутермана, Л.Б. Вульф, Г.В. Инденбаум под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга – М.: Металлургиздат, 1962. – 609–1488с.
226. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 3. Кн. 1 / Под общ. ред. Н.П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 2001. – 872с.
227. Шанк, Ф.А. Структуры двойных сплавов. Справочник / Ф. Шанк, Пер. с англ. А.М. Захарова, В.С. Золоторевского, П.К. Новика, Ф.С. Новика. Под ред. И.И. Новикова, И.Л. Рогельберга – М.: Металлургия, 1973. – 760с.

228. Wriedt, H.A. Solubility of Oxygen in Liquid Nickel and Fe-Ni Alloys / H.A. Wriedt, J. Chipman // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society – 1955, vol. 7; iss. 3. – P.477–479.
229. Kemori, N Solubility Limit and Thermodynamic Properties of Oxygen in Liquid Nickel / N. Kemori, I. Katayama, Z. Kozuka // Journal of Chemical Thermodynamics – 1981, vol.13, iss.4 – P.313–325.
230. Taylor, J.R. A Thermodynamic Assessment of the Ni-O, Cr-O and Cr-Ni-O Systems Using the Ionic Liquid and Compound Energy Models / J.R. Taylor, A.T. Dinsdale // International Journal of Materials Research - 1990, vol.81, no.5 - P.354-366.
231. Sigworth, G.K. The Thermodynamics of Dilute Liquid Nickel Alloys / G.K. Sigworth, J.F. Elliott, G. Vaughn, G.H. Geiger // Canadian Metallurgical Quarterly. The Canadian journal of Metallurgy and Materials Science – 1977, Volume 16-17, Issue 1. – P.104–110.
232. Kemori, N Solubility Limit and Thermodynamic Properties of Oxygen in Liquid Nickel / N. Kemori, I. Katayama, and Z. Kozuka // The Journal of Chemical Thermodynamics -1981, vol.13, iss.4 – P.313–325.
233. Jacob, K.T. Solubility and Activity of Oxygen in Liquid Nickel in Equilibrium with α -Al₂O₃ and NiO•(1 + x)Al₂O₃ / R.T. Jacob // Metallurgical and Materials Transactions B – 1986, vol.17B, iss.12 – P.763–770.
234. Richardson, F.D. Thermodynamic study of dilute solutions of carbon in molten Iron / F.D. Richardson, W.E. Dennis // Transactions of Faraday Society – 1953, v.49. – P.171–180.
235. Рист, А. Активность углерода в железо – углеродистых расплавах / А. Рист, Д. Чипман // Физическая химия сталеварения. – М.: Metallurgizdat, 1963. – С.11–29.
236. Mori, T. Effects of Chromium, Copper and Tin on the Activity of Carbon in High Carbon Liquid Steel / T. Mori, K. Fujimura, H. Okajima, A. Yamauchi // Tetsu-to-Hagane, 1968, v.54, No4. – P.321–329.

237. Сюй Цзэн-Цзи Исследование термодинамических свойств растворов углерода в жидком железе / Сюй Цзэн-Цзи, А.Ю. Поляков, А.М. Самарин // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1959, №11. – С.3–12.
238. Мартеновское производство стали (основной процесс) – М.: Металлургиздат, 1947 – 572с.
239. Chipman, J. Thermodynamics and Phase Diagram of the Fe-C System / J. Chipman // Metallurgical Transactions – 1972, v.3, №1 – P.55–64.
240. Ohtani, H. Calculation of Fe-C, Co-C and Ni-C Phase Diagrams / H. Ohtani, M. Hasebe, T. Nishizawa // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan – 1984, v.24, №.10 – P.857–864.
241. Rao, Y.K. Stoichiometry and Thermodynamics of Metallurgical Processes, Cambridge University Press, New York 1985. – 958p.
242. Bouchard, D. Simultaneous Optimization of Thermochemical Data for Liquid Iron Alloys Containing C, N, Ti, Si, Mn, S, and P / D. Bouchard, C.W. Bale // Metallurgical and Materials Transactions B – 1995, v.26B, №6 – P.467–484.
243. Ueda, A. Thermodynamics of Liquid Iron-Carbon Solutions / A. Ueda, K. Fujimura, T. Mori // Tetsu-to-Hagane – 1975, v.61, №14. – P.2962–2971.
244. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Справочник: В 3 т.: Т. 1 / Под общ. ред. Н.П. Лекишева. – М.: Машиностроение, 1996. – 992 с.
245. Эллиот, Р.П. Структуры двойных сплавов. - М.: Металлургия, 1970. Т.1. 456с.; Т.2. 472с.
246. Oden, L.L. C-Ni and Al-C-Ni Phase Diagrams and Thermodynamic Properties of C in the Alloys from 1550°C to 2300°C / L.L. Oden, N.A. Gokcen // Metallurgical and Materials Transactions A – 1997, vol.28, iss.12 – P.2453–2458.
247. Красовский, П.В. Термодинамические свойства расплавов никеля с углеродом / П.В. Красовский, К.В. Григорович // Металлы – 2002, №1 – С.26–29.
248. Van-ya, S. Activity of Carbon and Oxygen in Molten Iron / S. Van-ya, S. Matoba // Tetsu-to-Hagane – 1960, v.46, №3 – P.237–239.
249. Матоба, С. Равновесие углерода и кислорода в жидком железе, насыщенном углеродом. Влияние кремния в интервале его содержаний от 0 до 5,2% /

- С. Матоба, С. Бан-я // Физическая химия сталеварения. Пер. с англ. под ред. Е.В. Челищева – М.: Metallurgizdat, 1963. – С.78–84.
250. Matsumoto, N. Equilibrium between Carbon and Oxygen in Liquid Iron and Carbon-Monoxide under High Pressure / N. Matsumoto // Science reports of the Research Institutes, Tohoku University. Ser. A, Physics, chemistry and metallurgy – 1970, v.22 – P.73–83.
251. Schenck, H. Die Gleichgewichte des Systems Eisen-Kohlenstoff-Sauerstoff im Temperatur- und Konzentrationsbereich des flüssigen Stahls und ihre Beeinflussung durch Phosphor, Mangan und Schwefel / H. Schenck, H. Hinze: // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1966, Jg.37, h.7. – S.545–550.
252. Fischer, W.A. Elektrochemische Aufzeichnung des Entkohlungsablaufs von Eisenschmelzen / W.A. Fischer, D. Janke // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1971, Jg.42 – S.249–255.
253. Дашевский, В.Я. Физико-химические основы раскисления железоникелевых сплавов – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011 – 152с.
254. Sieverts, A. Die Löslichkeit von Wasserstoff, Deuterium und Stickstoff in Eisen / A. Sieverts, G. Zapf, H. Moritz // Zeitschrift für physikalische Chemie. Abt.A – 1938, v.183 – S.19–37.
255. Kubaschewski, O. Die Löslichkeit von Gasen in Metallen / O. Kubaschewski // Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie – 1938, Jg.44, h.2 – S.152–167.
256. Карнаухов, М.М. Кинетика растворения азота в жидком железе и сплавах его с кремнием / М.М. Карнаухов, А.Н. Морозов // Известия АН СССР. ОТН – 1947, №6 – С.735–747.
257. Федотов, В.П. Растворимость азота в жидком железе и расплавах железа и кремния / В.П. Федотов, А.М. Самарин // Доклады АН СССР – 1958, т.122 – С.597
258. Kashyap, V.C. Solubility of nitrogen in liquid iron and iron alloys / V.C. Kashyap, N. Parlee // Transactions of the Metallurgical Society of AIME – 1958, v.212, №1 P.86–91.

259. Schenck, H. Untersuchung über Beeinflussung der Gleichgewichte von Stickstoff mit flüssigen Eisenlösungen durch den Zusatz weiterer Elemente (I) / H. Schenck, M.G. Froberg, Graf // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1958, Jg.29, h.4 – S.673–676.
260. Kasamatsu, Y. Activity of Nitrogen in Liquid Pure Iron // Y. Kasamatsu, S. Matoba // Tetsu-to-Hagane – 1959, v.45, №2 – P.100–105.
261. Schenck, H. Untersuchungen über die Beeinflussung der Gleichgewichte von Stickstoff mit flüssigen Eisenlösungen durch den Zusatz weiterer Elemente (II) / H. Schenck, M.G. Froberg, Graf // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1959, Jg.30, h.3 – S.533–536.
262. Fischer, W.A. Aufnahmegeschwindigkeit und Löslichkeit von Stickstoff in flüssigem Eisen in Abhängigkeit vom gelösten Sauerstoff / W.A. Fischer, A. Hoffmann // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1960, Jg.31, h.4 – S.215–219.
263. Busch, T. Solubility of Hydrogen and Nitrogen in liquid alloys of Iron, Nickel, and Cobalt / T. Busch, R.A. Dodd // Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers – 1960, v. 218, №5 – P.488–490.
264. Pehlke, R.D. Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys. 1. Thermodynamics / R.D. Pehlke, J.F. Elliott // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers – 1960, v.218, №6 – P.1088–1101.
265. Maekawa, S. Solubility of Nitrogen in Liquid Iron and Effect of Carbon, Silicon and Manganese on the Solubility (Solubility of Nitrogen in liquid Iron and Iron Alloys - I) / S. Maekawa, Y. Nakagawa // Tetsu-to-Hagane – 1960, v.46, №7 – P.748–753.
266. Maekawa, S. Effect of Ni, Co, Mo, Cr and V on the Solubility of Nitrogen in Liquid Iron (part II) / S. Maekawa, Y. Nakagawa, Y. Yanagawa // Tetsu-to-Hagane – 1960, v.46, №3 – P.240–241.
267. Maekawa, S. Effect of Ti, Al, and O on the Solubility of Nitrogen in Liquid Iron (part III) / S. Maekawa, Y. Nakagawa, Y. Yanagawa // Tetsu-to-Hagane – 1960, v.46, №3 – P.241–243.

268. Maekawa, S. Effect of Nickel, Cobalt, Molybdenum, Chromium and Vanadium on the Solubility in Liquid Iron (Solubility of nitrogen in liquid Iron and Iron Alloys – II) / S. Maekawa, Y. Nakagawa // *Tetsu-to-Hagane* – 1960, v.46, №9 – P.972–976.
269. Яковлев, В.В. Закономерности поглощения азота жидким железом / В.В. Яковлев, С.И. Филиппов // *Физико-химические основы производства стали* – М.: Наука, 1960. – С.186–193.
270. Ohtani, M. The Effects of Alloying Elements on the Interaction Parameter of Nitrogen and Hydrogen in Liquid Iron / M. Ohtani, K. Sanbongi // *Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University* – 1962, v.17, №2 – P.95–107.
271. Королёв, Л.Г. Растворимость азота в жидких сплавах железа с ванадием / Л.Г. Королёв, А.Н. Морозов // *Известия вузов. Чёрная металлургия* – 1962, №7 – С.27–29.
272. Nelson, E.C. Approximate Calculation of the Change in Solubility of Nitrogen in Molten Iron Alloys as a Function of Temperature / E.C. Nelson // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* – 1963, v.227, №2 – P.189–191.
273. Inagaki, M. Nitrogen Absorption in Arc Melting of Iron / M. Inagaki, T. Wada, M. Uda // *Journal of the Japan Welding Society* – 1965, v.34, №3 – P.322–329.
274. Fuwa, T. Effect of Oxygen, Sulfur, Selenium and Tellurium on the Solubility of Nitrogen in Liquid Iron / T. Fuwa, Sh. Ban-ya, F. Ishii // *Tetsu to hagane* – 1965, v.51, №10 – P.1834–1837.
275. Blossey, R.G. The Solubility of Nitrogen in Liquid Fe-Ni-Co Alloys / R.G. Blossey, R.D. Pehlke // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* – 1966, v.236, №4 – P.566–569.
276. Schürmann, E. Äquivalente Wirkung von Zusatzelementen auf Löslichkeit, Aktivität und Aktivitätskoeffizienten des Stickstoff in eisenreichen Schmelzen. 1. Dreistofflegierungen Fe-N- X_i / E. Schürmann, H.D. Kunze // *Archiv für das Eisenhüttenwesen* – 1967, Jg.38, h.8. – S.585–594.

277. Choh, T. On the Rate of Absorption of Nitrogen in Liquid Iron and Iron Alloys, Containing Carbon, Silicon, Manganese and Chromium / T. Choh, M. Inouye // *Tetsu-to-Hagane* – 1967, v.53, №12 –P.1393–1406.
278. Choh, T. Studies on the Rate of Absorption of Nitrogen in Liquid Iron Containing Surface Active Elements / T. Choh, M. Inouye // *Tetsu-to-Hagane* – 1968, v.54, №1 – P.19–34.
279. Wada, H. Solubility of Nitrogen in Molten Fe-Ni and Fe-Cr Alloys / H. Wada, K. Gunji, T. Wada // *The Journal of the Japan Institute of Metals* – 1968, v.32, №10 – P.933–938.
280. Свяжин, А.Г. Исследование некоторых физико-химических свойств жидкого железа и сплавов железо – углерод с применением бестигельной плавки / А.Г. Свяжин, А.Ф. Вишкарев, В.И. Явойский // *Теория и технология новых процессов в производстве стали. Сб. тр. МИСиС, №58.* – М.: *Металлургия*, 1968. – С.5–24.
281. Uda, M. Solubility of Nitrogen in Arc- and Levitation-Melted Iron and Iron Alloys / M. Uda, S. Ohno, T. Wada // *Journal of the Japan Welding Society* – 1969, v.38, №4 – P.382–392.
282. Choh, T. The Rate of Absorption of Nitrogen in Liquid Fe-O-J and Fe-S-J Alloys / T. Choh, M. Okamura, M. Inouye // *Tetsu-to-Hagane* – 1969, v.55, №13 –P.1176–1182.
283. Kunze, H.D. Influence of Temperature and Equivalent Effect of Added Elements in the Solubility, Activity, and Activity Coefficient of Nitrogen in Liquid Iron / H.D. Kunze, E. Schürmann, N.A.D. Parlee // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 1970, v.1, №1 – P. 281–290.
284. Lange, K.W. Gas Solubility Measurements and the Derivation of Inherent Thermodynamic Information / K.W. Lange, H. Scheck // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 1970, v.1, №7 – P.2036–2038.
285. Григоренко, Г.М. О температурной зависимости растворимости азота в жидком железе / Г.М. Григоренко, Г.Ф. Торхов, В.И. Лакомский // *Доклады АН СССР* – 1970, т.194, №4 – С.881–882.

286. Tsu, Y. Absorption of Nitrogen by Molten Iron and Manganese at High Temperatures / Y. Tsu, T. Saito // Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University – 1972, v.27, №1/2 – P.151–160.
287. Masumoto, T. Development of High Temperature and High Pressure Equipment for Study of Reaction Between Gas and Metals, and Some Experimental Results / T. Masumoto, M. Naka, Y. Imai // Science reports of the Research Institutes. Ser. A, Physics, chemistry and metallurgy – 1972, v.24. – P.16–29.
288. Помарин, Ю.М. О растворимости азота в расплавах железа с никелем / Ю.М. Помарин, Г.М. Григоренко, В.И. Лакомский и др. // Известия АН СССР. Металлы – 1972, №4 – С.32–34.
289. Гуревич, Ю.Г. Растворимость титана, кислорода и азота в жидком железе / Ю.Г. Гуревич // Известия вузов. Чёрная металлургия. – 1972, №5. – С.42–45.
290. Takano, K. Effect of Oxygen on the Solubility of Nitrogen in Molten Iron / K. Takano, M. Imamura, T. Saito // Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University – 1972, v.27 – P.139–144.
291. Суровой, Ю.Н. Растворимость азота в расплавах железа и никеля с хромом / Ю.Н. Суровой, Г.Н. Огороков, С.А. Нефедова // Взаимодействие газов с металлами. Труды III советско-японского симпозиума по физико-химическим основам металлургических процессов. – М.: Наука, 1973. – С.98–108.
292. Choh, T. On the Nitrogen Absorption of Liquid Iron accompanying Carbon-Oxygen Reaction / T. Choh, M. Shimizu, M. Inouye // Tetsu-to-Hagane – 1973, v.59, №14 – P.1914–1924.
293. Свяжин, А.Г. Растворимость азота в жидком железе / А.Г. Свяжин, Г.М. Чурсин, А.Ф. Вишкарев, В.И. Явойский // Известия АН СССР. Металлы. – 1974, №5. – С.24–35.
294. Kojima, Y. The Solubilities and Diffusion Coefficients of Nitrogen in the Liquid Iron-Nickel and Iron-Cobalt Alloys at 1600°C / Y. Kojima, Y. Yamada, M. Inouye // Tetsu-to-Hagane – 1975, v.61, №2 – P.195–201.

295. Lin, R.Y. The Activity Coefficient of Nitrogen in binary Liquid Metal Alloys / R.Y. Lin, Y.A. Chang // Metallurgical and Materials Transactions B – 1977, v.8, №1 – P.293–300.
296. Wada, H. Nitrogen Solution and Titanium Nitride Precipitation in Liquid Fe-Cr-Ni Alloys / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1977, v.8B, №9 – P.443–450.
297. Morita, Z. Solubility of Nitrogen and Equilibrium of Ti-nitride Forming Reaction in Liquid Fe-Ti Alloys / Z. Morita, K. Kunisada // Tetsu-to-Hagane – 1977, v.63, №10 – P.1663–1671.
298. Wada, H. Solubility of Nitrogen in Liquid Fe-Cr-Ni Alloys Containing Manganese and Molybdenum / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1977, v.8B, №12 – P.675–682.
299. Wada, H. Nitrogen Solubility and Aluminum Nitride Precipitation in Liquid Iron, Fe-Cr, Fe-Cr-Ni, and Fe-Cr-Ni-Mo Alloys / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1978, v.9B, №9 – P.441–448.
300. Wada, H. Nitrogen Solubility and Aluminum Nitride Precipitation in Liquid Iron Alloys Containing Nickel and Aluminum / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1979, v.10B, №9 – P.409–412.
301. Парли, Н. Исследование растворимости и диффузии азота в жидких сплавах на основе железа и разработка и опробование методов их расчёта / Н. Парли, Е. Ауза, А. Джаяраджан // Проблемы специальной электротехнологии – Киев, Наукова думка, 1979. – С.186–195.
302. McLellan, R.B. Thermodynamics of the Iron-Nitrogen System / R.B. McLellan, R.J. Farraro // Acta Metallurgica – 1980, v.28, № 3 – P.417–422.
303. Fruehan, R.J. The Rate of Absorption of Nitrogen into Liquid Iron Containing Oxygen and Sulfur / R.J. Fruehan, L.J. Martonik // Metallurgical and Materials Transactions B – 1980, v.11B, №12 – P.615–621.
304. Kawasaki, M. Solubility of Nitrogen in Liquid Alloy Based on Nickel and Iron / M. Kawasaki, M. Tokuda, M. Ohtani // Bulletin of the Research Institute of Mineral Dressing and Metallurgy, Tohoku University – 1980, v.35, №2 – P.99–105.

305. Morita, J. Effect of oxygen on the solubility of nitrogen in liquid Iron / J. Morita, T. Isshiki, Y. Miyabayashi // *Tetsu-to-Hagane* – 1981, v.67, №12 – P.S823.
306. Ishii, F. Effect of Alloying Element on the Solubility of Nitrogen in Liquid Iron / F. Ishii, T. Fuwa // *Tetsu-to-Hagane* – 1982, v.68, №10 – P.1560–1568.
307. Андреев, Л.А. Диффузия и растворимость азота в никеле и железе / Л.А. Андреев, Ю.А. Минаев, Е.Г. Эдлис // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 1986, №9. – С.142–143.
308. Юрин, В.В. Температурная зависимость растворимости азота в жидком железе / В.В. Юрин, Г.И. Котельников, А.Я. Стомахин, В.А. Григорян // *Известия вузов. Чёрная металлургия.* – 1986, №11. – С.40–45.
309. Kuwana, T. The Nitrogen Absorption of Arc-Melted Iron and Stainless Steel / T. Kuwana, H. Kokawa // *Transaction of the Japan Welding Society* – 1988, v.19, №2 – P.92–99.
310. Inouye, R. Thermodynamics of O, N, and S in Liquid Fe Equilibrated with CaO-Al₂O₃-MgO Slags / R. Inouye, H. Suito // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 1994, v.25B, №4 – P.234–244.
311. Ono, H. Effects of Ti, Zr, V and Cr on the Rate of Nitrogen Dissolution in Molten Iron / H. Ono, K. Morita, N. Sano // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 1995, v.26B, №10 – P.991–995.
312. Ono, H. Effects of O, Se and Te on the Rate of Nitrogen Dissolution in Molten Iron / H. Ono, H. Fukagawa, K. Morita, N. Sano // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 1996, v.27B, №10 – P.848–853.
313. Morita, K. Effects of Aluminum, Silicon, and Boron on the Dissolution Rate of Nitrogen into Molten Iron / K. Morita, T. Hirosumi, N. Sano // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 2000, v.31B, №10 – P.899–904.
314. Ono-Nakazato, H. Effect of Surface Concentration of Alloying Elements on Nitrogen Dissolution Rate in Molten Iron Alloys / H. Ono-Nakazato, T. Koyama, T. Usui // *ISIJ International* – 2003, v.43, №3 – P.298–303.

315. Измайлов, В.А. К вопросу о растворимости азота в железе при плазменно-дуговом переплаве / В.А. Измайлов, В.А. Истомин, А.В. Измайлов // *Электрометаллургия* – 2004, №1 – С.3–8.
316. Kokawa, H. Nitrogen absorption and desorption by Steels during Arc and Laser Welding / H. Kokawa // *Welding International* – 2004, v.18, №4 – P.277–287.
317. Ono-Nakazato, H. Effect of Cu, Sn and W on the Rate of Nitrogen Dissociation on the Surface of Molten Iron / H. Ono-Nakazato, Y. Dohi, D. Yamada, T. Usui // *ISIJ International* – 2006, v.46, №9 – P.1306–1311.
318. Kim, W.-Y. Thermodynamics of Titanium, Nitrogen and TiN Formation in Liquid Iron / W.-Y. Kim, J.-O. Jo, T.-I. Chung et al. // *ISIJ International* – 2007, v.47, №8 – P.1082–1089.
319. Jo, J.-O. Thermodynamics of Titanium, Nitrogen, and Oxygen in Liquid Alloy Steels / J.-O. Jo, W.-Y. Kim, D.-S. Kim, J.-J. Pak // *Metals and Materials International* – 2008, v.14, №4 – P.531–537.
320. Пелке, Р.Д. Растворимость азота в жидких расплавах на основе железа / Р.Д. Пелке, Д.Ф. Эллиотт // *Проблемы современной металлургии* – 1960, №6 – С.3–28.
321. Fuwa, T. Hydrogen and Nitrogen in Liquid Iron Alloys / T. Fuwa, S. Ban-ya, F. Ishii // *Physical Chemistry of Steelmaking, Versailles Conf. 1978.* – P.186–193.
322. Schürmann, E. Investigations of the Concentration and Temperature Dependency of Nitrogen Solubility in Iron-Rich Ternary Melts Fe-N-X / E. Schürmann, W. Kättlitz // *Archiv für das Eisenhüttenwesen* – 1981, Band 52, Ausgabe 7 – S.219–224.
323. Ishii, F. Solubility of Nitrogen in Liquid Iron and Iron Alloys Containing the Group VIa Elements / F. Ishii, S. Ban-ya, T. Fuwa // *Tetsu-to-Hagane* – 1982, v.68, №8 – P.946–955.
324. Ishii, F. Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys / F. Ishii, S. Ban-ya, T. Fuwa // *Tetsu-to-Hagane* – 1982, v.68, №10. – P.1551–1559.
325. Lin, R.Y. The Activity Coefficient of Nitrogen in Binary Liquid Metal Alloys / R.Y. Lin, Y.A. Chang // *Metallurgical and Materials Transactions B* – 1977, v.8, №1. – P.293–300.

326. Лакомский, В.И. Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах. – Киев: Наукова думка, 1992. – 232с.
327. Sanbongi, K On the Effect of Alloying Elements on the Solubility of Carbon in Molten Iron / K. Sanbongi , M. Ohtani, K. Toita //Science reports of the Research Institutes, Tohoku University. Ser. A, Physics, chemistry and metallurgy – 1957, v.9. – P.147–158.
328. Takei, T. Solubility of Nitrogen in Liquid Stainless Steel / T. Takei, A. Yoshida, S. Watanabe, K. Takakura // Tetsu-to-Hagane – 1960, v.46, №10. – P.1299–1301.
329. Бир, С.З. Растворимость азота в жидких железомарганцевых сплавах / С.З. Бир // Проблемы современной металлургии – 1961, №4. – С.3–13.
330. Kor, G.J.W. The Solubility of Nitrogen in Liquid Manganese / G.J.W. Kor // Metallurgical and Materials Transactions B – 1978, v.9B, №3. – P.97–99.
331. Безобразов, С.В. Растворимость азота в высокохромистых расплавах системы железо – хром / С.В. Безобразов, А.Г. Пономаренко, Е.Н. Иноземцева / Известия АН СССР. Металлы – 1980, №3. – С.53–59.
332. Wada, H. Nitrogen Solubility in Liquid Fe-Ta, Fe-Cr-Ta, Fe-Ni-Ta, and Fe-Cr-Ni-Ta Alloys / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1980, v.11B, №3. – P.51–56.
333. Wada, H. Nitrogen Solubility in Liquid Fe-V and Fe-Cr-Ni-V Alloys / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1981, v.12B, №6. – P.333–339.
334. Хяккинен, В.И. Растворимость азота в высоколегированных расплавах системы Cr-Mn-Fe / В.И. Хяккинен, С.В. Безобразов, А.Г. Пономаренко, О.Н. Бессонов // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1981, №9. – С.55–59.
335. Morita, J. Solubility of nitrogen in liquid Fe-V, Fe-Cr and Fe-Ni alloys / J. Morita, T. Tanaka, T. Yanai // Tetsu-to-Hagane – 1982, v.68, №11. – P.S856.
336. Ishii, F. Solubility of Nitrogen in Liquid Chromium and Chromium-Iron Alloys / F. Ishii, Y. Iguchi, S. Ban-ya // Tetsu-to-Hagane – 1983, vol.69, iss.8. – P.913–920.

337. Wada, H. Nitrogen Solubility and Nitride Formation in Austenitic Fe-Ti Alloys / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1985, v.16B, №12. – P.815–822.
338. Ishii, F. Solubility of Nitrogen in Liquid Chromium and Chromium-Iron Alloys / F. Ishii, Y. Iguchi, S. Ban-ya // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan – 1986, v.26, №2. – P.128–132.
339. Wada, H. Nitrogen Solubility in Liquid Fe and Fe-Mn Alloys / H. Wada, S.W. Lee, R.D. Pehlke // Metallurgical and Materials Transactions B – 1986, v.17B, №3. – P.238–239.
340. Kunze, J. Solubility of Nitrogen in Fe-Si alloys / J. Kunze, O. Pungun, K. Friedrich // Journal of Materials Science Letters – 1986, v.5. – P.815–818.
341. Shahapurkar, D.S. Nitrogen Solubility in Complex Liquid Fe-Cr-Ni Alloys / D.S. Shahapurkar, W.M. Small // Metallurgical and Materials Transactions B – 1987, v.18B, №3. – P.225–230.
342. Mancha, H. Solubility of nitrogen in liquid ASTM F-75 alloys / H. Mancha, M. Herrera-Trejo, G. Garcia, M. Mendez, D. Ablitzer // Materials and Design – 1996, v.17, №2. – P.103–106.
343. Siwka, J. Solubility of nitrogen in liquid chromium / J. Siwka // Archives of metallurgy – 1998, v.43, №1. – P.67–82.
344. Mukawa, S. The Effect of Pressure and Oxygen, Sulfur and Nitrogen Content on the Rate of Nitrogen Absorption and Desorption of Liquid Steel / S. Mukawa, Y. Mizukami, Y. Ueshima // Tetsu-to-Hagane – 1998, v.84, №6. – P.411–416.
345. Kim, E.-J. Nitrogen Solubility in Liquid Manganese and Ferromanganese Alloys / E.-J. Kim, B.-D. You, J.-J. Pak // Metallurgical and Materials Transactions B – 2001, v.32B, №8. – P.659–668.
346. Abdulrahman, R.F. Solubility of Nitrogen in Liquid Pure Nickel / R.F. Abdulrahman, A. Hendry // Metallurgical and Materials Transactions B – 2001, v.32B, №12. – P.1095–1101.

347. Abdulrahman, R.F. Solubility of Nitrogen in Liquid Nickel-Based Alloys / R.F. Abdulrahman, A. Hendry // Metallurgical and Materials Transactions B – 2001, v.32B, №12. – P.1103–1112.
348. Lee, S.-B. Effect of Niobium on Nitrogen Solubility in High Chromium Steel / S. B. Lee, M.-C. Jung, H. Song, C.-H. Rhee // ISIJ International – 2002, v.42, №6. – P.603–608.
349. Kowanda, C. Solubility of nitrogen in liquid nickel and binary Ni–Xi alloys (Xi=Cr, Mo, W, Mn, Fe, Co) under elevated pressure / C. Kowanda, M.O. Speidel // Scripta Materialia – 2003, v.48, №4. – P.1073–1078.
350. Kim, W.-Y. Effect of Chromium on Nitrogen Solubility in Liquid Fe-Cr Alloys Containing 30 mass % Cr / W.-Y. Kim, C.-O. Lee, J.-J. Pak // ISIJ International – 2009, v.49, №11. – P.1668–1672.
351. Pehlke, R.D. Solubility of Nitrogen in Liquid Iron Alloys. 2. Kinetics / R.D. Pehlke, J.F. Elliott // Transactions of the Metallurgical Society of AIME – 1963, v.227, №4. – P.844–855.
352. Шимаё, К. Исследование кинетики реакции между жидким железом и азотом методом плавки во взвешенном состоянии / К. Шимаё, Т. Таками // Физико-химические основы металлургических процессов – М.: Наука, 1973. – С.169–178.
353. Byrne, M. Studies of the Interfacial Kinetics of the Reaction of Nitrogen with Liquid Iron by the ^{15}N - ^{14}N Isotope Exchange Reaction / M. Byrne, G.R. Belton // Metallurgical and Materials Transactions B – 1983, v.14B, №9. – P.441–449.
354. Kadoguchi, K. Rate of Absorption of Injected Nitrogen in Molten Iron / K. Kadoguchi, M. Sano, K. Mori // Tetsu-to-Hagane – 1985, v.71, №1. – P.70–77.
355. Kawakami, M. Dispersion of Bubbles in Molten Iron and the Nitrogen Transfer in the Bubble Dispersion Zone at 1250°C / M. Kawakami, Y. Kitazawa, T. Nakamura, T. Miyake, K. Ito // Transactions ISIJ – 1985, v.25, №5. – P.394–402.
356. Takahashi, M. Rate of Nitrogen Desorption from Molten Iron by Ar Gas Injection / M. Takahashi, H. Matsuda, M. Sano, K. Mori // Tetsu-to-Hagane – 1986, v.72, №3. – P.419–425.

357. Takahashi, M. Rate of Nitrogen Desorption from Molten Iron by Argon Injection Together with Blowing onto the Melt / M. Takahashi, H. Ookuma, M. Sano, K. Mori, M. Hirasawa // *Tetsu-to-Hagane* – 1986, v.72, №15. – P.2064–2069.
358. Takahashi, M. Rate Controlling Mechanism of Nitrogen Desorption by Ar Injection into Molten Iron / M. Takahashi, H. Matsuda, M. Sano, K. Mori // *Transactions ISIJ* – 1987, v.27, №8. – P.626–632.
359. Takahashi, M. Enhanced Nitrogen Desorption from Molten Iron by Combined Ar Injection and Blowing / M. Takahashi, M. Sano, K. Mori, M. Hirasawa // *Transactions ISIJ* – 1987, v.27, №8. – P.633–637.
360. Tsukihashi, F. The Kinetics of the Nitrogen Reaction with Carbon Saturated Iron Alloys / F. Tsukihashi, R.J. Fruehan // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* – 1987, v.27, №11. – P.858–865.
361. Takahashi, M. Interfacial Resistance to Nitrogen Desorption from Molten Iron / M. Takahashi, Ye-Tao Han, M. Sano, K. Mori, M. Hirasawa // *Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan* – 1987, v.27, №11. – P.866–872.
362. Zhu, J. The Influence of Oxygen on the Rate of Nitrogen Absorption into Molten Iron and Marangoni Convection / J. Zhu, K. Mukai // *ISIJ International* – 1998, v.38, №3. – P.220–228.
363. Zhu, J. The Rate of Nitrogen Desorption from Liquid Iron by Blowing Argon Gas under the Condition of Non-inductive Stirring / J. Zhu, K. Mukai // *ISIJ International* – 1999, v.39, №3. – P.219–228.
364. Gruszczyk, A. The kinetics of nitrogen dissolution in levitation and arc-melted Fe-C-Mn filler metals / A. Gruszczyk // *Archives of Materials Science and Engineering* – 2008, v.31, №2. – P.109-112.
365. Явойский, В.И. Термодинамика и кинетика взаимодействия азота с расплавами железа / В.И. Явойский, А.Г. Свяжин, А.Ф. Вишкарев, Г.М. Чурсин // *Взаимодействие газов с металлами. Труды III советско-японского симпозиума по физико-химическим основам металлургических процессов.* – М.: Наука, 1973. – С.98–108.

366. Hillert, M. A Thermodynamic Analysis of the Iron-Nitrogen System / M. Hillert, M. Jarl // Metallurgical Transactions A – 1975, v.6A, №3. – P.553–559.
367. Chang, Y.A. On the Gibbs Energy Interaction Parameters of Oxygen and Nitrogen in Liquid Alloys / Y.A. Chang, D.C. Hu // Metallurgical and Materials Transactions B – 1979, v.10B, №3. – P.43–48.
368. Frisk, K. A thermodynamic evaluation of the Cr-N, Fe-N, Mo-N and Cr-Mo-N systems / K. Frisk // Calphad – 1991, v.15, iss.1. – P.79–106.
369. Ma, Z. Thermodynamic Description for Concentrated Metallic Solutions Using Interaction Parameters / Z. Ma // Metallurgical and Materials Transactions B – 2001, v.32B, №2. – P.87–103.
370. Lee, Y.E. Thermodynamics of Nitrogen in Mn-Fe-C Melts / Y.E. Lee // Metallurgical and Materials Transactions B – 2003, v.34B, №12. – P.853–859.
371. Siwka, J. Equilibrium Constants and Nitrogen Activity in Liquid Metals and Iron Alloys / J. Siwka // ISIJ International – 2008, v.48, №4. – P.385–394.
372. Chipman, J. Prediction of solubility of nitrogen in molten steel / J. Chipman, D.A. Corrigan – Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers. – 1965, vol. 233, iss.7. – P.1249–1252.
373. Wada, H. Solubility of nitrogen in liquid iron-chromium-nickel alloys containing manganese and molybdenum / H. Wada, R.D. Pehlke // Metallurgical Transactions B: Process Metallurgy – 1977, vol.8B, iss.4. – P.675–682.
374. Лакомский, В.И. Взаимодействие диатомных газов с жидкими металлами при высоких температурах – Киев, Наукова думка, 1992. – 232с.
375. Medovar, B.I. Arc Slag Remelting of Steel Alloys / B.I. Medovar, V.Y. Saenko, G.M. Grigorenko – Cambridge, UK: Cambridge International Science. Publishing Ltd, 1996 – 47p.
376. Jiang, Zh. The Nitrogen Solubility in Molten Stainless Steel / Zh. Jiang, H. Li, Zh. Chen et al. // Steel research int. – 2005, vol.76, No.10. – P.730–735.
377. Li-Yuan, S. Production of Nitrogen-Bearing Stainless Steel by Injecting Nitrogen Gas / S. Li-Yuan. L. Jing-She, Z. Li-Feng et al. // Journal of Iron and Steel Research, International – 2011, vol. 18, №11. – P.7–11.

378. Englund, H. Regulation of Nitrogen Content in High Alloyed Stainless Steels during the AOD Process / H. Englund, H. Isaksson – Stockholm, KTH Royal Institute of Technology, 2019 – 37p.
379. Kijac, J. The Nitrogen Content Management in the Oxygen Converter Steelmaking / J. Kijac, R. Sladikova, B. Buiko, T. Borovsky // *Metalurgija* – 2012, vol. 51, № 2. – P.191–194.
380. Свяжин, А.Г. Стали, легированные азотом / А.Г. Свяжин, Л.М. Капуткина // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия* – 2005; т.62, №10. – С.36–46.
381. Свяжин, А.Г. Азотистые и высокоазотистые стали. Промышленные технологии и свойства. / А.Г. Свяжин, Л.М. Капуткина // *Известия высших учебных заведений. Черная металлургия* – 2019, т.62, №3. – С.173–187.
<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-3-173-187>
382. Satir-Kolorz, A.H. On the Solubility of Nitrogen in Liquid Iron and Steel Alloys Using Elevated Pressure / A.H. Satir-Kolorz, H.K. Feichtinger // *Z. Metallkde.* – 1991, Bd.82, H.9. – S.689–697.
383. Forch, K. Technologies of Newly Developed High-Nitrogen Steels / K. Forch, G. Stein, J. Menzel – HNS 90 – High Nitrogen Steels, Inst. Met., London, 1991. – P.258–267.
384. Feichtinger, H.K. Concepts of Nitrogen Solubility. High Nitrogen Steels, HNS 93 in: *Proceeding 3rd Int. Conference, Kiew, 1993*, Ed: Inst. Met. Physic, Academic of science Ukraine, 1993. – P.45–54.
385. Ригина, Л.Г. Исследование и разработка технологии ЭШП и ЭШПД хромомарганцевых сталей, легированных азотом / Автореферат дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук. – М.: ЦНИИТМАШ, 2005 – 32с.
386. Бородулин, Г.М. Нержавеющая сталь / Г.М. Бородулин, Е.И. Мошкевич – М.: Металлургия, 1973 – 320с.
387. Anson, D.R. Prediction of the Solubility of Nitrogen in Molten Duplex Stainless Steel / D.R. Anson, R.J. Pomfret, A. Hendry // *ISIJ International* – 1996, vol.36, №7. – P.750–758.

388. Riipi, J. Behavior of Nitrogen During AOD Process / J. Riipi, T. Fabritius, E.- P. Heikkinen et al. // *ISIJ International* – 2009, vol. 49, iss.10. – P.1468–1473.
389. Cobelli, P. Development of ultrahigh strength austenitic stainless steels alloyed with nitrogen - Diss., Technische Wissenschaften ETH Zürich, Nr. 15025, 2003. – 124p.
390. Speidel, M.O. Nitrogen Containing Austenitic Stainless Steels / M.O. Speidel, Speidel H.J. // *HNS 2006 Conf.*, 29-31 August, Jiuzhaigou Valley, Sichuan Province, China, 2006. – P. 21–29.
391. Науменко, В.В. Влияние азота и кремния на механические и коррозионные свойства низкоуглеродистой аустенитной стали для применения в сильноокислительных средах: автореферат диссертации кандидата технических наук: 05.16.01. – Москва, Центр. науч.-исслед. ин-т чер. металлургии им. И.П. Бардина, 2012. – 26с.
392. Siwka, J. Equilibrium Constants and Nitrogen Activity in Liquid Metals and Iron Alloys / J. Siwka // *ISIJ International* – 2008, v.48, №4. – P.385–394.
393. Qian, K Nitrogen Solubility in Liquid Ni-V, Ni-Ta, Ni-Cr-V, and Ni-Cr-Ta Alloys / K. Qian, B. Chen, L. Shu, K. Liu // *Metals* – 2019, vol.9, iss.11, article number 1184. – 17p.
394. Большов, Л.А. Термодинамика растворов азота в жидком никеле / Л.А. Большов, С.К. Корнейчук, Э.Л. Большова // *Известия вузов. Черная металлургия* – 2021, том 64, №3. – С.200–204.
395. Humbert, J.C. The solubility of nitrogen in liquid Fe-Cr-Ni alloys / J.C. Humbert J.C., Elliott J.F. // *Transactions of the Metallurgical Society of AIME* – 1960, vol. 218, No.10. – P.1076–1088.
396. Стомахин, А.Я. Растворимость азота в жидком никеле и в сплавах никеля с хромом, молибденом и вольфрамом / А.Я. Стомахин, П. Байер, А.Ю. Поляков // *Известия АН СССР. Металлы* – 1965, № 4. – С.37–45.
397. Федорченко, В.Р. Растворимость азота в жидком никеле и расплавах Ni-Cr, Ni-Mo и Ni-W / В.Р. Федорченко, В.В. Аверин, А.М. Самарин // *Доклады Академии наук СССР* – 1968, т.183, № 4. – С.894–896.

398. Lin, R.Y. The Activity Coefficient of Nitrogen in Binary Liquid Metal Alloys / R.Y. Lin, Y.A. Chang // Metallurgical Transactions B – 1977, vol.8B, iss.6. – P.293–300.
399. Schürmann, E. Systematic of the equivalent influence of alloying elements on the nitrogen and hydrogen solubility in iron, cobalt, and nickel base alloys / E. Schürmann, M. Sittard, M. R. Völker // Steel Research – 1986, vol.57, iss.11. – P.546–551.
400. Hübner, A Untersuchungen über den Einfluss und die Wirkungen von Stickstoffzusätzen im Schutzgas auf das Heißrissverhalten ausgewählter heißrissempfindlicher Nickel-Basiswerkstoffe – Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktoringenieurin, genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg – 2005. – 211s.
401. Бурнашев, В.Р. Поведение азота при выплавке специальных сталей в пазменно-дуговой печи переменного тока с керамическим подом / В.Р. Бурнашев // Современная электрометаллургия – 2010, № 3. – С.27–32.
402. Takahiro, M. Chapter 3.6 – Dilute Solutions / M. Takahiro // Treatise on Process Metallurgy. Volume1: Process Fundamentals, Editor: S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – P.557–585.
403. Соколов, В.Н. Расчет температурной зависимости растворимости азота в никелевых расплавах / В.М. Соколов, Г.С. Теслер, Б.А. Попов // Металлы – 1987, №3. – С.39–43.
404. Соколов, В.М. Расчет активности неметаллов в металлических расплавах с использованием принципа эквивалентных концентраций / В.М. Соколов, Л.А. Ковальчук // Металлы – 1990, №6. – С.28–34.
405. Kowanda, C. Stickstofflöslichkeit in Nickel und Nickelbasislegierungen im schmelzflüssigen Zustand unter erhöhtem Stickstoffpartialdruck / Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der Technischen Wissenschaften der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich – Zürich, 2000 – 217s.

406. Pehlke, R.D. Solubility of nitrogen in liquid iron alloys. II Kinetics / R.D. Pehlke, J.F. Elliott // Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers – 1963, vol.227, №5. – P.844–855.
407. Явойский, В.И. Термодинамика и кинетика взаимодействия азота с расплавами железа / В.И. Явойский, А.Г. Свяжин, А.Ф. Вишкарев, Г.М. Чурсин // Взаимодействие газов с металлами. Труды III советско-японского симпозиума по физико-химическим основам металлургических процессов. – М.: Наука, 1973. – С.98–108.
408. Безобразов, С.В. Кинетика растворения азота в высокохромистых расплавах системы железо – хром / С.В. Безобразов, А.Г. Пономаренко, В.И. Хяккинен // Известия АН СССР. Металлы – 1981, №4. – С.45–50.
409. Сидоренко, М.Ф. Теория и технология электроплавки стали. Учебн. пособие для вузов. – М.: Металлургия, 1985. – 270с.
410. Попель, С.И. Теория металлургических процессов: учеб. пособие для вузов / С.И. Попель, А.И. Сотников, В.Н. Бороненков – М.: Металлургия, 1986. – 464с.
411. Ito, V.K. Kinetic Study on Nitrogen Absorption and Desorption of Molten Iron / V.K. Ito, K. Amano, H. Sakao // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan – 1988, vol.28, iss.1. – P.41–48.
412. Van-Ya, S. Rate of nitrogen desorption from liquid iron-carbon and iron-chromium alloys with argon. / S. Van-Ya, F. Ishii, Y. Iguchi, et al. // Metallurgical Transactions B – 1988, v.19B, №4. – P.233–242.
413. Ершов, Г.С. Диффузия в металлургических расплавах / Г.С. Ершов, В.П. Майборода – Киев: Наукова думка, 1990. – 224с.
414. Hayes, P Chapter 4.2 – Reaction Kinetics / P. Hayes // Treatise on Process Metallurgy. Volume1: Process Fundamentals, Editor: S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – P.817–830.
415. Лепинских, Б.М. Транспортные свойства металлических и шлаковых расплавов: справ. изд. Под редакцией акад. Н.А. Ватолина / Б.М. Лепинских, А.А. Белоусов, С.Г. Бахвалов и др. – М.: Металлургия, 1995. – 649с.

416. Holappa, L. Chapter 1.6 – Secondary Steelmaking / L. Holappa // Treatise on Process Metallurgy. Volume 3: Industrial Processes, Part A, Editor: S. Seetharaman. – Elsevier, 2014. – P.301–346.
417. Schenck, H. Untersuchungen zur Stickstoffaufnahme in flüssigen Eisenlegierungen im Druckbereich bis zu vier Atmosphären / H. Schenck, M.Froberg, H.Heinemann // Ibid. – 1962, v.33, № 9. – S.593–600.
418. Морозов, А.Н. О растворимости азота в шлаках / А.Н. Морозов, А.Г. Пономаренко, Ю.Е. Козлов // Известия АН СССР. Металлы – 1971, №6. – С.53–57.
419. Пономаренко, А.Г. К вопросу о растворимости азота в шлаках / А.Г. Пономаренко, Ю.Е. Козлов, А.Н. Морозов // Известия АН СССР. Металлы – 1974, №3. – С.64–68.
420. Пономаренко, А.Г. О некоторых особенностях массопереноса в оксидных фазах / А.Г. Пономаренко, Ю.Е. Козлов // Известия вузов. Чёрная металлургия – 1975, №5. – С.20–25.
421. Сиддики, Ф. Особенности эксплуатации ЭДП-120 с трансформатором 87 МВА на ЗАО "ММЗ "ИСТИЛ (Украина)" / Ф. Сиддики, Х. Раза, Г.И. Касьян и др. // Труды 3-й международной научно-технической конференции "Прогрессивные технологии в металлургии стали: XXI век", 31 октября – 2 ноября 2006г. – Донецк: ООО "Норд Компьютер", 2007. – С.86–89.
422. ММЗ – современный конкурентноспособный завод по производству качественной металлопродукции. // Режим доступа: http://mars.aommz.com/pls/web/web.main.show?main_id=10&m_id=11 – Загл. с экрана (по состоянию на 08.06.2021).
423. Кутаков, А.В. Разработка, исследование и освоение сверхмощной дуговой сталеплавильной печи в составе высокопроизводительного модуля для производства мелкосортowego проката / А.В. Кутаков: диссертация кандидата технических наук, специальность 05.02.13 "Машины и агрегаты металлургического производства". – Рыбница: Совместное предприятие

- Акционерное общество закрытого типа "Молдавский металлургический завод", 2001. – 222с.
424. Деревянченко, И.В. Развитие техники и технологии выплавки стали в сверхмощных дуговых сталеплавильных печах переменного тока в условиях Молдавского металлургического завода / И.В. Деревянченко, А.В. Гальченко, А.В. Ченовол // Литьё и металлургия – 2002, №1. – С.104–107.
425. Ларичев, С.Н. Развитие технологии выплавки стали в ДСП ЭСПЦ ОАО "Северсталь" / С.Н. Ларичев, К.Э. Прудков, С.Б. Ерошкин, С.В. Казаков // Труды X Международного конгресса сталеплавильщиков – М.: Металлургия, 2009. – С.348–352.
426. Официальный сайт фирмы «INTECO». [Электронный ресурс]. 2016. URL: <http://www.inteco.at/ru/home-ru.html> (дата обращения: 11.03.2016)
427. ГОСТ 10243-75 Сталь. Методы испытаний и оценки макроструктуры – М.: Издательство стандартов, 1976. – 46с.
428. ГОСТ Р 54153-2010 Сталь. Метод атомно-эмиссионного спектрального анализа. – М.: Стандартиформ, 2012. – 32с.
429. ГОСТ 1778-70. Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений – М.: Стандартиформ, 2011. – 32с.
430. ГОСТ 24018.3-80. Сплавы жаропрочные на никелевой основе. Методы определения свинца. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 10с.
431. ГОСТ 24018.5-80 Сплавы жаропрочные на никелевой основе. Метод определения свинца и висмута. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 8с.
432. ГОСТ 13047.25-2002. Никель. Кобальт. Методы определения селена в никеле. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 11с.
433. Моделирование химических и фазовых равновесий при высоких температурах: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 920054 Российская Федерация / Б.Г. Трусов, МГТУ им. Н.Э. Баумана – М.: РосАПО. – 1992.
434. Белов, Г.В. Термодинамическое моделирование химически реагирующих систем / Г.В. Белов, Б.Г. Трусов – М.: МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2013. – 96с.

435. Трусов, Б.Г. Описание программ термодинамического расчета состава произвольных гетерогенных систем, а также их термодинамических и транспортных свойств. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 90с.
436. Кауфман, Л. Расчет диаграмм состояния с помощью ЭВМ. Монография. / Л. Кауфман, Х. Бернштейн – М.: Мир, 1972. – 326с.
437. Hillert, M. Empirical methods of predicting and representing thermodynamic properties of ternary solution phases / M. Hillert // *Calphad* – 1980, Vol.4, Iss.1 – P.1–12.
438. Lukas, H. Computational thermodynamics. The CALPHAD method / H. Lukas, S.G. Fries, Bo. Sundman // 1-st edition (August 13, 2007) – UK, Cambridge University Press. – 324p.
439. Корзун, Е.Л. Снижение содержания азота при выплавке стали в сверхмощной ДСП / Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко, А.В. Гальченко, А.Н. Голубцов, Р.В. Синяков // *Электromеталлургия* – 2001, №11. – С.3–8.
440. Корзун, Е.Л. О влиянии технологических факторов на содержание азота в стали, выплавляемой в сверхмощной дуговой печи / Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко, А.В. Кодак, Е.М. Юденков // *Современная электromеталлургия* – 2010, №1. – С. 47–50.
441. Korzun, E.L. Influence of the composition of high-temperature nickel- alloy electrodes on the ingot composition in vacuum arc remelting / E.L. Korzun, V.V. Klochai, A.D. Ryabtsev // *Steel in Translation* – 2016, vol.46, iss.8. – P.576–582.
442. Синяков, Р.В. Совершенствование выплавки стали с повышенной долей жидкого чугуна в шахтной печи ОАО "Северсталь" // Р.В. Синяков, Е.Л. Корзун, Д.А. Пономаренко и др. // *Современные проблемы электromеталлургии стали. Материалы XV Международной научной конференции. Часть вторая* – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С.3–7.
443. Дуб, В.С. Разработка и освоение технологии циклического электрошлакового переплава стали ЧС-82 для пеналов системы уплотненного хранения топлива

- / В.С. Дуб, Л.Я. Левков, М.А. Киссельман и др.// Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики: сб. тезисов докладов V Международной научно-технической конференции (2–5 октября 2018 г., Москва). – М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2018. – С.264.
444. Корзун, Е.Л. О критических конструктивных параметрах для обеспечения вакуумно-индукционной выплавки жаропрочных никелевых сплавов высокого качества / Е.Л. Корзун, В.В. Клочай // Международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов», имени академика А.М. Самарина. Москва. 25 – 28 ноября 2019 г. Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2019. – С.92.
445. Корзун, Е.Л. К вопросу о точности термодинамических величин, используемых для моделирования процессов чёрной металлургии / Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко // Научно-техническая конференция, посвящена анализу проблем и перспективам развития информационных технологий в металлургии и машиностроении – ИТММ'2010 – 30.03.2010 – 02.04.2010 НМетАУ, Днепропетровск. – Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Вип. 2(67) – Дніпропетровськ, 2010 – С.28–36.
446. Пономаренко, А.Г. Термодинамика и кинетика в современных системах управления металлургической плавкой / А.Г. Пономаренко, Р.В. Синяков, С.В. Довгонюк, Е.Л. Корзун // Вестник ЮУрГУ. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002, № 2. – С.32–35.
447. Рябцев, А.Д. Легирование металла азотом из газовой фазы при ЭШП / А.Д. Рябцев, А.А. Троянский, Е.Л. Корзун и др. // Проблемы специальной электрометаллургии – 2002, №4 (69). – С.3–8.
448. Харченко, А.В. Термодинамическая модель многокомпонентной конденсированной фазы / А.В. Харченко, А.Г. Пономаренко, Е.Л. Корзун // Металлургическая и горнорудная промышленность – 2004, №8. – С.135–139.
449. Корзун, Е.Л. О термодинамическом описании жидких растворов кислорода в железе / Е.Л. Корзун, А.Г. Пономаренко // Научные труды Донецкого

- национального технического университета. Серия "Металлургия". Вып. 11 (159) – Донецк, ООО «Цифровая типография», 2009. – С.107–123.
450. Пономаренко, А.Г. Проблемы физико-химического моделирования процессов дегазации жидкой стали / А.Г. Пономаренко, Е.Л. Корзун // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия "Металлургия". Вып. 12(177) – Донецк, ООО "Цифровая типография", 2010 – С.46–55.
451. Пономаренко, А.Г. Об активности кислорода в газовой фазе металлургических систем / А.Г. Пономаренко, Е.Л. Корзун // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия "Металлургия". Вып. 13(194) – Донецк, ООО "Цифровая типография", 2011 – С.11–27.
452. Корзун, Е.Л. Распределение азота между газовой фазой и расплавом на основе железа / Е.Л. Корзун // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия "Металлургия". №1(16) – 2(17) – Донецк, ООО "Цифровая типография", 2013 – С.188–200.
453. Корзун, Е.Л. Оценка активности азота в газовой фазе металлургических систем / Е.Л. Корзун // Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XV Международной научной конференции. Часть первая – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С.53–57.
454. Способ электрошлакового переплава титана / А.П. Ярошенко, В.Н. Радченко, М.В. Савоськин и др. – Патент Украины. №23387А, от 31.08.98. С22В34/12.
455. Кобзарь, А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. – М.: Физматлит, 2006. – 816с.
456. Бажин, Н.М. Термодинамика для химиков / Н.М. Бажин, В.А. Иванченко, В.Н. Пармон – М.: Химия, КолосС, 2004. – 416с.
457. Термические константы веществ. Справочник под ред. В.П. Глушко. – М.: АН СССР, ВИНТИ, ИВТ, 1965. вып. 1, 145 с; 1966, вып. II, 95 с; 1968, вып. III, 221 с; 1970, вып. IV, ч. I; 509 с; 1971, вып. V, 530 с; 1972, вып. VI, ч. I, 369 с; 1974, вып. VII, ч. I, 343 с.
458. Пономаренко, А.Г. Вопросы термодинамики фаз переменного состава, имеющих коллективную электронную подсистему. IV. Уровень Ферми в

- оксидных фазах // Журнал физической химии – 1974, т.XLVIII, №8. – С.1954-1958.
459. Синярев, Г.Б. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов – М.: Наука, 1982. – 264с.
460. Ватолин, Н.А. Термодинамическое моделирование в высокотемпературных неорганических системах / Н.А. Ватолин, Г.К. Моисеев, Б.Г. Трусов – М.: Металлургия, 1994. – 352 с.
461. Белов, Г.В. Термодинамическое моделирование: методы, алгоритмы, программы – М.: Научный мир, 2002. – 184с.
462. The Making, Shaping and Treating of Steel. Steelmaking and Refining Volume. – Association of Iron and Steel Engineers, 1998. – 790p.
463. Теория металлургических процессов: учебник для вузов / Д.И. Рыжонков, П.П. Арсентьев, В.В. Яковлев и др. – М.: Металлургия, 1989. – 392с.
464. Михайлов, Г.Г. Термодинамика металлургических процессов и систем. / Г.Г. Михайлов, Б.И. Леонович, Ю.С. Кузнецов – М.: Изд. дом МИСиС, 2009. – 520с.
465. Коган, В.Б. Гетерогенные равновесия / В.Б. Коган – М.: Химия, 1968. – 432с.
466. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. // 3-е изд., перераб. и расширен. Т. I. Кн. 2. – М.: Наука, 1978. – 328с.
467. Термодинамические свойства индивидуальных веществ. Справочное издание: В 4-х т. / Л.В. Гурвич, И.В. Вейц, В.А. Медведев и др. // 3-е изд., перераб. и расширен. Т. II. Кн. 2. – М.: Наука, 1979. – 344с.
468. Дриц, М.Е. Свойства элементов: справ. изд в 2-х кн. Кн.2 / М.Е. Дриц, П.Б. Будберг, Н.Т. Кузнецов и др. / под ред. Дрица М.Е. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, ГУП "Журнал Цветные металлы", 1997. – 448с.
469. Казенас, Е.К. Термодинамика испарения оксидов / Е.К. Казенас, Ю.В. Цветков – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480с.

470. Завьялов, О.В. Растворимость кислорода в высокоуглеродистых расплавах железа. / О.В. Завьялов, Ю.А. Карпов, Л.Б. Кузнецов и др. // Доклады АН СССР. Том 195 – №4, 1970. – С.900–902.
471. Hooijmans, J.W. The Influence of Oxygen on Nitrogen Absorption during Arc Melting of Iron / J.W. Hooijmans, G. den Ouden // Welding research supplement – 1992, №10. – P.377–380.
472. Самарин, А.М. Растворимость азота в расплавах железа и кремния / А.М. Самарин, В.П. Федотов // Физико-химические основы производства стали. Труды IV конференции по физико-химическим основам производства стали. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – С.144–154.
473. Свяжин, А.Г. Применение плавки во взвешенном состоянии для физико-химических исследований / А.Г. Свяжин, А.Ф. Вишкарев, В.И. Явойский // Известия вуз. Чёрная металлургия – 1966, №8. – С.76–81.
474. Лакомский, В.И. Исследование поглощения жидким железом азота из аммиака / В.И. Лакомский // Физика и химия обработки материалов – 1968, №5. – С.36–42.
475. Geller, W. Wasserstoff- und Sauerstoffbestimmung im flüssigen Stahl / W. Geller, Tak-Ho-Sun // Archiv für das Eisenhüttenwesen – 1943/1944, vol. 17, No.7/8. – S.159–162.
476. Шюрман, Э. Изменение содержания азота от передельного чугуна в доменной печи до стали в конвертере / Э. Шюрман, Ф. Мюншер, Р. Хаммер и др. // Чёрные металлы – 1989, №7. – С.18–24.
477. Разработка технологии производства электротехнической стали с вдуванием порошкообразного материала в вакууматор RH // Новости чёрной металлургии за рубежом – 1999, №1. – С.38–40.
478. Эткинс, П. Физическая химия. Том 2 / П. Эткинс – М.: Мир, 1980. – 584с.
479. Пономаренко, А.Г. Термодинамика металлургических шлаков с учетом их электронного строения: диссертация ... доктора технических наук: 05.16.02. Металлургия черных металлов- М.: МИСиС, 1976. – 263с.

480. Латаш, Ю.В. Электрошлаковый переплав / Ю.В. Латаш, Б.И. Медовар – М.: Металлургия, 1970. – 240с.
481. Дакуорт, У.Э. Электрошлаковый переплав / У.Э. Дакуорт, Дж. Хойл. Пер. с англ. А.Б. Парцевского – М.: Металлургия, 1973. – 192с.
482. Nafziger, R.H. The electroslag melting process (Bulletin 669) / R.H. Nafziger, A. Mitchell, R.L. Lincoln et all. – Washington, United States Bureau of Mines. 1976. – 219p.
483. Nakamura, Y. Refining of 18%Cr-8%Ni Steel with Ca-CaF₂ Solution / Y. Nakamura, N. Tokumitsu, K. Harashima, K. Segswa // Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan – 1976, Vol.16, Iss.11. – P.623–627.
484. Тарлов, О.В. Особенности электрошлакового переплава металлов под активными флюсами: автореферат диссертации ... кандидата технических наук: 05.16.02. Металлургия черных, цветных и редких металлов- Донецк, ДПИ, 1991. – 18с.
485. Iwasaki, S. Production of Super-low Phosphorus Stainless Steel by Cold Crucible Levitation Melting / S. Iwasaki, K. Sakuraya, A. Fukuzawa // Tetsu-to-Hagane – 2002, Vol.88, Iss.7. – P.413–418.
486. Григоренко, Г.М. Растворимость азота во флюсах для электрошлаковых технологий / Г.М. Григоренко, Р.В. Козин // Современная электрометаллургия – 2018, №2(131) – С.37–40.
487. Суперсплавы II: Жаропрочные материалы для аэрокосмических и промышленных энергоустановок / Под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля. Пер. с англ. Редактор русского издания: Р.Е. Шалин. Книга 2. – М.: Metallurg, 1995. – 384с.
488. Donachie, M.J. Superalloys: a technical guide / M. Donachie, Jr., S. Donachie. 2-nd ed. - ASM International, Materials Park, Ohio, USA, 2002. – 408p.
489. Линчевский, Б.В. Вакуумная индукционная плавка – М.: Металлургия, 1975. – 240с.

490. ASM Handbook: Casting. Volume 15 / ASM International. Handbook Committee and S. Lampman, C. Moosbrugger, E. DeGuire, and American Society for Metals – ASM International, 2008. – 1238p.
491. Mitchell, A. Nitrogen in superalloys / A. Mitchell // High Temperature Materials and Processes – 2005, Vol.24, Iss.2. – P.101–109.
492. Moshtaghi, M. Effect of vacuum degree in VIM furnace on mechanical properties of Ni–Fe–Cr based alloy / M. Moshtaghi, S. Abbasi // Transactions of Nonferrous Metals Society of China – 2012, vol.22, iss.9 – P.2124–2130.
493. Walker, J.C.G. Evolution of the atmosphere – New York: Macmillan, 1977 – 318p.
494. Кодак, А.В. Удаление водорода из стали в процессе электрошлакового переплава. – Дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Донецк, 1985. – 141с.
495. Кондратьев, А.И. Расчет предельных содержаний азота в легированных сталях / А.И. Кондратьев, С.М. Гнучев // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия – 1968, т.11, №3. – С.56–61.
496. Иванов, Б.С. Расчет допустимого предела легирования стали азотом / Б.С. Иванов, А.И. Кондратьев, И.А. Томилин // Известия АН СССР. Металлы – 1973, №2. – С.173–178.
497. Смирнов, Л.А. Исследование физико-химических характеристик распавов коррозионностойких сталей, легированных азотом / Л.А. Смирнов, А.Г. Гудов, С.П. Бурмасов, А.С. Орыщенко, Г.Ю. Калинин // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия – 2020, т.63, №9. – С.679–685.
498. Dub, V.S. Electroslag Remelting Technology for Contemporary Engineering. Retrospection and New Possibilities / V.S. Dub, L.Ya. Levkov, D.A. Shurygin et al. // Metallurgist – 2018, vol. 62, iss.5–6. – P.511–520.
499. Levkov, L.Ya. Oxidation of Chromium in Oxide–Fluoride Slags for Electroslag Remelting / L.Ya. Levkov, D.A. Shurygin, V.S. Dub et al. // Steel in Translation – 2018, vol.48, iss.12. – P.766–772.
500. Способ производства стали в электродуговой печи / Д.А. Пономаренко, А.Г. Пономаренко, И.В. Деревянченко и др. – Патент Российской Федерации

- №2165463 от 20.04.2001. – Изобретения, полезные модели. – Бюллетень №7, 2002. (20.11.2002).
501. Способ обработки стали / Д.А. Пономаренко, А.Г. Пономаренко, И.В. Деревянченко и др. – Патент Российской Федерации №2171296 от 27.07.2001.
502. Способ выплавки стали в дуговой электросталеплавильной печи / С.Г. Журавлев С.Г., Никонов С.В., Попов О.В. - Патент Российской Федерации на изобретение RU 2543658 С1, опубликовано 10.03.2015.
503. Пономаренко, А.Г. Технология выплавки стали с низким содержанием азота в сверхмощной ДСП / А.Г. Пономаренко, Е.Л. Корзун, А.В. Гальченко и др. // Современные проблемы электрометаллургии стали: Материалы XI Международной конференции – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – С.81.
504. Korzun, E. Conditions of obtaining steels with low and adjustable content of nitrogen in electric arc furnaces / E. Korzun, A. Ponomarenko, Y. Kostetsky, A. Kodak // Proceedings 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking 2012 (ICS 2012), Dresden, Oct. 1-3. 2012 – CD-ROM - Paper ID: 1255.
505. Синяков, Р.В. Совершенствование выплавки стали с повышенной долей жидкого чугуна в шахтной печи ОАО "Северсталь" // Р.В. Синяков, Е.Л. Корзун, Д.А. Пономаренко и др. // Современные проблемы электрометаллургии стали. Материалы XV Международной научной конференции. Часть вторая – Челябинск, Издательский центр ЮУрГУ, 2013. – С.3–7.
506. Киссельман, М.А. Исследование влияния скорости электрошлакового переплава и энергетического режима на качество слитков из стали ЧС82 // М.А. Киссельман, А.В. Лазуткин, Л.Я. Левков и др. // XXIII Нижегородская сессия молодых ученых (технические, естественные, математические науки): материалы докладов. Том I / Отв. за выпуск И.А. Зверева – Княгинино: НГИЭУ, 2018. – С.47–48.

507. Erickson, G.L. The Development and Application of CM 718 Premium SQ for Critical Cast Structural Components / G.L. Erickson, K. Harris, R.E. Schwer – Cannon-Muskegon Corporation P.O, Box 506 Muskegon, MI 49443, USA, 1984. – 10p. – Режим доступа: <https://cannonmuskegon.com/wp-content/uploads/2015/02/DEVELOP-MENT-AND-APPLICATIONS-OF-CM-718-PREMIUM-SQ-FOR-CRITICAL-CAST-STRUCTURAL-COMPONENTS.pdf>. – Загл. с экрана (по состоянию на 08.06.2021).
508. Guo, X.L. Effect of nitrogen content on the microstructure and mechanical properties of a cast nickel-base superalloy / X.L. Guo, J.B. Yu, X.F. Li, Y. Hou, Z.M. Ren // *Ironmaking & Steelmaking* – 2018, v.45, No.3. – P.215–223.
509. Бояршинов, В.А. Рафинирующие переплавы в вакууме / В.А. Бояршинов, Ал.Г. Шалимов, А.И. Щербаков, И. Пертман, И. Неядлы – М.: Metallurgy, 1979. – 304с.
510. Korzun, E.L. Influence of the composition of high-temperature nickel- alloy electrodes on the ingot composition in vacuum arc remelting / E.L. Korzun, V.V. Klochai, A.D. Ryabtsev // *Steel in Translation* – 2016, vol.46, iss.8. – P.576–582.
511. Demchenko, A.I. Improving Cylindrical Inconel 718 Ingots Produced at PAO Ruspolimet / A.I. Demchenko, E.L. Korzun, E.A. Chernyshov // *Steel in Translation* – 2019, vol.49, iss.4. – P.223–227.
512. Разливочное устройство, предназначенное для регулирования скорости разливки металла из промковша в вакуумно-индукционной печи / А.И. Демченко, Е.Л. Корзун, А.В. Бурда и др. – Патент Российской Федерации на изобретение RU 2691021 С2. Приоритет изобретения от 07 ноября 2017г. Зарегистрирован 07.06.2019.
513. Гаврилов, Г.Н. Металловедческие проблемы повышения технологичности и комплекса физико-механических свойств изделий из высоколегированных никелевых сплавов / Г.Н. Гаврилов, Ю.В. Воробьева, А.А. Генералов, Е.Л. Корзун // *Материалы III Международной научно-практической конференции "Современные технологии в машиностроении и литейном*

- производстве", сборник трудов конференции – Чебоксары: Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, 2017 – 380с. – С.180–184.
514. Шурыгин, Д.А. Новые технологические возможности ЭШП при производстве материалов для атомного машиностроения /Д.А. Шурыгин, Л.Я. Левков, М.А. Киссельман и др. // Прочность неоднородных структур – ПРОСТ 2018. Сборник тезисов докладов IX Евразийской научно-практической конференции 24–26 апреля 2018 г., Москва – М.: Издательство: ООО "Студио-Принт", 2018 – С.168.
515. Демченко, А.И. Разливка жаропрочных никелевых сплавов в вакуумной индукционной печи с применением пенокерамических фильтров / А.И. Демченко, В.Ф. Шевяков, В.А. Коровин и др. // XV Международный конгресс сталеплавильщиков: сборник трудов – М.: ООО "РПК ПринтАП", 2018. – С.220–224.
516. Корзун, Е.Л. О критических конструктивных параметрах для обеспечения вакуумно-индукционной выплавки жаропрочных никелевых сплавов высокого качества / Е.Л. Корзун, В.В. Клочай // Международная научная конференция «Физико-химические основы металлургических процессов», имени академика А.М. Самарина. Москва. 25–28 ноября 2019 г. Сборник материалов. – М.: ИМЕТ РАН, 2019. – С.92.

ПРИЛОЖЕНИЕ А.

**СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ СТАЛИ 08X18H5Г12АБ (ННЗБ)**

План машинного эксперимента по моделированию фазового равновесия стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) и результаты моделирования представлены в табл. А.1.

Таблица А.1. Результаты машинного эксперимента моделирования фазовых равновесий стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) в пакете прикладных программ

Thermo-Calc

| № экспериментал | Исходные условия эксперимента - химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Температура ликвидус | Температура солидус |
|-----------------|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|----------------------|---------------------|
| | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | | |
| 1 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1391 | 1357 |
| 2 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1392 | 1347 |
| 3 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1387 | 1353 |
| 4 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1385 | 1344 |
| 5 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1398 | 1356 |
| 6 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1387 | 1347 |
| 7 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1386 | 1354 |
| 8 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1380 | 1345 |
| 9 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1393 | 1345 |
| 10 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1388 | 1338 |
| 11 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1388 | 1343 |
| 12 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1379 | 1334 |
| 13 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1393 | 1347 |
| 14 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1388 | 1338 |
| 15 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1382 | 1342 |
| 16 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1383 | 1333 |
| 17 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1382 | 1347 |
| 18 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1384 | 1339 |
| 19 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1377 | 1345 |
| 20 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1375 | 1335 |
| 21 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1389 | 1350 |
| 22 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1378 | 1339 |
| 23 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1378 | 1343 |
| 24 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1372 | 1336 |
| 25 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1384 | 1338 |
| 26 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1380 | 1328 |
| 27 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1379 | 1332 |
| 28 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1371 | 1324 |
| 29 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1385 | 1337 |
| 30 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1381 | 1328 |

| № эксперимента | Исходные условия эксперимента - химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Температура ликвидус | Температура солидус |
|----------------|---|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|-------------------------|------------------------|
| | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | | |
| 31 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1373 | 1333 |
| 32 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1373 | 1323 |
| 33 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1394 | 1351 |
| 34 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1391 | 1341 |
| 35 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1391 | 1347 |
| 36 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1377 | 1338 |
| 37 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1396 | 1350 |
| 38 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1387 | 1339 |
| 39 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1383 | 1348 |
| 40 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1384 | 1337 |
| 41 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1389 | 1337 |
| 42 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1391 | 1328 |
| 43 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1386 | 1335 |
| 44 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1378 | 1325 |
| 45 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1396 | 1340 |
| 46 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1382 | 1329 |
| 47 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1383 | 1334 |
| 48 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1379 | 1326 |
| 49 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1387 | 1341 |
| 50 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1383 | 1333 |
| 51 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1383 | 1340 |
| 52 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1369 | 1329 |
| 53 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1388 | 1344 |
| 54 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1379 | 1332 |
| 55 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1374 | 1338 |
| 56 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1376 | 1328 |
| 57 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1382 | 1330 |
| 58 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1383 | 1319 |
| 59 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1378 | 1325 |
| 60 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1369 | 1315 |
| 61 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1389 | 1329 |
| 62 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1375 | 1320 |
| 63 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1374 | 1325 |
| 64 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1371 | 1315 |
| 65 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1389 | 1355 |
| 66 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1390 | 1346 |
| 67 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1384 | 1349 |
| 68 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1384 | 1342 |
| 69 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1392 | 1353 |
| 70 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1387 | 1345 |
| 71 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1385 | 1352 |
| 72 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1379 | 1342 |
| 73 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1391 | 1344 |
| 74 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1386 | 1337 |
| 75 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1385 | 1342 |

| № эксперимента | Исходные условия эксперимента - химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Температура ликвидус | Температура солидус |
|----------------|---|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|-------------------------|------------------------|
| | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | | |
| 76 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1378 | 1332 |
| 77 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1387 | 1345 |
| 78 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1388 | 1336 |
| 79 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1382 | 1340 |
| 80 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1382 | 1334 |
| 81 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1382 | 1346 |
| 82 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1382 | 1337 |
| 83 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1381 | 1347 |
| 84 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1374 | 1333 |
| 85 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1383 | 1347 |
| 86 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1377 | 1338 |
| 87 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1377 | 1342 |
| 88 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1371 | 1334 |
| 89 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1383 | 1337 |
| 90 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1377 | 1327 |
| 91 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1377 | 1331 |
| 92 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1371 | 1323 |
| 93 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1380 | 1335 |
| 94 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1380 | 1327 |
| 95 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1372 | 1332 |
| 96 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1372 | 1323 |
| 97 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1393 | 1349 |
| 98 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1380 | 1339 |
| 99 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1380 | 1344 |
| 100 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1376 | 1336 |
| 101 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1384 | 1347 |
| 102 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1386 | 1338 |
| 103 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1381 | 1346 |
| 104 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1375 | 1335 |
| 105 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1388 | 1337 |
| 106 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1383 | 1328 |
| 107 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1375 | 1334 |
| 108 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1376 | 1324 |
| 109 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1384 | 1338 |
| 110 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1381 | 1328 |
| 111 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1382 | 1334 |
| 112 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1372 | 1325 |
| 113 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1386 | 1340 |
| 114 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1372 | 1330 |
| 115 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1371 | 1337 |
| 116 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1368 | 1327 |
| 117 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1377 | 1341 |
| 118 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1378 | 1330 |
| 119 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1373 | 1336 |
| 120 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1368 | 1326 |

| № эксперимента | Исходные условия эксперимента - химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Температура ликвидус | Температура солидус |
|----------------|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|----------------------|---------------------|
| | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | | |
| 121 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 1381 | 1329 |
| 122 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 1373 | 1319 |
| 123 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 1367 | 1323 |
| 124 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 1368 | 1314 |
| 125 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 1377 | 1328 |
| 126 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 1373 | 1319 |
| 127 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 1374 | 1325 |
| 128 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 1362 | 1314 |

Примечание: содержание алюминия в стали во всех экспериментах оставалось постоянным 0,05% масс.

Результаты моделирования были проанализированы в программе STATISTICA с целью получения регрессионных уравнений, описывающих влияние химического состава стали на температуру ликвидус и температуру солидус. Метод статистического анализа – множественная регрессия стандартным способом. Результаты статистического анализа приведены в табл.А.2–А.3.

Таблица А.2. Результат множественной регрессии стандартным методом влияния изменения химического состава стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) и температуры ликвидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc

| Множественный коэффициент корреляции R= 0,96299 Множественный коэффициент детерминации R ² = 0,9274 Скорректированный множественный коэффициент детерминации R ² = 0,9212 Значение критерия Фишера F(10,117)=149,37 p<0,0000; Стандартная ошибка оценки: 2,0716 | | | | | | |
|---|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| N=128 | БЕТА | Ст.Ош. | В | Ст.Ош. | t(221) | p-знач. |
| Св.член | | | 1532,738 | 6,17163 | 248,3520 | 0,000000 |
| Углерод | -0,338081 | 0,024917 | -82,813 | 6,10342 | -13,5682 | 0,000000 |
| Кремний | -0,493301 | 0,024917 | -12,083 | 0,61034 | -19,7976 | 0,000000 |
| Сера | -0,055284 | 0,024917 | -28,017 | 12,62776 | -2,2187 | 0,028437 |
| Фосфор | -0,140336 | 0,024917 | -51,563 | 9,15513 | -5,6321 | 0,000000 |
| Марганец | -0,597490 | 0,024917 | -4,391 | 0,18310 | -23,9790 | 0,000000 |
| Хром | -0,208377 | 0,024917 | -2,042 | 0,24414 | -8,3628 | 0,000000 |
| Никель | -0,282798 | 0,024917 | -4,156 | 0,36621 | -11,3495 | 0,000000 |
| Азот | -0,172230 | 0,024917 | -36,161 | 5,23150 | -6,9121 | 0,000000 |
| Ванадий | -0,017010 | 0,024917 | -1,667 | 2,44137 | -0,6827 | 0,496160 |
| Ниобий | -0,191367 | 0,024917 | -9,375 | 1,22068 | -7,6801 | 0,000000 |

Примечание: здесь и далее в аналогичных таблицах-результатах красным цветом выделены значимые параметры множественной регрессии, черным цветом – не значимые параметры.

Значимое влияние на температуру ликвидус стали оказывает изменение концентрации углерода, кремния, серы, фосфора, марганца, хрома, никеля, азота и ниобия, при этом характер влияния этих компонентов обратно пропорциональный. Изменение содержание ванадия оказывает незначимое влияние на температуру ликвидус стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), характер влияния – обратно пропорциональный. Стандартная ошибка прогноза температуры ликвидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.А.2) составляет $\pm 2,1^{\circ}\text{C}$. Регрессионная зависимость температуры ликвидус от химического состава стали имеет значимый характер.

Таблица А.3. Результат множественной регрессии стандартным методом влияния изменения химического состава стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) и температуры солидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc

| Множественный коэффициент корреляции $R = 0,98802297$ Множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,97618939$ Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9741543$ Значение критерия Фишера $F(10,117) = 479,68$ $p < 0,0000$; Стандартная ошибка оценки: 1,5401 | | | | | | |
|---|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| N=128 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(221) | p-знач. |
| Св.член | | | 1511,039 | 4,588168 | 329,3338 | 0,000000 |
| Углерод | -0,474872 | 0,014266 | -151,042 | 4,537455 | -33,2878 | 0,000000 |
| Кремний | -0,209599 | 0,014266 | -6,667 | 0,453745 | -14,6925 | 0,000000 |
| Сера | -0,019650 | 0,014266 | -12,931 | 9,387838 | -1,3774 | 0,171010 |
| Фосфор | -0,576397 | 0,014266 | -275,000 | 6,806182 | -40,4044 | 0,000000 |
| Марганец | -0,465047 | 0,014266 | -4,438 | 0,136124 | -32,5990 | 0,000000 |
| Хром | -0,383173 | 0,014266 | -4,875 | 0,181498 | -26,8598 | 0,000000 |
| Никель | -0,093337 | 0,014266 | -1,781 | 0,272247 | -6,5428 | 0,000000 |
| Азот | -0,022925 | 0,014266 | -6,250 | 3,889247 | -1,6070 | 0,110751 |
| Ванадий | 0,040937 | 0,014266 | 5,208 | 1,814982 | 2,8696 | 0,004878 |
| Ниобий | 0,011462 | 0,014266 | 0,729 | 0,907491 | 0,8035 | 0,423317 |

Значимое влияние на температуру солидус стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) оказывает изменение концентрации углерода, кремния, фосфора, марганца, хрома, никеля, и ванадия, при этом увеличение содержания всех изучаемых компонентов, за исключением ванадия и ниобия, вызывает снижение температуры солидус стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ). Регрессионная зависимость температуры солидус стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) имеет значимый характер. Стандартная ошибка прогноза

температуры солидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.А.3) составляет $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$.

План машинного эксперимента и его результат по определению влияния химического состава стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) и температуры металла на растворимость азота представлен в табл. А.4.

Таблица А.4. Результаты машинного эксперимента моделирования растворимости азота в расплаве стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ) в пакете прикладных программ

Thermo-Calc

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 1 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 2 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 3 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,37 |
| 4 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,35 |
| 5 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,39 |
| 6 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 7 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,36 |
| 8 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,36 |
| 9 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,39 |
| 10 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 11 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,36 |
| 12 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,36 |
| 13 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 14 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 15 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,37 |
| 16 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,35 |
| 17 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 18 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 19 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 20 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,37 |
| 21 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 22 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 23 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,38 |
| 24 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,39 |
| 25 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,42 |
| 26 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 27 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,38 |
| 28 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,39 |
| 29 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 30 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 31 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,39 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 32 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,37 |
| 33 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 34 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 35 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 36 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,41 |
| 37 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 38 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 39 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 40 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,39 |
| 41 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 42 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 43 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 44 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,39 |
| 45 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 46 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 47 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 48 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 49 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,47 |
| 50 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 51 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,42 |
| 52 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 53 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 54 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,46 |
| 55 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,44 |
| 56 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 57 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,48 |
| 58 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 59 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,44 |
| 60 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 61 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 62 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,47 |
| 63 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,42 |
| 64 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 65 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 66 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 67 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,37 |
| 68 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,35 |
| 69 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,39 |
| 70 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,39 |
| 71 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,35 |
| 72 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,36 |
| 73 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,38 |
| 74 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,39 |
| 75 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,35 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 76 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,35 |
| 77 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 78 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 79 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,36 |
| 80 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,34 |
| 81 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 82 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 83 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 84 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,36 |
| 85 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 86 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 87 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,38 |
| 88 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,38 |
| 89 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 90 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 91 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,37 |
| 92 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,38 |
| 93 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 94 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 95 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,38 |
| 96 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,36 |
| 97 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 98 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 99 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 100 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 101 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 102 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 103 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 104 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 105 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 106 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 107 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 108 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 109 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 110 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 111 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,39 |
| 112 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 113 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 114 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,47 |
| 115 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,42 |
| 116 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 117 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,47 |
| 118 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 119 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,44 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 120 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 121 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 122 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 123 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 124 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 125 | 1600 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,46 |
| 126 | 1600 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 127 | 1600 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 128 | 1600 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 129 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 130 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 131 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 132 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,38 |
| 133 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 134 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 135 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 136 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,39 |
| 137 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 138 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 139 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 140 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,38 |
| 141 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 142 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 143 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,39 |
| 144 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,37 |
| 145 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,46 |
| 146 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 147 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 148 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,40 |
| 149 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 150 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 151 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 152 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,41 |
| 153 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 154 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 155 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 156 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,41 |
| 157 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 158 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 159 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 160 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,40 |
| 161 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,47 |
| 162 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 163 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 164 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 165 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 166 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,46 |
| 167 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 168 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,42 |
| 169 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,48 |
| 170 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 171 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 172 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 173 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 174 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,47 |
| 175 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 176 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 177 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,50 |
| 178 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 179 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 180 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,46 |
| 181 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 182 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,49 |
| 183 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,47 |
| 184 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 185 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,51 |
| 186 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 187 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 188 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 189 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 190 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,51 |
| 191 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 192 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 193 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 194 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,40 |
| 195 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,39 |
| 196 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,37 |
| 197 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 198 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 199 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,38 |
| 200 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,38 |
| 201 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,41 |
| 202 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 203 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,37 |
| 204 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,38 |
| 205 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,42 |
| 206 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,40 |
| 207 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,39 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 208 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,37 |
| 209 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 210 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 211 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 212 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,39 |
| 213 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 214 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 215 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 216 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 217 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 218 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 219 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 220 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,40 |
| 221 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 222 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 223 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 224 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,39 |
| 225 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 226 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,46 |
| 227 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 228 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 229 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,48 |
| 230 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 231 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 232 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 233 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 234 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 235 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 236 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 237 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,46 |
| 238 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 239 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 240 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 241 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 242 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,50 |
| 243 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 244 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 245 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,50 |
| 246 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 247 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 248 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 249 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 250 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,48 |
| 251 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,46 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 252 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 253 | 1550 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,49 |
| 254 | 1550 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 255 | 1550 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 256 | 1550 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 257 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,47 |
| 258 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 259 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 260 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 261 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 262 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,46 |
| 263 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 264 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 265 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 266 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 267 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,41 |
| 268 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 269 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 270 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 271 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 272 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 273 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,50 |
| 274 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 275 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 276 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 277 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 278 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,49 |
| 279 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 280 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 281 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,48 |
| 282 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 283 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 284 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,44 |
| 285 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 286 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,48 |
| 287 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 288 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 289 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,51 |
| 290 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 291 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 292 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,47 |
| 293 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 294 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,50 |
| 295 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,47 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 296 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 297 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 298 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 299 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 300 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 301 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 302 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,51 |
| 303 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,46 |
| 304 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 305 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,52 |
| 306 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 307 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 308 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,49 |
| 309 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 310 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 311 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,51 |
| 312 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 313 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |
| 314 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 315 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 316 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,48 |
| 317 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 318 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 319 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,49 |
| 320 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 321 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 322 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 323 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 324 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,39 |
| 325 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 326 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 327 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,40 |
| 328 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,41 |
| 329 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 330 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 331 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,40 |
| 332 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,40 |
| 333 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 334 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 335 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,42 |
| 336 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,40 |
| 337 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 338 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,47 |
| 339 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,49 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 340 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,42 |
| 341 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,47 |
| 342 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 343 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 344 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 345 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 346 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,48 |
| 347 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 348 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,43 |
| 349 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,48 |
| 350 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 351 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 352 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,42 |
| 353 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 354 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,50 |
| 355 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,46 |
| 356 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 357 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 358 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 359 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 360 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 361 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 362 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,49 |
| 363 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,46 |
| 364 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 365 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,49 |
| 366 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 367 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 368 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,46 |
| 369 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 370 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 371 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,48 |
| 372 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 373 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |
| 374 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 375 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 376 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,47 |
| 377 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 378 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 379 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,50 |
| 380 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 381 | 1500 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,52 |
| 382 | 1500 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 383 | 1500 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 384 | 1500 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,48 |
| 385 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,50 |
| 386 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 387 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 388 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 389 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 390 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,50 |
| 391 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 392 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 393 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,49 |
| 394 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 395 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 396 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 397 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 398 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,47 |
| 399 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 400 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,43 |
| 401 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 402 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 403 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 404 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,46 |
| 405 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 406 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,51 |
| 407 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,47 |
| 408 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 409 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 410 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 411 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 412 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,48 |
| 413 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 414 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,51 |
| 415 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,48 |
| 416 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 417 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 418 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 419 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 420 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,51 |
| 421 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 422 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,52 |
| 423 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,51 |
| 424 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 425 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 426 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 427 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 428 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,48 |
| 429 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 430 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |
| 431 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,50 |
| 432 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 433 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,51 |
| 434 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 435 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 436 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |
| 437 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 438 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 439 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 440 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 441 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |
| 442 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 443 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 444 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,51 |
| 445 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 446 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 447 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 448 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 4,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 449 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 450 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,46 |
| 451 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 452 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 453 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,48 |
| 454 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,44 |
| 455 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 456 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 457 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 458 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,48 |
| 459 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,43 |
| 460 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,43 |
| 461 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,49 |
| 462 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 463 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,44 |
| 464 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,42 |
| 465 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 466 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,50 |
| 467 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |
| 468 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 469 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,51 |
| 470 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 471 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |

| № эксперимента | Температура жидкого металла, град Цельсия | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 08X18H5Г12АБ (ННЗБ), % масс. | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле, % масс. |
|----------------|---|--|---------|-------|--------|----------|------|--------|------|---------|--------|--|
| | | Углерод | Кремний | Сера | Фосфор | Марганец | Хром | Никель | Азот | Ванадий | Ниобий | |
| 472 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,47 |
| 473 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 474 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |
| 475 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,46 |
| 476 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 477 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 478 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 479 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 480 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 18 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 481 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 482 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,51 |
| 483 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,49 |
| 484 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 485 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 486 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 487 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 488 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,48 |
| 489 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 490 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,52 |
| 491 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,50 |
| 492 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 493 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 494 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,45 |
| 495 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 496 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 11,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,49 |
| 497 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,45 |
| 498 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 499 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 500 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 501 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,51 |
| 502 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,44 |
| 503 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 504 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,005 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,51 |
| 505 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 1,1 | 0,44 |
| 506 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 0,8 | 0,52 |
| 507 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 1,1 | 0,52 |
| 508 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,001 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 0,8 | 0,44 |
| 509 | 1450 | 0,02 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,2 | 0,8 | 0,52 |
| 510 | 1450 | 0,08 | 0,2 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,2 | 1,1 | 0,45 |
| 511 | 1450 | 0,02 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,45 | 0,35 | 0,8 | 0,45 |
| 512 | 1450 | 0,08 | 0,8 | 0,03 | 0,045 | 13,5 | 19,5 | 5,5 | 0,52 | 0,35 | 1,1 | 0,52 |

Метод статистического анализа – множественная регрессия с последовательным включением параметров влияния. Результаты статистического анализа приведены в табл.А.5.

Таблица А.5. Результат множественной регрессии методом с последовательным включением параметров влияния на растворимость азота в стали 08Х18Н5Г12АБ (ННЗБ), рассчитанной в программе Thermo-Calc.

| Множественный коэффициент корреляции $R=0,8624$ | | | | | | |
|---|-----------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| Множественный коэффициент детерминации $R^2=0,7437$ | | | | | | |
| Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2=0,7396$ | | | | | | |
| Значение критерия Фишера $F(8,503)=182,42$ $p<0,0000$; | | | | | | |
| Стандартная ошибка оценки: 0,02017 | | | | | | |
| N=512 | БЕТА | Ст.Ош. | В | Ст.Ош. | t(221) | p-знач. |
| Св.член | | | 0,5820 | 0,036460 | 15,9629 | 0,000000 |
| Температура, град Цельсия | -0,604661 | 0,022574 | -4,2703E-04 | 0,000016 | -26,7855 | 0,000000 |
| Хром | 0,420015 | 0,022574 | 0,0221 | 0,001188 | 18,6060 | 0,000000 |
| Кремний | -0,339871 | 0,022574 | -0,0447 | 0,002971 | -15,0557 | 0,000000 |
| Марганец | 0,241917 | 0,022574 | 0,0096 | 0,000891 | 10,7165 | 0,000000 |
| Ниобий | 0,125164 | 0,022574 | 0,0329 | 0,005941 | 5,5445 | 0,000000 |
| Углерод | -0,084597 | 0,022574 | -0,1113 | 0,029707 | -3,7475 | 0,000199 |
| Никель | -0,064808 | 0,022574 | -0,0051 | 0,001782 | -2,8709 | 0,004266 |
| Фосфор | -0,024241 | 0,022574 | -0,0479 | 0,044561 | -1,0738 | 0,283408 |

Значимое влияние на растворимость азота в жидкой стали 08Х18Н5Г12АБ (ННЗБ) оказывает изменение температуры и изменение концентраций следующих компонентов по мере снижения влияния: хром, кремний, марганец, ниобий, углерод и никель, при этом характер влияния хрома, марганца и ниобия прямо пропорциональный, а температуры, кремния, углерода, никеля и фосфора – обратно пропорциональный. Стандартная ошибка прогноза растворимости азота по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.А.5) составляет $\pm 0,02017$ % масс. Регрессионная зависимость растворимости азота в стали 08Х18Н5Г12АБ (ННЗБ) имеет значимый характер.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.
СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ СТАЛИ 12Х18АГ18

План машинного эксперимента, представляющий трёхфакторный дробный факторный план вида 3^{**}(9-5), по моделированию фазового равновесия стали 12Х18АГ18 и результаты моделирования представлены в табл. Б.1.

Таблица Б.1 – Результаты машинного эксперимента моделирования фазовых равновесий стали 12Х18АГ18 в пакете прикладных программ Thermo-Calc

| № экс-та | Исходные условия экспериментов – химический состав стали 12Х18АГ18, % масс. | | | | | | | | | Результат экспериментов, градусы Цельсия | | | |
|----------|---|-----|-------|-------|-----|------|------|-------|-------|--|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| | C | Si | Mn | Cr | N | Ni | V | S | P | Температура ликвидус | Равновесная температура солидус | Неравновесная температура солидус | T ₁ |
| 1 | 0,02 | 0,2 | 17,5 | 17,5 | 0,5 | 0,05 | 0,01 | 0,001 | 0,007 | 1386,11 | 1348,442 | 1231,93 | 1556 |
| 2 | 0,02 | 0,2 | 17,5 | 18,75 | 0,7 | 0,5 | 0,05 | 0,001 | 0,026 | 1386,11 | 1333,001 | 1231,93 | 1401 |
| 3 | 0,02 | 0,2 | 17,5 | 20 | 0,6 | 0,25 | 0,1 | 0,001 | 0,045 | 1395,29 | 1390 | 1233,73 | 1548 |
| 4 | 0,02 | 0,2 | 18,75 | 17,5 | 0,7 | 0,25 | 0,1 | 0,01 | 0,026 | 1382,03 | 1380 | 1227,22 | 1336 |
| 5 | 0,02 | 0,2 | 18,75 | 18,75 | 0,6 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,045 | 1391,24 | 1390 | 1195,86 | 1525 |
| 6 | 0,02 | 0,2 | 18,75 | 20 | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,01 | 0,007 | 1399,96 | 1390 | 1192,65 | 1694 |
| 7 | 0,02 | 0,2 | 20 | 17,5 | 0,6 | 0,5 | 0,05 | 0,005 | 0,045 | 1383,01 | 1380 | 1195,51 | 1488 |
| 8 | 0,02 | 0,2 | 20 | 18,75 | 0,5 | 0,25 | 0,1 | 0,005 | 0,007 | 1395,54 | 1390 | 1191,61 | 1666 |
| 9 | 0,02 | 0,2 | 20 | 20 | 0,7 | 0,05 | 0,01 | 0,005 | 0,026 | 1382,57 | 1380 | 1194,29 | 1513 |
| 10 | 0,02 | 0,5 | 17,5 | 17,5 | 0,5 | 0,25 | 0,05 | 0,005 | 0,026 | 1395,62 | 1390 | 1195,06 | 1519 |
| 11 | 0,02 | 0,5 | 17,5 | 18,75 | 0,7 | 0,05 | 0,1 | 0,005 | 0,045 | 1382,97 | 1380 | 1195,94 | 1321 |
| 12 | 0,02 | 0,5 | 17,5 | 20 | 0,6 | 0,5 | 0,01 | 0,005 | 0,007 | 1390,97 | 1390 | 1191,51 | 1522 |
| 13 | 0,02 | 0,5 | 18,75 | 17,5 | 0,7 | 0,5 | 0,01 | 0,001 | 0,045 | 1374,21 | 1371,462 | 1195,33 | 1331 |
| 14 | 0,02 | 0,5 | 18,75 | 18,75 | 0,6 | 0,25 | 0,05 | 0,001 | 0,007 | 1385,35 | 1380 | 1212,38 | 1494 |
| 15 | 0,02 | 0,5 | 18,75 | 20 | 0,5 | 0,05 | 0,1 | 0,001 | 0,026 | 1395,27 | 1390 | 1215,65 | 1665 |
| 16 | 0,02 | 0,5 | 20 | 17,5 | 0,6 | 0,05 | 0,1 | 0,01 | 0,007 | 1380,13 | 1380 | 1207,66 | 1464 |
| 17 | 0,02 | 0,5 | 20 | 18,75 | 0,5 | 0,5 | 0,01 | 0,01 | 0,026 | 1385,47 | 1380 | 1212,4 | 1632 |
| 18 | 0,02 | 0,5 | 20 | 20 | 0,7 | 0,25 | 0,05 | 0,01 | 0,045 | 1373,13 | 1370 | 1219,35 | 1479 |
| 19 | 0,02 | 0,8 | 17,5 | 17,5 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 0,01 | 0,045 | 1386,22 | 1380 | 1220,93 | 1481 |
| 20 | 0,02 | 0,8 | 17,5 | 18,75 | 0,7 | 0,25 | 0,01 | 0,01 | 0,007 | 1376,92 | 1370 | 1207,89 | 1316 |
| 21 | 0,02 | 0,8 | 17,5 | 20 | 0,6 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,026 | 1386,28 | 1380 | 1211,49 | 1495 |
| 22 | 0,02 | 0,8 | 18,75 | 17,5 | 0,7 | 0,05 | 0,05 | 0,005 | 0,007 | 1371,9 | 1370 | 1202,71 | 1319 |
| 23 | 0,02 | 0,8 | 18,75 | 18,75 | 0,6 | 0,5 | 0,1 | 0,005 | 0,026 | 1376,98 | 1370 | 1206,7 | 1458 |
| 24 | 0,02 | 0,8 | 18,75 | 20 | 0,5 | 0,25 | 0,01 | 0,005 | 0,045 | 1388,25 | 1380 | 1212,38 | 1634 |
| 25 | 0,02 | 0,8 | 20 | 17,5 | 0,6 | 0,25 | 0,01 | 0,001 | 0,026 | 1371,66 | 1370 | 1203 | 1433 |
| 26 | 0,02 | 0,8 | 20 | 18,75 | 0,5 | 0,05 | 0,05 | 0,001 | 0,045 | 1381,45 | 1380 | 1207,24 | 1604 |
| 27 | 0,02 | 0,8 | 20 | 20 | 0,7 | 0,5 | 0,1 | 0,001 | 0,007 | 1368,42 | 1360 | 1188,85 | 1449 |
| 28 | 0,07 | 0,2 | 17,5 | 17,5 | 0,6 | 0,5 | 0,01 | 0,01 | 0,026 | 1386,89 | 1380 | 1227,04 | 1425 |

| № экс-та | Исходные условия экспериментов – химический состав стали 12X18AG18, % масс. | | | | | | | | | Результат экспериментов, градусы Цельсия | | | |
|----------|---|-----|-------|-------|-----|------|------|-------|-------|--|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| | C | Si | Mn | Cr | N | Ni | V | S | P | Температура ликвидус | Равновесная температура солидус | Неравновесная температура солидус | T ₁ |
| 29 | 0,07 | 0,2 | 17,5 | 18,75 | 0,5 | 0,25 | 0,05 | 0,01 | 0,045 | 1395,64 | 1390 | 1224,14 | 1599 |
| 30 | 0,07 | 0,2 | 17,5 | 20 | 0,7 | 0,05 | 0,1 | 0,01 | 0,007 | 1385,68 | 1380 | 1223,56 | 1450 |
| 31 | 0,07 | 0,2 | 18,75 | 17,5 | 0,5 | 0,05 | 0,1 | 0,005 | 0,045 | 1391,33 | 1390 | 1221,52 | 1569 |
| 32 | 0,07 | 0,2 | 18,75 | 18,75 | 0,7 | 0,5 | 0,01 | 0,005 | 0,007 | 1377,35 | 1380 | 1221,35 | 1420 |
| 33 | 0,07 | 0,2 | 18,75 | 20 | 0,6 | 0,25 | 0,05 | 0,005 | 0,026 | 1386,73 | 1380 | 1220,95 | 1568 |
| 34 | 0,07 | 0,2 | 20 | 17,5 | 0,7 | 0,25 | 0,05 | 0,001 | 0,007 | 1374,67 | 1380 | 1218,58 | 1392 |
| 35 | 0,07 | 0,2 | 20 | 18,75 | 0,6 | 0,05 | 0,1 | 0,001 | 0,026 | 1382,3 | 1380 | 1217,8 | 1540 |
| 36 | 0,07 | 0,2 | 20 | 20 | 0,5 | 0,5 | 0,01 | 0,001 | 0,045 | 1387,94 | 1380 | 1216,69 | 1388 |
| 37 | 0,07 | 0,5 | 17,5 | 17,5 | 0,6 | 0,05 | 0,05 | 0,001 | 0,045 | 1382,76 | 1380 | 1224,45 | 1397 |
| 38 | 0,07 | 0,5 | 17,5 | 18,75 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 0,001 | 0,007 | 1391,72 | 1390 | 1214,91 | 1566 |
| 39 | 0,07 | 0,5 | 17,5 | 20 | 0,7 | 0,25 | 0,01 | 0,001 | 0,026 | 1377,95 | 1370 | 1220,92 | 1421 |
| 40 | 0,07 | 0,5 | 18,75 | 17,5 | 0,5 | 0,25 | 0,01 | 0,01 | 0,007 | 1385,54 | 1380 | 1211,72 | 1539 |
| 41 | 0,07 | 0,5 | 18,75 | 18,75 | 0,7 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,026 | 1372,85 | 1370 | 1217,32 | 1393 |
| 42 | 0,07 | 0,5 | 18,75 | 20 | 0,6 | 0,5 | 0,1 | 0,01 | 0,045 | 1378,23 | 1370 | 1218,39 | 1531 |
| 43 | 0,07 | 0,5 | 20 | 17,5 | 0,7 | 0,5 | 0,1 | 0,005 | 0,026 | 1364,87 | 1364,847 | 1214,5 | 1353 |
| 44 | 0,07 | 0,5 | 20 | 18,75 | 0,6 | 0,25 | 0,01 | 0,005 | 0,045 | 1373,3 | 1370 | 1216,4 | 1508 |
| 45 | 0,07 | 0,5 | 20 | 20 | 0,5 | 0,05 | 0,05 | 0,005 | 0,007 | 1386,58 | 1380 | 1205,21 | 1686 |
| 46 | 0,07 | 0,8 | 17,5 | 17,5 | 0,6 | 0,25 | 0,1 | 0,005 | 0,007 | 1377,62 | 1370,543 | 1209,72 | 1339 |
| 47 | 0,07 | 0,8 | 17,5 | 18,75 | 0,5 | 0,05 | 0,01 | 0,005 | 0,026 | 1386,49 | 1380 | 1212,55 | 1573 |
| 48 | 0,07 | 0,8 | 17,5 | 20 | 0,7 | 0,5 | 0,05 | 0,005 | 0,045 | 1370,01 | 1370 | 1218,76 | 1387 |
| 49 | 0,07 | 0,8 | 18,75 | 17,5 | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,001 | 0,026 | 1377,22 | 1370 | 1209,13 | 1502 |
| 50 | 0,07 | 0,8 | 18,75 | 18,75 | 0,7 | 0,25 | 0,1 | 0,001 | 0,045 | 1365,11 | 1366,71 | 1215,52 | 1331 |
| 51 | 0,07 | 0,8 | 18,75 | 20 | 0,6 | 0,05 | 0,01 | 0,001 | 0,007 | 1377,58 | 1370 | 1200,36 | 1514 |
| 52 | 0,07 | 0,8 | 20 | 17,5 | 0,7 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,045 | 1360,24 | 1360 | 1212,83 | 1325 |
| 53 | 0,07 | 0,8 | 20 | 18,75 | 0,6 | 0,5 | 0,05 | 0,01 | 0,007 | 1367,68 | 1360 | 1196,28 | 1477 |
| 54 | 0,07 | 0,8 | 20 | 20 | 0,5 | 0,25 | 0,1 | 0,01 | 0,026 | 1378,51 | 1370 | 1200,7 | 1649 |
| 55 | 0,12 | 0,2 | 17,5 | 17,5 | 0,7 | 0,25 | 0,01 | 0,005 | 0,045 | 1376,16 | 1376,166 | 1222,88 | 1333 |
| 56 | 0,12 | 0,2 | 17,5 | 18,75 | 0,6 | 0,05 | 0,05 | 0,005 | 0,007 | 1386,67 | 1380 | 1217,8 | 1479 |
| 57 | 0,12 | 0,2 | 17,5 | 20 | 0,5 | 0,5 | 0,1 | 0,005 | 0,026 | 1391,86 | 1390 | 1211,83 | 1645 |
| 58 | 0,12 | 0,2 | 18,75 | 17,5 | 0,6 | 0,5 | 0,1 | 0,001 | 0,007 | 1378,54 | 1379,548 | 1215,64 | 1440 |
| 59 | 0,12 | 0,2 | 18,75 | 18,75 | 0,5 | 0,25 | 0,01 | 0,001 | 0,026 | 1387,5 | 1388,501 | 1210,84 | 1620 |
| 60 | 0,12 | 0,2 | 18,75 | 20 | 0,7 | 0,05 | 0,05 | 0,001 | 0,045 | 1374,41 | 1370 | 1216,13 | 1465 |
| 61 | 0,12 | 0,2 | 20 | 17,5 | 0,5 | 0,05 | 0,05 | 0,01 | 0,026 | 1382,66 | 1380 | 1210,1 | 1589 |
| 62 | 0,12 | 0,2 | 20 | 18,75 | 0,7 | 0,5 | 0,1 | 0,01 | 0,045 | 1365,64 | 1360 | 1214,83 | 1587 |
| 63 | 0,12 | 0,2 | 20 | 20 | 0,6 | 0,25 | 0,01 | 0,01 | 0,007 | 1378,25 | 1370 | 1209,46 | 1587 |
| 64 | 0,12 | 0,5 | 17,5 | 17,5 | 0,7 | 0,5 | 0,05 | 0,01 | 0,007 | 1373,29 | 1370 | 1214,79 | 1314 |
| 65 | 0,12 | 0,5 | 17,5 | 18,75 | 0,6 | 0,25 | 0,1 | 0,01 | 0,026 | 1378,35 | 1370 | 1214,88 | 1431 |
| 66 | 0,12 | 0,5 | 17,5 | 20 | 0,5 | 0,05 | 0,01 | 0,01 | 0,045 | 1387,56 | 1380 | 1210,35 | 1620 |
| 67 | 0,12 | 0,5 | 18,75 | 17,5 | 0,6 | 0,05 | 0,01 | 0,005 | 0,026 | 1373,62 | 1370 | 1212,84 | 1417 |
| 68 | 0,12 | 0,5 | 18,75 | 18,75 | 0,5 | 0,5 | 0,05 | 0,005 | 0,045 | 1378,66 | 1370 | 1208,03 | 1582 |
| 69 | 0,12 | 0,5 | 18,75 | 20 | 0,7 | 0,25 | 0,1 | 0,005 | 0,007 | 1369,3 | 1370 | 1209,18 | 1434 |
| 70 | 0,12 | 0,5 | 20 | 17,5 | 0,5 | 0,25 | 0,1 | 0,001 | 0,045 | 1374,03 | 1370 | 1207,38 | 1550 |
| 71 | 0,12 | 0,5 | 20 | 18,75 | 0,7 | 0,05 | 0,01 | 0,001 | 0,007 | 1364,3 | 1360 | 1207,05 | 1411 |

| № экс-та | Исходные условия экспериментов – химический состав стали 12X18AG18, % масс. | | | | | | | | | Результат экспериментов, градусы Цельсия | | | |
|----------|---|-----|-------|-------|-----|------|------|-------|-------|--|---------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| | C | Si | Mn | Cr | N | Ni | V | S | P | Температура ликвидус | Равновесная температура солидус | Неравновесная температура солидус | T ₁ |
| 72 | 0,12 | 0,5 | 20 | 20 | 0,6 | 0,5 | 0,05 | 0,001 | 0,026 | 1369,83 | 1370 | 1207,4 | 1550 |
| 73 | 0,12 | 0,8 | 17,5 | 17,5 | 0,7 | 0,05 | 0,1 | 0,001 | 0,026 | 1369,73 | 1370 | 1211,38 | 1295 |
| 74 | 0,12 | 0,8 | 17,5 | 18,75 | 0,6 | 0,5 | 0,01 | 0,001 | 0,045 | 1370,32 | 1370 | 1214,11 | 1412 |
| 75 | 0,12 | 0,8 | 17,5 | 20 | 0,5 | 0,25 | 0,05 | 0,001 | 0,007 | 1383,46 | 1380 | 1202,96 | 1589 |
| 76 | 0,12 | 0,8 | 18,75 | 17,5 | 0,6 | 0,25 | 0,05 | 0,01 | 0,045 | 1364,98 | 1363,251 | 1211,76 | 1381 |
| 77 | 0,12 | 0,8 | 18,75 | 18,75 | 0,5 | 0,05 | 0,1 | 0,01 | 0,007 | 1377,47 | 1370 | 1200,18 | 1558 |
| 78 | 0,12 | 0,8 | 18,75 | 20 | 0,7 | 0,5 | 0,01 | 0,01 | 0,026 | 1360,68 | 1360 | 1206,62 | 1405 |
| 79 | 0,12 | 0,8 | 20 | 17,5 | 0,5 | 0,5 | 0,01 | 0,005 | 0,007 | 1367,91 | 1360 | 1198,91 | 1521 |
| 80 | 0,12 | 0,8 | 20 | 18,75 | 0,7 | 0,25 | 0,05 | 0,005 | 0,026 | 1355,75 | 1352,282 | 1204,03 | 1377 |
| 81 | 0,12 | 0,8 | 20 | 20 | 0,6 | 0,05 | 0,1 | 0,005 | 0,045 | 1365,71 | 1360 | 1203,49 | 1523 |

Примечание: T₁ – температура расплава, при которой весь исходный азот находится в растворе металла.

Результаты моделирования были проанализированы в программе STATISTICA с целью получения регрессионных уравнений, описывающих влияние изменения содержания нормируемых компонентов стали на указанные выше параметры. Метод статистического анализа – множественная регрессии стандартным способом и способом последовательного включения параметром влияния. Результаты статистического анализа приведены в табл.Б.2–Б.6.

Значимое влияние на температуру ликвидус стали 12X18AG18 оказывает изменение концентраций следующих компонентов по мере снижения влияния: азота, кремния, углерода, марганца, хрома, никеля и фосфор, при этом характер влияния изменения содержания хрома прямо пропорциональный, а изменения концентрации азота, кремния, углерода, никеля и фосфора – обратно пропорциональный. Стандартная ошибка прогноза температуры ликвидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.Б.2) составляет $\pm 2,07^\circ\text{C}$. Регрессионная зависимость температуры ликвидус от химического состава стали имеет значимый характер.

Таблица Б.2. Результат множественной регрессии методом последовательного включения параметров влияния изменения химического состава стали 12X18AG18 и температуры ликвидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc (линейная зависимость)

| Множественный коэффициент корреляции $R=0,9776$ Множественный коэффициент детерминации $R^2=0,9558$ Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2=0,9515$ Значение критерия Фишера $F(7,73)=225,3$ $p<0,0000$; Стандартная ошибка оценки: 2,0923 | | | | | | |
|---|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| N=81 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(73) | p-знач. |
| Св.член | | | 1477,835 | 6,33281 | 233,3615 | 0,000000 |
| Азот | -0,591957 | 0,024618 | -68,467 | 2,84732 | -24,0460 | 0,000000 |
| Кремний | -0,492385 | 0,024618 | -18,983 | 0,94911 | -20,0013 | 0,000000 |
| Углерод | -0,426564 | 0,024618 | -98,674 | 5,69464 | -17,3275 | 0,000000 |
| Марганец | -0,379620 | 0,024618 | -3,513 | 0,22779 | -15,4206 | 0,000000 |
| Хром | 0,156043 | 0,024618 | 1,444 | 0,22779 | 6,3386 | 0,000000 |
| Никель | -0,090301 | 0,024618 | -4,632 | 1,26288 | -3,6681 | 0,000461 |
| Фосфор | -0,065821 | 0,024618 | -40,068 | 14,98589 | -2,6737 | 0,009250 |

Таблица Б.3. Результат множественной регрессии методом последовательного включения параметров влияния изменения химического состава стали 12X18AG18 и температуры ликвидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc (степенная зависимость)

| Множественный коэффициент корреляции $R=0,9969$ Множественный коэффициент детерминации $R^2=0,9939$ Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2=0,9932$ Значение критерия Фишера $F(8,72)=1467,5$ $p<0,0000$; Стандартная ошибка оценки: 1,1413 | | | | | | |
|--|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| N=81 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(72) | p-знач. |
| Св.член | | | 1545,03 | 3,4822 | 443,6970 | 0,000000 |
| Фосфор | -0,468621 | 0,044577 | -416,33 | 39,6029 | -10,5127 | 0,000000 |
| Углерод | -0,553800 | 0,045562 | -186,96 | 15,3817 | -12,1549 | 0,000000 |
| Хром | -0,424565 | 0,009201 | -5,73 | 0,1243 | -46,1426 | 0,000000 |
| Марганец | -0,377391 | 0,009201 | -5,10 | 0,1243 | -41,0156 | 0,000000 |
| Кремний | -0,177725 | 0,009201 | -10,00 | 0,5177 | -19,3155 | 0,000000 |
| Азот | 0,031815 | 0,009201 | 5,37 | 1,5532 | 3,4577 | 0,000918 |
| $([\%P])^2$ | -0,153429 | 0,044577 | -2564,89 | 745,1931 | -3,4419 | 0,000966 |
| $([\%C])^2$ | 0,050183 | 0,045562 | 118,52 | 107,6059 | 1,1014 | 0,274385 |

Значимое влияние на температуру ликвидус стали 12X18AG18 оказывает изменение концентраций следующих компонентов по мере снижения влияния:

азота, кремния, углерода, марганца, хрома, никеля и фосфор, при этом характер влияния изменения содержания хрома прямо пропорциональный, а изменения концентрации азота, кремния, углерода, никеля и фосфора – обратно пропорциональный. Стандартная ошибка прогноза температуры ликвидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.Б.3) составляет $\pm 2,07^{\circ}\text{C}$. Регрессионная зависимость температуры ликвидус от химического состава стали имеет значимый характер.

Таблица Б.4. Результат множественной регрессии методом последовательного включения параметров влияния изменения химического состава стали 12X18AГ18 и температуры солидус (равновесная), рассчитанной в программе Thermo-Calc

| Множественный коэффициент корреляции $R = 0,9969$ | | | | | | |
|---|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9939$ | | | | | | |
| Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9932$ | | | | | | |
| Значение критерия Фишера $F(8,72) = 1467,5$ $p < 0,0000$; | | | | | | |
| Стандартная ошибка оценки: 1,1413 | | | | | | |
| N=81 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(72) | p-знач. |
| Св.член | | | 1545,03 | 3,4822 | 443,6970 | 0,000000 |
| Фосфор | -0,468621 | 0,044577 | -416,33 | 39,6029 | -10,5127 | 0,000000 |
| Углерод | -0,553800 | 0,045562 | -186,96 | 15,3817 | -12,1549 | 0,000000 |
| Хром | -0,424565 | 0,009201 | -5,73 | 0,1243 | -46,1426 | 0,000000 |
| Марганец | -0,377391 | 0,009201 | -5,10 | 0,1243 | -41,0156 | 0,000000 |
| Кремний | -0,177725 | 0,009201 | -10,00 | 0,5177 | -19,3155 | 0,000000 |
| Азот | 0,031815 | 0,009201 | 5,37 | 1,5532 | 3,4577 | 0,000918 |
| $([\%P])^2$ | -0,153429 | 0,044577 | -2564,89 | 745,1931 | -3,4419 | 0,000966 |
| $([\%C])^2$ | 0,050183 | 0,045562 | 118,52 | 107,6059 | 1,1014 | 0,274385 |

Значимое влияние на равновесную температуру солидус стали 12X18AГ18 оказывает следующие факторы, перечисленные в порядке снижения влияния: изменение концентрации фосфора, углерода, хрома, марганца, кремния, азота, концентрация фосфора во второй степени. Характер влияния перечисленных факторов обратно пропорциональный за исключением изменения концентрации азота, для которого характер влияния прямо пропорциональный. Изменение содержание углерода во второй степени оказывает незначимое влияние на равновесную температуру солидус стали 12X18AГ18. Стандартная ошибка прогноза равновесной температуры солидус по регрессионной зависимости

согласно результатам (табл.Б.4) составляет $\pm 1,14^{\circ}\text{C}$. Регрессионная зависимость равновесной температуры солидус от химического состава стали имеет значимый характер.

Таблица Б.5. Результат множественной регрессии методом последовательного включения параметров влияния изменения химического состава стали 12X18AГ18 и неравновесной температуры солидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc

| Множественный коэффициент корреляции $R = 0,6575$ | | | | | | |
|---|----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,4323$ | | | | | | |
| Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,3778$ | | | | | | |
| Значение критерия Фишера $F(7,73) = 7,9405$ $p < 0,0000$; | | | | | | |
| Стандартная ошибка оценки: 7,8540 | | | | | | |
| N=81 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(73) | p-знач. |
| Св.член | | | 1280,83 | 23,8583 | 53,68484 | 0,000000 |
| Марганец | -0,36044 | 0,088188 | -3,49 | 0,8550 | -4,08714 | 0,000111 |
| Кремний | -0,34439 | 0,088188 | -13,91 | 3,5627 | -3,90522 | 0,000208 |
| Фосфор | 0,22779 | 0,088188 | 145,30 | 56,2525 | 2,58303 | 0,011796 |
| Азот | 0,11726 | 0,088188 | 14,21 | 10,6880 | 1,32963 | 0,187779 |
| Углерод | 1,59520 | 0,436684 | 386,66 | 105,8488 | 3,65297 | 0,000485 |
| $([\%C])^2$ | -1,51385 | 0,436684 | -2567,04 | 740,4852 | -3,46670 | 0,000887 |
| Хром | -0,10950 | 0,088188 | -1,06 | 0,8550 | -1,24162 | 0,218353 |

Значимое влияние на неравновесную температуру солидус стали 12X18AГ18 оказывает (по мере уменьшения степени влияния) изменение концентрации марганца, кремния, фосфора, азота, углерода, концентрации углерода во второй степени и хрома. Увеличение содержания всех марганца, кремния и концентрации углерода во второй степени вызывает снижение неравновесной температуры солидус стали 12X18AГ18. Влияние изменения концентраций фосфора, азота и углерода имеет прямо пропорциональное влияние на неравновесную температуру солидус. Регрессионная зависимость температуры солидус стали 12X18AГ18 имеет значимый характер. Стандартная ошибка прогноза температуры солидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.Б.5) составляет $\pm 7,85^{\circ}\text{C}$.

Влияние различных факторов на растворимость азота в жидкой стали 12X18AГ18 оценивали по температуре T_1 , при которой из металла прекращал выделяться азот с уровня, заданного исходными условиями эксперимента.

Статистическая обработка результатов машинного эксперимента по температуре T_1 в зависимости от исходного состава стали 12X18AG18 приведены в табл.Б.6.

Таблица Б.6. Результат множественной регрессии методом с последовательным включением параметров влияния на растворимость азота в стали 12X18AG18, рассчитанной в программе Thermo-Calc

| Множественный коэффициент корреляции $R = 0,8937$ Множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,7987$ Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,7853$ Значение критерия Фишера $F(5,75) = 59,533$ $p < 0,0000$; Стандартная ошибка оценки: 0,0381 | | | | | | |
|--|----------|----------|-------------------|----------|----------|----------|
| N=81 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(75) | p-знач. |
| Св.член | | | 0,9130 | 0,111957 | 8,1549 | 0,000000 |
| Температура T_1 , град Цельсия | -1,03718 | 0,060116 | -8,235E-04 | 0,000048 | -17,2529 | 0,000000 |
| Хром | 0,42743 | 0,057421 | 0,0342 | 0,004594 | 7,4438 | 0,000000 |
| Кремний | -0,22507 | 0,053419 | -0,0750 | 0,017806 | -4,2133 | 0,000069 |
| Марганец | 0,19930 | 0,053074 | 0,0159 | 0,004246 | 3,7551 | 0,000340 |
| Сера | 0,06271 | 0,051929 | 1,3906 | 1,151606 | 1,2076 | 0,231014 |

Значимое влияние на растворимость азота в жидкой стали 12X18AG18 в пределах изменения концентраций компонентов, ограниченных требованиями ТУ-24.00.4821-89, оказывает изменение температуры и изменение концентраций следующих компонентов по мере снижения влияния: хром, кремний, марганец и сера. Характер влияния хрома, марганца и серы прямо пропорциональный, а температуры и кремния – обратно пропорциональный. Влияние только одного из перечисленных факторов является незначимым – изменение содержания серы. Стандартная ошибка прогноза растворимости азота по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.Б.6) составляет $\pm 0,0381$ % масс. Регрессионная зависимость растворимости азота в стали 12X18AG18 имеет значимый характер.

ПРИЛОЖЕНИЕ В.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО РАВНОВЕСИЯ СТАЛИ 04X20H6Г11M2АФБ

План машинного эксперимента, представляющий трёхуровневый дробный факторный план вида 3^{**}(9-4), по моделированию фазового равновесия стали 04X20H6Г11M2АФБ и результаты моделирования представлены в табл. В.1.

Таблица В.1. Результаты машинного эксперимента моделирования фазовых равновесий стали 04X20H6Г11M2АФБ в пакете прикладных программ

Thermo-Calc

| № эксперимента | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 04X20H6Г11M2АФБ, % масс. | | | | | | | | | Результат эксперимента, градус Цельсия | | |
|----------------|--|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|--|---------------------|-----------------------------------|
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | Температура ликвидус | Температура солидус | Температура солидус неравновесный |
| 1 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1401 | 1358 | 1276 |
| 2 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1397 | 1350 | 1274 |
| 3 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1395 | 1350 | 1271 |
| 4 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1397 | 1352 | 1277 |
| 5 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1396 | 1347 | 1274 |
| 6 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1394 | 1350 | 1270 |
| 7 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1395 | 1348 | 1277 |
| 8 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1383 | 1349 | 1273 |
| 9 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1391 | 1342 | 1270 |
| 10 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1393 | 1345 | 1267 |
| 11 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1395 | 1352 | 1272 |
| 12 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1392 | 1348 | 1268 |
| 13 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1391 | 1347 | 1265 |
| 14 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1392 | 1345 | 1272 |
| 15 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1390 | 1344 | 1268 |
| 16 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1395 | 1343 | 1267 |
| 17 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1391 | 1345 | 1272 |
| 18 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1389 | 1345 | 1269 |
| 19 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1389 | 1343 | 1264 |
| 20 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1388 | 1342 | 1261 |
| 21 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1390 | 1347 | 1266 |
| 22 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1391 | 1344 | 1265 |
| 23 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1387 | 1344 | 1262 |
| 24 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1387 | 1340 | 1266 |
| 25 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1389 | 1344 | 1264 |

| № экс- пери- мента | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 04X20H6Г11M2АФБ, % масс. | | | | | | | | | Результат эксперимента, градус Цельсия | | |
|--------------------------|---|--------------|---------------|------|--------|----------|---------|--------|------|---|-----------------------------|---|
| | Углерод | Крем- ний | Марга- нец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | Темпера- тура ликвидус | Темпера- тура солидус | Темпера- тура солидус неравно- весный |
| 26 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1383 | 1338 | 1262 |
| 27 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1386 | 1337 | 1267 |
| 28 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1397 | 1351 | 1273 |
| 29 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1395 | 1352 | 1269 |
| 30 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1397 | 1355 | 1274 |
| 31 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1396 | 1350 | 1273 |
| 32 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1392 | 1346 | 1269 |
| 33 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1394 | 1351 | 1275 |
| 34 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1398 | 1349 | 1273 |
| 35 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1393 | 1343 | 1270 |
| 36 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1394 | 1350 | 1275 |
| 37 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1393 | 1349 | 1270 |
| 38 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1391 | 1349 | 1265 |
| 39 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1391 | 1345 | 1262 |
| 40 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1394 | 1346 | 1272 |
| 41 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1391 | 1348 | 1268 |
| 42 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1387 | 1342 | 1266 |
| 43 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1391 | 1348 | 1270 |
| 44 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1388 | 1340 | 1268 |
| 45 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1386 | 1338 | 1264 |
| 46 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1389 | 1346 | 1260 |
| 47 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1389 | 1344 | 1267 |
| 48 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1388 | 1340 | 1263 |
| 49 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1385 | 1338 | 1260 |
| 50 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1387 | 1341 | 1266 |
| 51 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1385 | 1342 | 1262 |
| 52 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1383 | 1339 | 1259 |
| 53 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1386 | 1340 | 1265 |
| 54 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1382 | 1336 | 1263 |
| 55 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1393 | 1350 | 1266 |
| 56 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1395 | 1351 | 1272 |
| 57 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1393 | 1351 | 1267 |
| 58 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1395 | 1348 | 1267 |
| 59 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1394 | 1351 | 1273 |
| 60 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1391 | 1344 | 1270 |
| 61 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1392 | 1345 | 1266 |
| 62 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1391 | 1346 | 1272 |
| 63 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1389 | 1345 | 1269 |
| 64 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1391 | 1349 | 1263 |
| 65 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1389 | 1342 | 1262 |

| № экс- пери- мента | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс. | | | | | | | | | Результат эксперимента, градус Цельсия | | |
|--------------------------|---|--------------|---------------|------|--------|----------|---------|--------|------|---|-----------------------------|---|
| | Углерод | Крем- ний | Марга- нец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | Темпера- тура ликвидус | Темпера- тура солидус | Темпера- тура солидус неравно- весный |
| 66 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1391 | 1346 | 1268 |
| 67 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1388 | 1344 | 1265 |
| 68 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1386 | 1342 | 1261 |
| 69 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1389 | 1344 | 1267 |
| 70 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1386 | 1340 | 1264 |
| 71 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1385 | 1339 | 1260 |
| 72 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1385 | 1342 | 1268 |
| 73 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1388 | 1345 | 1263 |
| 74 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1387 | 1341 | 1258 |
| 75 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1383 | 1339 | 1254 |
| 76 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1386 | 1342 | 1262 |
| 77 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1382 | 1340 | 1259 |
| 78 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1381 | 1335 | 1254 |
| 79 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1387 | 1339 | 1264 |
| 80 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1382 | 1337 | 1259 |
| 81 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1380 | 1336 | 1254 |
| 82 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1398 | 1352 | 1268 |
| 83 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1395 | 1345 | 1265 |
| 84 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1397 | 1350 | 1271 |
| 85 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1394 | 1346 | 1269 |
| 86 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1393 | 1345 | 1265 |
| 87 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1395 | 1348 | 1270 |
| 88 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1398 | 1343 | 1268 |
| 89 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1393 | 1345 | 1264 |
| 90 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1392 | 1343 | 1270 |
| 91 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1394 | 1348 | 1266 |
| 92 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1393 | 1346 | 1262 |
| 93 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1389 | 1343 | 1259 |
| 94 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1394 | 1348 | 1267 |
| 95 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1390 | 1342 | 1264 |
| 96 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1389 | 1337 | 1261 |
| 97 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1390 | 1340 | 1267 |
| 98 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1388 | 1338 | 1264 |
| 99 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1386 | 1339 | 1260 |
| 100 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1388 | 1340 | 1256 |
| 101 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1390 | 1340 | 1262 |
| 102 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1388 | 1343 | 1259 |
| 103 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1385 | 1337 | 1256 |
| 104 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1388 | 1342 | 1262 |
| 105 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1385 | 1335 | 1259 |

| № экс- пери- мента | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс. | | | | | | | | | Результат эксперимента, градус Цельсия | | |
|--------------------------|---|--------------|---------------|------|--------|----------|---------|--------|------|---|-----------------------------|---|
| | Углерод | Крем- ний | Марга- нец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | Темпера- тура ликвидус | Темпера- тура солидус | Темпера- тура солидус неравно- весный |
| 106 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1384 | 1335 | 1255 |
| 107 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1384 | 1336 | 1262 |
| 108 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1383 | 1335 | 1258 |
| 109 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1395 | 1346 | 1263 |
| 110 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1397 | 1351 | 1269 |
| 111 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1393 | 1349 | 1265 |
| 112 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1396 | 1348 | 1264 |
| 113 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1395 | 1344 | 1270 |
| 114 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1393 | 1344 | 1267 |
| 115 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1392 | 1342 | 1264 |
| 116 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1392 | 1344 | 1270 |
| 117 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1391 | 1343 | 1266 |
| 118 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1392 | 1343 | 1263 |
| 119 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1390 | 1341 | 1259 |
| 120 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1392 | 1347 | 1265 |
| 121 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1390 | 1343 | 1262 |
| 122 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1389 | 1340 | 1258 |
| 123 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1389 | 1342 | 1265 |
| 124 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1388 | 1340 | 1262 |
| 125 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1385 | 1337 | 1259 |
| 126 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1387 | 1338 | 1265 |
| 127 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1390 | 1343 | 1261 |
| 128 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1386 | 1339 | 1258 |
| 129 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1385 | 1339 | 1252 |
| 130 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1386 | 1340 | 1261 |
| 131 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1385 | 1336 | 1257 |
| 132 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1383 | 1335 | 1252 |
| 133 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1388 | 1337 | 1260 |
| 134 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1383 | 1338 | 1257 |
| 135 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1381 | 1330 | 1254 |
| 136 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1395 | 1349 | 1269 |
| 137 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1393 | 1347 | 1264 |
| 138 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1392 | 1344 | 1260 |
| 139 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1394 | 1345 | 1268 |
| 140 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1392 | 1344 | 1263 |
| 141 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1388 | 1342 | 1259 |
| 142 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1391 | 1346 | 1268 |
| 143 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1388 | 1340 | 1264 |
| 144 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1386 | 1339 | 1259 |
| 145 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1389 | 1342 | 1255 |

| № экс- пери- мента | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс. | | | | | | | | | Результат эксперимента, градус Цельсия | | |
|--------------------------|---|--------------|---------------|------|--------|----------|---------|--------|------|---|-----------------------------|---|
| | Углерод | Крем- ний | Марга- нец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | Темпера- тура ликвидус | Темпера- тура солидус | Темпера- тура солидус неравно- весный |
| 146 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1389 | 1345 | 1263 |
| 147 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1388 | 1341 | 1257 |
| 148 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1386 | 1338 | 1256 |
| 149 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1389 | 1342 | 1262 |
| 150 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1386 | 1341 | 1257 |
| 151 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1389 | 1339 | 1255 |
| 152 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1387 | 1339 | 1262 |
| 153 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1384 | 1335 | 1259 |
| 154 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1385 | 1340 | 1253 |
| 155 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1383 | 1339 | 1248 |
| 156 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1384 | 1339 | 1255 |
| 157 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1385 | 1337 | 1254 |
| 158 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1381 | 1333 | 1251 |
| 159 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1383 | 1337 | 1257 |
| 160 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1381 | 1336 | 1254 |
| 161 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1379 | 1330 | 1250 |
| 162 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1381 | 1334 | 1257 |
| 163 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1395 | 1345 | 1258 |
| 164 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1396 | 1349 | 1265 |
| 165 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1395 | 1345 | 1261 |
| 166 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1394 | 1340 | 1259 |
| 167 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1395 | 1343 | 1265 |
| 168 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1393 | 1344 | 1261 |
| 169 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1391 | 1340 | 1259 |
| 170 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1393 | 1342 | 1265 |
| 171 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1390 | 1338 | 1262 |
| 172 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1392 | 1341 | 1258 |
| 173 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1391 | 1342 | 1254 |
| 174 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1392 | 1341 | 1260 |
| 175 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1391 | 1340 | 1257 |
| 176 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1387 | 1336 | 1254 |
| 177 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1389 | 1340 | 1260 |
| 178 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1387 | 1337 | 1258 |
| 179 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1386 | 1333 | 1254 |
| 180 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1388 | 1338 | 1259 |
| 181 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1389 | 1339 | 1257 |
| 182 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1387 | 1338 | 1253 |
| 183 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1386 | 1335 | 1248 |
| 184 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1387 | 1336 | 1257 |
| 185 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1385 | 1335 | 1252 |

| № экс- пери- мента | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс. | | | | | | | | | Результат эксперимента, градус Цельсия | | |
|--------------------------|---|--------------|---------------|------|--------|----------|---------|--------|------|---|-----------------------------|---|
| | Углерод | Крем- ний | Марга- нец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | Темпера- тура ликвидус | Темпера- тура солидус | Темпера- тура солидус неравно- весный |
| 186 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1382 | 1333 | 1249 |
| 187 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1388 | 1338 | 1256 |
| 188 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1383 | 1330 | 1253 |
| 189 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1381 | 1328 | 1249 |
| 190 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1397 | 1346 | 1265 |
| 191 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1396 | 1346 | 1261 |
| 192 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1392 | 1342 | 1257 |
| 193 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1395 | 1345 | 1265 |
| 194 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1391 | 1342 | 1261 |
| 195 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1390 | 1339 | 1256 |
| 196 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1392 | 1341 | 1265 |
| 197 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1390 | 1339 | 1261 |
| 198 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1388 | 1338 | 1256 |
| 199 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1389 | 1340 | 1253 |
| 200 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1392 | 1342 | 1259 |
| 201 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1390 | 1340 | 1254 |
| 202 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1387 | 1337 | 1253 |
| 203 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1389 | 1342 | 1259 |
| 204 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1387 | 1337 | 1254 |
| 205 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1390 | 1336 | 1252 |
| 206 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1387 | 1336 | 1259 |
| 207 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1385 | 1334 | 1255 |
| 208 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1387 | 1339 | 1251 |
| 209 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1384 | 1334 | 1247 |
| 210 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1386 | 1338 | 1253 |
| 211 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1385 | 1334 | 1252 |
| 212 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1383 | 1332 | 1248 |
| 213 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1386 | 1335 | 1254 |
| 214 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1383 | 1331 | 1211 |
| 215 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1381 | 1329 | 1247 |
| 216 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1381 | 1332 | 1255 |
| 217 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1393 | 1344 | 1259 |
| 218 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1391 | 1342 | 1253 |
| 219 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1393 | 1347 | 1260 |
| 220 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1390 | 1343 | 1259 |
| 221 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1389 | 1339 | 1253 |
| 222 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1390 | 1343 | 1260 |
| 223 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1392 | 1339 | 1257 |
| 224 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1386 | 1337 | 1255 |
| 225 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1389 | 1337 | 1261 |

| № экс- пери- мента | Исходные условия эксперимента – химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс. | | | | | | | | | Результат эксперимента, градус Цельсия | | |
|--------------------------|---|--------------|---------------|------|--------|----------|---------|--------|------|---|-----------------------------|---|
| | Углерод | Крем- ний | Марга- нец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | Темпера- тура ликвидус | Темпера- тура солидус | Темпера- тура солидус неравно- весный |
| 226 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1391 | 1342 | 1257 |
| 227 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1387 | 1340 | 1253 |
| 228 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1385 | 1339 | 1245 |
| 229 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1387 | 1340 | 1257 |
| 230 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1386 | 1335 | 1253 |
| 231 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1384 | 1334 | 1248 |
| 232 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1386 | 1336 | 1257 |
| 233 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1384 | 1335 | 1253 |
| 234 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1381 | 1330 | 1248 |
| 235 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1384 | 1333 | 1244 |
| 236 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1386 | 1337 | 1252 |
| 237 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1382 | 1334 | 1247 |
| 238 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1381 | 1332 | 1244 |
| 239 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1383 | 1333 | 1252 |
| 240 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1381 | 1332 | 1247 |
| 241 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1378 | 1329 | 1245 |
| 242 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1380 | 1333 | 1251 |
| 243 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1379 | 1328 | 1245 |

Описательная статистика массива данных табл.В.1 приведена в табл.В.2.

Таблица В.2. Описательная статистика исходных данных и результатов термодинамического моделирования

| Переменная | Количество экспери- ментов | Среднее значение | Минимум | Максимум | Стандартное отклонение. |
|---|----------------------------------|---------------------|----------|----------|----------------------------|
| Углерод, % масс. | 243 | 0,020 | 0,001 | 0,040 | 0,015956 |
| Кремний, % масс. | 243 | 0,233 | 0,100 | 0,400 | 0,124979 |
| Марганец, % масс. | 243 | 11,000 | 10,000 | 12,000 | 0,818182 |
| Хром, % масс. | 243 | 19,000 | 18,500 | 19,500 | 0,409091 |
| Никель, % масс. | 243 | 7,250 | 6,500 | 8,000 | 0,613636 |
| Молибден, % масс. | 243 | 1,450 | 1,200 | 1,700 | 0,204545 |
| Ванадий, % масс. | 243 | 0,150 | 0,100 | 0,200 | 0,040909 |
| Ниобий, % масс. | 243 | 0,150 | 0,100 | 0,200 | 0,040909 |
| Азот, % масс. | 243 | 0,490 | 0,450 | 0,530 | 0,032727 |
| Температура ликвидус, градус Цельсия | 243 | 1388,914 | 1378,000 | 1401,000 | 4,545993 |
| Равновесная температура солидус, градус Цельсия | 243 | 1341,309 | 1328,000 | 1358,000 | 5,501259 |
| Неравновесная температура солидус, градус Цельсия | 243 | 1260,840 | 1211,000 | 1277,000 | 7,827885 |

Результаты моделирования были проанализированы в программе STATISTICA с целью получения регрессионных уравнений, описывающих влияние изменения содержания нормируемых компонентов стали 04X20H6Г11M2АФБ на температуру ликвидус, равновесную температуру солидус и неравновесную температуру солидус. Метод статистического анализа – множественная регрессии стандартным способом и способом последовательного включения параметром влияния. Результаты статистического анализа приведены в табл.В.3–В.6.

Таблица В.3. Результат множественной регрессии стандартным методом влияния изменения химического состава стали 04X20H6Г11M2АФБ и температуры ликвидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc (линейная зависимость)

| Множественный коэффициент корреляции $R = 0,9734$ | | | | | | |
|---|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9476$ | | | | | | |
| Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9456$ | | | | | | |
| Значение критерия Фишера $F(9,233) = 468,22$ $p < 0,0000$; | | | | | | |
| Стандартная ошибка оценки: 1,0605 | | | | | | |
| N=243 | БЕТА | Ст.Ош. | В | Ст.Ош. | t(233) | p-знач. |
| Св.член | | | 1540,953 | 3,597476 | 428,3428 | 0,000000 |
| Марганец | -0,755466 | 0,014996 | -4,198 | 0,083320 | -50,3786 | 0,000000 |
| Хром | -0,342182 | 0,014996 | -3,802 | 0,166639 | -22,8185 | 0,000000 |
| Кремний | -0,316378 | 0,014996 | -11,508 | 0,545455 | -21,0978 | 0,000000 |
| Никель | -0,217752 | 0,014996 | -1,613 | 0,111093 | -14,5209 | 0,000000 |
| Молибден | -0,217752 | 0,014996 | -4,840 | 0,333279 | -14,5209 | 0,000000 |
| Углерод | -0,193346 | 0,014996 | -55,085 | 4,272337 | -12,8934 | 0,000000 |
| Азот | -0,126652 | 0,014996 | -17,593 | 2,082993 | -8,4458 | 0,000000 |
| Ниобий | -0,087767 | 0,014996 | -9,753 | 1,666394 | -5,8528 | 0,000000 |
| Ванадий | -0,061104 | 0,014996 | -6,790 | 1,666394 | -4,0747 | 0,000063 |

Значимое влияние на температуру ликвидус стали 04X20H6Г11M2АФБ оказывает изменение концентраций всех нормируемых компонентов стали, при этом характер влияния изменения их обратно пропорциональный. Стандартная ошибка прогноза температуры ликвидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.В.3) составляет $\pm 1,06^\circ\text{C}$. Регрессионная зависимость температуры ликвидус от химического состава стали имеет значимый характер.

Таблица В.4. Результат множественной регрессии методом последовательного включения параметров влияния изменения химического состава стали 04X20H6Г11М2АФБ и равновесной температуры солидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc (линейная зависимость)

| Множественный коэффициент корреляции $R = 0,9816$ | | | | | | |
|---|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9636$ | | | | | | |
| Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2 = 0,9624$ | | | | | | |
| Значение критерия Фишера $F(8,234) = 774,78$ $p < 0,0000$; | | | | | | |
| Стандартная ошибка оценки: 1,0671 | | | | | | |
| N=243 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(234) | p-знач. |
| Св.член | | | 1515,001 | 3,471020 | 436,4715 | 0,000000 |
| Марганец | -0,616939 | 0,012469 | -4,148 | 0,083836 | -49,4794 | 0,000000 |
| Углерод | -0,518578 | 0,012469 | -178,791 | 4,298805 | -41,5908 | 0,000000 |
| Хром | -0,406702 | 0,012469 | -5,469 | 0,167672 | -32,6181 | 0,000000 |
| Молибден | -0,249713 | 0,012469 | -6,716 | 0,335344 | -20,0274 | 0,000000 |
| Кремний | -0,164678 | 0,012469 | -7,249 | 0,548835 | -13,2074 | 0,000000 |
| Ниобий | -0,143218 | 0,012469 | -19,259 | 1,676718 | -11,4863 | 0,000000 |
| Ванадий | 0,139546 | 0,012469 | 18,765 | 1,676718 | 11,1918 | 0,000000 |
| Никель | -0,138628 | 0,012469 | -1,243 | 0,111781 | -11,1181 | 0,000000 |

Значимое влияние на равновесную температуру ликвидус стали 04X20H6Г11М2АФБ оказывает изменение концентраций следующих компонентов по мере снижения влияния: марганца, углерода, хрома, молибдена, кремния, ниобия, ванадия и никеля, при этом характер влияния изменения содержания ванадия прямо пропорциональный, а изменения концентрации остальных указанных компонентов – обратно пропорциональный. Стандартная ошибка прогноза температуры ликвидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.В.4) составляет $\pm 1,07^\circ\text{C}$. Регрессионная зависимость равновесной температуры солидус от химического состава стали имеет значимый характер.

Значимое влияние на неравновесную температуру солидус стали 04X20H6Г11М2АФБ оказывает следующие факторы, перечисленные в порядке снижения влияния: изменение концентрации углерода, кремния, марганца и молибдена, характер влияния - обратно пропорциональный.

Таблица В.5. Результат множественной регрессии методом последовательного включения параметров влияния изменения химического состава стали 04X20H6Г11М2АФБ и неравновесной температуры солидус, рассчитанной в программе Thermo-Calc (линейная зависимость)

| Множественный коэффициент корреляции $R=0,9386$ | | | | | | |
|--|-----------|----------|-----------------|----------|----------|----------|
| Множественный коэффициент детерминации $R^2=0,88102$ | | | | | | |
| Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2=0,87902$ | | | | | | |
| Значение критерия Фишера $F(4,238)=440,58$ $p<0,0000$; | | | | | | |
| Стандартная ошибка оценки: 2,7227 | | | | | | |
| N=243 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(238) | p-знач. |
| Св.член | | | 1346,860 | 2,69507 | 499,7494 | 0,000000 |
| Углерод | -0,636555 | 0,022359 | -312,283 | 10,96888 | -28,4699 | 0,000000 |
| Кремний | -0,252160 | 0,022359 | -15,794 | 1,40041 | -11,2779 | 0,000000 |
| Марганец | -0,534221 | 0,022359 | -5,111 | 0,21392 | -23,8930 | 0,000000 |
| Молибден | -0,356147 | 0,022359 | -13,630 | 0,85567 | -15,9287 | 0,000000 |

Стандартная ошибка прогноза неравновесной температуры солидус по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.В.5) составляет $\pm 2,72^\circ\text{C}$. Регрессионная зависимость неравновесной температуры солидус от химического состава стали имеет значимый характер.

План машинного эксперимента по моделированию влияния различных факторов на растворимость азота в жидкой стали 04X20H6Г11М2АФБ при атмосферном давлении и результаты моделирования представлены в табл. В.6. Содержание азота в исходных условиях эксперимента $[\%N]_{tv}$ – это целевое значение содержания азота в указанном эксперименте, в равновесном состоянии это содержание может сохранено в жидком металле, если для существуют условия, или уменьшено за счет частичного перехода в газовую фазу.

Таблица В.6. Результаты машинного эксперимента моделирования растворимости азота в расплаве стали 04X20H6Г11М2АФБ в пакете прикладных программ Thermo-Calc

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 2 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,37 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 3 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 4 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 5 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 6 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 7 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 8 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 9 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 10 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 11 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 12 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 13 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 14 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 15 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 16 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,42 |
| 17 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 18 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 19 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 20 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 21 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 22 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,42 |
| 23 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 24 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 25 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,43 |
| 26 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,43 |
| 27 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,42 |
| 28 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 29 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,36 |
| 30 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,35 |
| 31 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 32 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 33 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 34 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 35 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 36 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 37 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 38 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 39 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 40 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 41 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 42 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 43 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 44 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,41 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 45 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 46 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 47 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 48 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 49 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,42 |
| 50 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 51 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 52 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,43 |
| 53 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,42 |
| 54 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,42 |
| 55 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 56 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,35 |
| 57 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,35 |
| 58 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 59 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,36 |
| 60 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 61 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 62 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 63 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 64 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 65 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 66 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,36 |
| 67 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 68 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 69 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 70 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 71 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 72 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 73 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 74 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 75 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 76 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 77 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 78 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 79 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 80 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 81 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 82 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 83 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 84 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,36 |
| 85 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 86 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,39 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 87 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 88 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 89 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 90 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 91 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 92 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 93 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 94 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 95 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 96 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 97 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,42 |
| 98 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,41 |
| 99 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,41 |
| 100 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 101 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 102 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 103 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,42 |
| 104 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 105 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,41 |
| 106 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,43 |
| 107 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,42 |
| 108 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,42 |
| 109 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 110 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 111 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 112 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 113 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 114 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 115 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 116 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 117 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 118 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 119 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 120 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 121 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 122 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 123 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 124 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,41 |
| 125 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,41 |
| 126 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 127 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 128 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 129 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 130 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,41 |
| 131 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 132 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 133 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,42 |
| 134 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 135 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,42 |
| 136 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,36 |
| 137 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,35 |
| 138 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,35 |
| 139 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 140 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,36 |
| 141 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,36 |
| 142 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 143 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 144 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 145 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 146 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,36 |
| 147 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,36 |
| 148 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 149 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 150 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 151 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 152 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 153 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 154 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 155 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 156 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 157 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 158 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 159 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 160 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,41 |
| 161 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,41 |
| 162 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 163 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 164 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 165 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 166 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 167 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 168 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 169 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 170 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 171 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 172 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 173 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 174 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 175 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 176 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,40 |
| 177 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 178 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,42 |
| 179 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,42 |
| 180 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 181 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 182 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 183 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 184 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,41 |
| 185 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 186 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,41 |
| 187 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,42 |
| 188 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,43 |
| 189 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,42 |
| 190 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,36 |
| 191 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,36 |
| 192 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,36 |
| 193 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 194 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 195 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 196 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 197 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 198 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 199 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 200 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 201 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,37 |
| 202 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 203 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 204 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 205 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 206 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 207 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,40 |
| 208 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 209 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 210 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,38 |
| 211 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,41 |
| 212 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,40 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 213 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,39 |
| 214 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,42 |
| 215 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,42 |
| 216 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,41 |
| 217 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,36 |
| 218 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,35 |
| 219 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,34 |
| 220 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,37 |
| 221 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 222 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 223 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 224 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 225 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 226 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 227 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 228 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,36 |
| 229 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 230 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 231 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 232 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 233 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 234 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 235 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1600 | 0,38 |
| 236 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 237 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1600 | 0,37 |
| 238 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 239 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1600 | 0,39 |
| 240 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1600 | 0,38 |
| 241 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1600 | 0,41 |
| 242 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1600 | 0,40 |
| 243 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1600 | 0,39 |
| 244 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 245 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 246 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,37 |
| 247 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 248 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 249 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 250 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 251 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 252 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 253 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 254 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,38 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 255 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 256 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 257 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 258 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 259 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,43 |
| 260 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 261 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 262 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 263 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 264 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 265 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 266 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 267 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 268 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,44 |
| 269 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,44 |
| 270 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,43 |
| 271 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 272 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,37 |
| 273 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,36 |
| 274 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 275 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 276 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 277 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 278 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 279 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 280 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 281 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 282 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 283 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 284 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 285 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 286 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 287 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 288 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 289 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 290 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 291 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 292 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,43 |
| 293 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 294 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 295 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,44 |
| 296 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,43 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 297 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,43 |
| 298 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 299 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,36 |
| 300 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,36 |
| 301 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 302 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,37 |
| 303 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 304 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 305 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 306 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 307 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 308 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 309 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,37 |
| 310 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 311 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 312 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 313 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 314 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 315 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 316 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 317 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 318 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 319 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 320 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 321 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 322 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 323 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 324 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 325 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 326 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 327 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,37 |
| 328 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 329 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 330 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 331 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 332 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 333 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 334 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 335 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 336 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 337 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 338 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,41 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 339 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 340 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,43 |
| 341 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 342 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 343 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 344 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 345 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 346 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,43 |
| 347 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 348 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 349 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,44 |
| 350 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,43 |
| 351 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,43 |
| 352 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 353 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 354 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 355 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 356 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 357 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 358 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 359 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 360 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 361 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 362 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 363 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 364 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 365 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 366 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 367 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,42 |
| 368 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,42 |
| 369 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 370 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 371 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 372 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 373 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,42 |
| 374 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 375 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 376 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,43 |
| 377 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 378 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,43 |
| 379 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,37 |
| 380 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,36 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 381 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,35 |
| 382 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 383 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,37 |
| 384 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,37 |
| 385 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 386 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 387 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 388 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 389 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,37 |
| 390 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,37 |
| 391 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 392 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 393 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 394 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 395 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 396 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 397 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 398 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 399 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 400 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 401 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 402 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 403 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 404 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 405 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 406 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 407 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 408 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 409 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 410 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 411 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 412 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 413 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 414 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 415 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 416 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 417 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 418 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 419 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 420 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,41 |
| 421 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,42 |
| 422 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,42 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 423 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 424 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 425 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 426 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 427 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,42 |
| 428 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 429 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 430 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,43 |
| 431 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,44 |
| 432 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,43 |
| 433 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,37 |
| 434 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,36 |
| 435 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,37 |
| 436 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 437 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 438 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 439 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 440 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 441 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 442 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 443 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 444 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,38 |
| 445 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 446 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 447 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 448 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 449 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 450 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 451 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 452 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,40 |
| 453 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,39 |
| 454 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,42 |
| 455 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,41 |
| 456 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,40 |
| 457 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,43 |
| 458 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 459 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,42 |
| 460 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,37 |
| 461 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,36 |
| 462 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,35 |
| 463 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,38 |
| 464 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,37 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 465 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 466 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 467 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 468 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 469 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 470 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 471 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,37 |
| 472 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 473 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 474 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 475 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 476 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 477 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 478 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1580 | 0,39 |
| 479 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 480 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1580 | 0,38 |
| 481 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 482 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1580 | 0,40 |
| 483 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1580 | 0,39 |
| 484 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1580 | 0,42 |
| 485 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 486 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1580 | 0,41 |
| 487 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 488 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 489 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 490 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 491 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 492 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 493 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 494 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 495 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 496 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 497 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 498 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 499 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 500 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 501 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 502 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,45 |
| 503 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 504 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 505 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 506 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,43 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 507 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 508 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 509 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 510 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 511 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,46 |
| 512 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,46 |
| 513 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,45 |
| 514 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 515 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 516 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,38 |
| 517 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 518 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 519 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 520 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 521 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 522 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 523 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 524 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 525 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 526 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 527 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 528 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 529 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 530 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 531 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,43 |
| 532 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 533 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 534 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 535 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 536 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,43 |
| 537 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 538 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,45 |
| 539 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,44 |
| 540 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,44 |
| 541 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,38 |
| 542 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,38 |
| 543 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,37 |
| 544 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 545 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 546 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 547 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 548 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,40 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 549 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 550 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 551 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 552 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,38 |
| 553 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 554 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 555 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 556 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 557 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 558 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 559 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 560 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 561 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 562 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 563 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 564 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 565 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 566 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 567 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 568 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 569 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 570 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,38 |
| 571 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 572 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 573 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 574 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 575 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 576 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 577 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 578 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 579 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 580 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 581 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 582 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 583 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 584 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 585 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,43 |
| 586 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 587 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 588 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 589 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 590 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,43 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 591 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,43 |
| 592 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,46 |
| 593 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,45 |
| 594 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,45 |
| 595 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 596 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,38 |
| 597 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,38 |
| 598 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 599 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 600 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 601 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,43 |
| 602 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 603 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 604 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 605 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 606 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 607 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 608 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 609 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 610 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 611 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,44 |
| 612 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 613 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 614 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 615 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 616 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 617 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 618 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 619 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 620 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 621 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,44 |
| 622 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,38 |
| 623 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,37 |
| 624 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,37 |
| 625 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 626 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 627 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 628 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 629 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 630 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 631 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 632 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,38 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 633 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,38 |
| 634 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 635 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 636 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,39 |
| 637 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 638 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 639 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 640 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 641 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 642 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,39 |
| 643 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 644 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 645 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 646 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 647 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 648 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 649 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 650 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 651 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,39 |
| 652 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 653 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 654 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 655 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,43 |
| 656 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 657 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 658 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 659 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 660 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 661 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 662 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,43 |
| 663 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 664 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,44 |
| 665 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,44 |
| 666 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 667 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 668 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 669 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 670 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,44 |
| 671 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 672 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 673 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,45 |
| 674 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 675 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,45 |
| 676 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 677 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,38 |
| 678 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,38 |
| 679 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 680 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 681 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 682 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 683 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 684 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 685 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 686 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,40 |
| 687 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,39 |
| 688 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 689 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 690 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 691 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 692 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 693 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,42 |
| 694 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,41 |
| 695 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 696 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,40 |
| 697 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 698 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,43 |
| 699 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 700 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,45 |
| 701 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 702 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,44 |
| 703 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,38 |
| 704 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,37 |
| 705 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,36 |
| 706 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,39 |
| 707 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,39 |
| 708 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,38 |
| 709 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 710 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 711 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 712 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,38 |
| 713 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,39 |
| 714 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,38 |
| 715 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 716 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,40 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 717 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,40 |
| 718 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 719 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 720 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 721 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1550 | 0,41 |
| 722 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 723 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1550 | 0,39 |
| 724 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1550 | 0,42 |
| 725 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 726 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1550 | 0,41 |
| 727 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1550 | 0,44 |
| 728 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1550 | 0,43 |
| 729 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1550 | 0,42 |
| 730 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 731 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 732 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 733 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 734 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 735 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 736 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 737 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 738 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 739 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 740 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 741 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 742 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 743 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 744 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 745 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 746 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 747 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 748 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,47 |
| 749 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 750 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 751 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 752 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 753 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 754 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,49 |
| 755 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,49 |
| 756 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,48 |
| 757 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 758 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,42 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 759 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,40 |
| 760 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 761 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 762 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 763 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 764 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 765 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 766 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 767 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 768 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 769 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 770 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 771 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 772 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,47 |
| 773 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,47 |
| 774 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,46 |
| 775 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 776 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 777 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 778 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,48 |
| 779 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,46 |
| 780 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 781 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,49 |
| 782 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,48 |
| 783 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,48 |
| 784 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 785 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,40 |
| 786 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,40 |
| 787 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 788 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 789 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 790 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 791 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 792 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 793 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 794 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 795 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,41 |
| 796 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 797 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 798 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 799 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 800 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,46 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 801 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 802 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 803 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 804 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 805 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 806 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 807 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 808 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 809 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 810 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 811 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 812 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 813 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,41 |
| 814 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 815 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 816 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 817 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 818 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 819 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 820 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 821 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 822 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 823 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 824 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 825 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 826 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,48 |
| 827 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,47 |
| 828 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,46 |
| 829 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 830 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 831 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 832 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,48 |
| 833 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,46 |
| 834 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,47 |
| 835 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,50 |
| 836 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,49 |
| 837 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,48 |
| 838 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 839 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,41 |
| 840 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,41 |
| 841 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 842 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,43 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 843 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 844 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,46 |
| 845 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 846 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 847 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 848 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 849 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 850 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 851 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 852 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 853 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,47 |
| 854 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,47 |
| 855 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 856 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 857 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 858 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 859 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,47 |
| 860 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 861 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 862 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 863 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 864 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 865 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,41 |
| 866 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,40 |
| 867 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,40 |
| 868 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 869 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 870 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 871 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 872 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 873 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 874 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 875 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,41 |
| 876 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,41 |
| 877 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 878 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 879 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 880 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 881 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 882 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 883 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 884 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,43 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 885 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 886 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 887 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 888 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 889 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,47 |
| 890 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,47 |
| 891 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 892 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 893 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 894 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,41 |
| 895 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 896 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 897 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 898 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,46 |
| 899 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 900 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 901 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 902 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 903 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 904 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 905 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,46 |
| 906 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 907 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,48 |
| 908 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,48 |
| 909 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 910 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 911 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 912 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 913 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,47 |
| 914 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,47 |
| 915 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 916 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 917 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 918 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 919 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,41 |
| 920 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,41 |
| 921 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,41 |
| 922 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 923 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 924 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 925 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 926 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 927 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 928 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 929 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,43 |
| 930 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,42 |
| 931 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 932 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 933 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 934 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 935 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 936 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 937 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,44 |
| 938 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,45 |
| 939 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,43 |
| 940 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 941 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 942 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,45 |
| 943 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,48 |
| 944 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,48 |
| 945 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,47 |
| 946 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,41 |
| 947 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,40 |
| 948 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,39 |
| 949 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 950 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 951 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,41 |
| 952 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 953 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 954 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 955 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,41 |
| 956 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,42 |
| 957 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,41 |
| 958 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 959 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,43 |
| 960 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 961 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 962 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 963 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 964 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1500 | 0,44 |
| 965 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 966 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1500 | 0,42 |
| 967 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1500 | 0,45 |
| 968 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1500 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 969 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1500 | 0,44 |
| 970 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1500 | 0,47 |
| 971 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 972 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1500 | 0,46 |
| 973 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 974 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 975 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 976 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 977 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 978 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 979 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 980 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 981 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 982 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 983 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 984 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 985 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 986 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 987 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 988 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,44 |
| 989 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 990 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 991 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 992 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 993 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 994 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 995 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 996 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 997 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 998 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 999 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1000 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1001 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,45 |
| 1002 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,44 |
| 1003 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1004 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1005 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1006 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1007 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1008 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1009 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1010 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,46 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1011 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1012 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1013 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1014 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1015 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1016 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1017 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1018 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1019 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1020 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1021 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1022 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1023 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1024 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,53 |
| 1025 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,51 |
| 1026 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,52 |
| 1027 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,45 |
| 1028 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,43 |
| 1029 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,43 |
| 1030 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1031 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1032 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1033 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1034 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1035 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1036 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1037 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1038 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,44 |
| 1039 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 1040 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1041 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1042 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 1043 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1044 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1045 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 1046 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1047 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1048 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1049 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1050 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1051 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1052 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1053 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1054 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1055 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1056 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,45 |
| 1057 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1058 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1059 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1060 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1061 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1062 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1063 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1064 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1065 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1066 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1067 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1068 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1069 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1070 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1071 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1072 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1073 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1074 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1075 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1076 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1077 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1078 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,53 |
| 1079 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,53 |
| 1080 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,52 |
| 1081 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1082 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,44 |
| 1083 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,44 |
| 1084 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1085 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1086 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1087 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1088 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1089 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1090 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1091 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1092 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1093 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1094 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1095 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 1096 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 1097 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,51 |
| 1098 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1099 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1100 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1101 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 1102 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 1103 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 1104 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1105 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1106 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1107 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1108 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,44 |
| 1109 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,43 |
| 1110 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,43 |
| 1111 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1112 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,45 |
| 1113 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,45 |
| 1114 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1115 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1116 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1117 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,45 |
| 1118 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,45 |
| 1119 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,44 |
| 1120 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1121 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1122 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1123 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1124 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1125 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1126 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1127 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1128 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1129 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1130 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1131 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1132 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1133 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1134 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1135 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1136 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1137 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,45 |
| 1138 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1139 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1140 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1141 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1142 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1143 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1144 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1145 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1146 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1147 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1148 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1149 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 1150 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,52 |
| 1151 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,51 |
| 1152 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1153 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1154 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1155 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1156 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,51 |
| 1157 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 1158 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 1159 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1160 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1161 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1162 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1163 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,44 |
| 1164 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,44 |
| 1165 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1166 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1167 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1168 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1169 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1170 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1171 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 1172 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,46 |
| 1173 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,45 |
| 1174 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1175 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,47 |
| 1176 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1177 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1178 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1179 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1180 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1181 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,48 |
| 1182 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,46 |
| 1183 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1184 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1185 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1186 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1187 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1188 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1189 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,44 |
| 1190 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,43 |
| 1191 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,42 |
| 1192 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,45 |
| 1193 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,45 |
| 1194 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,44 |
| 1195 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1196 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1197 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1198 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,45 |
| 1199 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,45 |
| 1200 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,44 |
| 1201 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1202 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1203 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1204 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1205 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1206 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1207 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1208 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1209 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1450 | 0,45 |
| 1210 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1450 | 0,49 |
| 1211 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1450 | 0,48 |
| 1212 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1450 | 0,47 |
| 1213 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1450 | 0,52 |
| 1214 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1450 | 0,50 |
| 1215 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1450 | 0,49 |
| 1216 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1217 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1218 | 0,001 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1219 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1220 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1221 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1222 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1223 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1224 | 0,001 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1225 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1226 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1227 | 0,001 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1228 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1229 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1230 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1231 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1232 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1233 | 0,001 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1234 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1235 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1236 | 0,001 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1237 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1238 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1239 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1240 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1241 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1242 | 0,001 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1243 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1244 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1245 | 0,001 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1246 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1247 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1248 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,50 |
| 1249 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1250 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1251 | 0,001 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1252 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1253 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1254 | 0,001 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1255 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1256 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1257 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1258 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1259 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1260 | 0,001 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1261 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1262 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1263 | 0,001 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1264 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1265 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1266 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1267 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1268 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1269 | 0,001 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1270 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,49 |
| 1271 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,47 |
| 1272 | 0,001 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,46 |
| 1273 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1274 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1275 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1276 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1277 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1278 | 0,001 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1279 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1280 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1281 | 0,001 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1282 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1283 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1284 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1285 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1286 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1287 | 0,001 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1288 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1289 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1290 | 0,001 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1291 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1292 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1293 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1294 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1295 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1296 | 0,001 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1297 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1298 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1299 | 0,02 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1300 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1301 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1302 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1303 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1304 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1305 | 0,02 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1306 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1307 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1308 | 0,02 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1309 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1310 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1311 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1312 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1313 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1314 | 0,02 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1315 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1316 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1317 | 0,02 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1318 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1319 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1320 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1321 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1322 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1323 | 0,02 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1324 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,50 |
| 1325 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,48 |
| 1326 | 0,02 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,48 |
| 1327 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1328 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1329 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1330 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1331 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1332 | 0,02 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1333 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1334 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1335 | 0,02 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1336 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1337 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1338 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1339 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1340 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1341 | 0,02 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1342 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1343 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1344 | 0,02 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1345 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1346 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1347 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1348 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1349 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1350 | 0,02 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1351 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1352 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1353 | 0,02 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1354 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1355 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1356 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1357 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1358 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1359 | 0,02 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1360 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1361 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1362 | 0,02 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,48 |
| 1363 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1364 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1365 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,50 |
| 1366 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1367 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1368 | 0,02 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1369 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1370 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1371 | 0,02 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,50 |
| 1372 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1373 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1374 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1375 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1376 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1377 | 0,02 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1378 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,50 |
| 1379 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,49 |
| 1380 | 0,04 | 0,1 | 10 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,49 |
| 1381 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1382 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1383 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1384 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1385 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1386 | 0,04 | 0,1 | 10 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1387 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1388 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11М2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1389 | 0,04 | 0,1 | 11 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1390 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1391 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1392 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1393 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1394 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1395 | 0,04 | 0,1 | 11 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1396 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1397 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1398 | 0,04 | 0,1 | 12 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1399 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1400 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1401 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1402 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1403 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1404 | 0,04 | 0,1 | 12 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1405 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1406 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1407 | 0,04 | 0,2 | 10 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1408 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1409 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1410 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1411 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1412 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1413 | 0,04 | 0,2 | 10 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1414 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1415 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1416 | 0,04 | 0,2 | 11 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1417 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1418 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1419 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1420 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1421 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1422 | 0,04 | 0,2 | 11 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1423 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,52 |
| 1424 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1425 | 0,04 | 0,2 | 12 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,51 |
| 1426 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1427 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1428 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1429 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1430 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |

| № эксперимента | Исходные условия экспериментов | | | | | | | | | | Содержание азота в жидком металле % масс. |
|----------------|---|---------|----------|------|--------|----------|---------|--------|------|-----------------------------------|---|
| | Химический состав стали 04X20H6Г11M2АФБ, % масс | | | | | | | | | Температура стали, градус Цельсия | |
| | Углерод | Кремний | Марганец | Хром | Никель | Молибден | Ванадий | Ниобий | Азот | | |
| 1431 | 0,04 | 0,2 | 12 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1432 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 6,5 | 1,45 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,48 |
| 1433 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 7,25 | 1,7 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,47 |
| 1434 | 0,04 | 0,4 | 10 | 18,5 | 8 | 1,2 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,46 |
| 1435 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 6,5 | 1,45 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,49 |
| 1436 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 7,25 | 1,7 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,49 |
| 1437 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19 | 8 | 1,2 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,48 |
| 1438 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 6,5 | 1,45 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1439 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 7,25 | 1,7 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1440 | 0,04 | 0,4 | 10 | 19,5 | 8 | 1,2 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1441 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 6,5 | 1,2 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,49 |
| 1442 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 7,25 | 1,45 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,49 |
| 1443 | 0,04 | 0,4 | 11 | 18,5 | 8 | 1,7 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,48 |
| 1444 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 6,5 | 1,2 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1445 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 7,25 | 1,45 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1446 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19 | 8 | 1,7 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1447 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 6,5 | 1,2 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1448 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 7,25 | 1,45 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1449 | 0,04 | 0,4 | 11 | 19,5 | 8 | 1,7 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1450 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 6,5 | 1,7 | 0,1 | 0,15 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1451 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 7,25 | 1,2 | 0,15 | 0,1 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1452 | 0,04 | 0,4 | 12 | 18,5 | 8 | 1,45 | 0,2 | 0,2 | 0,45 | 1400 | 0,45 |
| 1453 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 6,5 | 1,7 | 0,2 | 0,1 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1454 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 7,25 | 1,2 | 0,1 | 0,2 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1455 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19 | 8 | 1,45 | 0,15 | 0,15 | 0,49 | 1400 | 0,49 |
| 1456 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 6,5 | 1,7 | 0,15 | 0,2 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1457 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 7,25 | 1,2 | 0,2 | 0,15 | 0,53 | 1400 | 0,53 |
| 1458 | 0,04 | 0,4 | 12 | 19,5 | 8 | 1,45 | 0,1 | 0,1 | 0,53 | 1400 | 0,53 |

Статистическая обработка результатов машинного эксперимента по растворимости азота в расплаве стали 04X20H6Г11M2АФБ в зависимости от исходного состава и температуры при атмосферном давлении приведены в табл.В.7.

Значимое влияние на растворимость азота в жидкой стали 04X20H6Г11M2АФБ в пределах изменения концентраций компонентов, ограниченных требованиями ТУ-24.10.22-194-07516250-2018, оказывает изменение температуры ($\lg T$, $1/T$) и изменение концентраций следующих

компонентов по мере снижения влияния: хром, марганец, кремний, содержание никеля во второй степени, молибдена, углерода, ниобия, целевого содержания азота ($0,45 \leq [\%N]_{tv} \leq 0,53$) во второй степени и ванадия.

Таблица В.7. Результат множественной регрессии методом с последовательным включением параметров влияния на растворимость азота в жидкой стали 04X20H6Г11М2АФБ, рассчитанной в программе Thermo-Calc

| Множественный коэффициент корреляции $R=0,9501$ Множественный коэффициент детерминации $R^2=0,9026$ Скорректированный множественный коэффициент детерминации $R^2=0,9017$ Значение критерия Фишера $F(13,1444)=1029,3$ $p<0,0000$; Стандартная ошибка оценки: 0,01314 | | | | | | |
|--|----------|----------|--------------------|----------|----------|----------|
| N=1458 | БЕТА | Ст.Ош. | B | Ст.Ош. | t(1444) | p-знач. |
| Св.член | | | 32,6095 | 3,3264 | 9,8032 | 0,000000 |
| lgT | -4,64917 | 0,452461 | -9,4595 | 0,9206 | -10,2753 | 0,000000 |
| Хром | 0,25140 | 0,008213 | 0,0258 | 0,0008 | 30,6102 | 0,000000 |
| Марганец | 0,55673 | 0,313063 | 0,0286 | 0,0161 | 1,7783 | 0,075561 |
| $[\%N]_{tv}$ | 1,55010 | 0,348616 | 1,9887 | 0,4473 | 4,4464 | 0,000009 |
| Кремний | -0,15430 | 0,008213 | -0,0518 | 0,0028 | -18,7873 | 0,000000 |
| $([\%Ni])^2$ | -0,08325 | 0,008213 | -3,9266E-04 | 0,0000 | -10,1362 | 0,000000 |
| 1/T | -3,79891 | 0,452461 | -5025,82 | 598,5904 | -8,3961 | 0,000000 |
| Молибден | 0,04531 | 0,008213 | 0,0093 | 0,0017 | 5,5167 | 0,000000 |
| Углерод | -0,03730 | 0,008213 | -0,0982 | 0,0216 | -4,5419 | 0,000006 |
| Ниобий | 0,03388 | 0,008213 | 0,0348 | 0,0084 | 4,1253 | 0,000039 |
| $([\%N]_{tv})^2$ | -1,37566 | 0,348616 | -1,8004 | 0,4563 | -3,9461 | 0,000083 |
| Ванадий | -0,01484 | 0,008213 | -0,0152 | 0,0084 | -1,8063 | 0,071073 |
| $([\%Mn])^2$ | -0,34855 | 0,313063 | -8,128E-04 | 0,0007 | -1,1134 | 0,265740 |

Примечания: T – температура в градусах Цельсия, $[\%N]_{tv}$ – целевое значение содержания азота в стали, % масс.

Характер влияния температуры, изменения концентраций кремния, никеля, углерода, целевого значения азота во второй степени, ванадия и марганца во второй степени обратно пропорциональный, а изменения содержания хрома, марганца, целевого значения азота, молибдена и ниобия – прямо пропорциональный. Влияние только трех из перечисленных факторов является незначимым – изменение содержания марганца, марганца во второй степени и ванадия. Стандартная ошибка прогноза растворимости азота по регрессионной зависимости согласно результатам (табл.В.6) составляет $\pm 0,0314$ % масс. Регрессионная зависимость растворимости азота в стали 04X20H6Г11М2АФБ имеет значимый характер.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.
ДОКУМЕНТЫ, ПОДТВЕРЖДАЮЩИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ
МАТЕРИАЛОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

№ 48
 от 13.08.2021 г.

Диссертационный совет Д 01.019.03
 при Донецком национальном
 техническом университете

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
 Корзуна Е.Л. на тему "Развитие научных и технологических основ
 производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота
 и углерода", представленную на соискание ученой степени доктора
 технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных,
 цветных и редких металлов

В результате выполнения научно-исследовательских работ, проводимых
 совместно ДонНТУ и ИБМТ на различных металлургических предприятиях
 Российской Федерации, Белоруссии, Украины и Приднестровской Молдавской
 Республики, были использованы следующие разработки Корзуна Евгения
 Леонидовича:

- технология выплавки с внепечной обработки в производстве стали 70 и
 стали 80 на Молдавском металлургическом заводе, позволяющая выпускать
 заготовку с гарантированным содержанием азота не более 80 ppm без
 применения вакуумной обработки и использования железа прямого
 восстановления в металлошихте;
- уточнённые термодинамические зависимости, описывающие растворение
 кислорода и углерода в расплавах на основе железа, использованы в
 построении термодинамического блока программных комплексов
 моделирования и управления сталеплавильными процессами,
 разработанных ИБМТ, в частности в "Системе управления ДСП" и в
 "Системе непрерывного контроля химического состава и температуры
 металла во время обработки на агрегате ковш-печь".

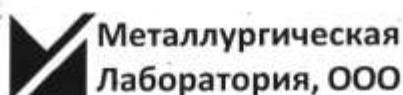
Реализация изменений в технологической инструкции выплавки и
 внепечной обработки стали 70 и стали 80 в условиях ММЗ без использования
 вакууматора позволило предприятию исключить выпуск продукции не
 соответствующей требованиям заказчика по содержанию азота.

С уважением,
 Генеральный директор ИБМТ



Пonomаренко Д.А.





454080, Челябинск, ул. К. Либкнехта, д. 34, оф. 13, тел.: +7 (903) 0893781, admin@steelmaker.ru, www.steelmaker.ru

№ 89 от 16.08.2021

Диссертационный совет
Д 01.019.03 при Донецком
национальном техническом
университете

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Корзуна Е.Л. на тему "Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода", представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallurgy черных, цветных и редких металлов

В результате выполнения научно-исследовательских работ, проводимых при непосредственном участии Корзуна Евгения Леонидовича, была усовершенствована технология производства деформируемых жаропрочных сплавов на никелевой основе:

- обоснована и реализована в Российской Федерации триплекс-технология (ВИП-ЭШП-ВДП) производства жаропрочного сплава Inconel 718, позволившая стабилизировать максимальный предел содержания азота 65 ppm в готовых изделиях, что позволило предприятию, внедрившему данную технологию исключить из причин получения продукции несоответствующего качества содержание азота;
- использованы сведения о коэффициенте распределения азота в системе железо – газовая фаза, содержащая азот, для расчета предельного содержания азота в плавильной камере вакуумной индукционной печи и величин предельного натекаания в ВИП;
- разработана и реализована опытная технология производства коррозионностойких никелевых сплавов, содержащих молибден, обеспечивающая получение содержания углерода не выше 50 ppm, предусматривающая промежуточную стадию рафинирования – выплавку в ВИП паспортной рафинированной шихтовой никель – молибденовую заготовку близкого к эвтектическому составу с содержанием углерода 20 ppm.

Указанные разработки предлагаются в настоящее время для реализации в ведущих предприятиях Российской Федерации по производству специальных сталей и сплавов: ОАО "Металлургический завод "Электросталь", АО "Ступинская металлургическая компания".

Директор, канд. техн. наук



А. А. Алексеенко

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ДОНЕЦКИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ЗАВОД»**

(ООО «ДМЗ»)

ул. Ивана Ткаченко, 122, Ленинский район, г. Донецк, 83062, ДНР

Телефон: 217-23-09, e-mail: donmz@donmz.ru

Свидетельство № 074534, ИНН: 50035355

Об. Ок. 8/10 21 № 01-14/2184

Диссертационный совет Д 01.019.03 при
Донецком национальном техническом
университете

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы Корзуна Е.Л. на тему "Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода", представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

По результатам опытно - промышленных плавов, проведенных в ЭСПЦ ООО "ДМЗ" на печи ДСП-2 Danarc™ фирмы "Danieli", были внедрены изменения в технологии выплавки полупродукта для последующего производства среднеуглеродистых, углеродистых и конструкционных сталей с регламентированным содержанием азота не выше 0,008% масс. в заготовке. Предложенные и реализованные изменения в технологический процесс разработаны во временном творческом научно-производственном коллективе по инициативе и непосредственному участию Корзуна Е.Л.

Указанные изменения заключаются в следующем:

- вспенивание шлака в окислительный период в печи осуществляется с использованием порошка молотого коксика с содержанием азота в нем 1500÷2000 ppm при поддержании удельного расхода не ниже 1,2 кг/с в диапазоне 1,2÷1,8 кг/с, что обеспечило дополнительное снижение содержания азота в полупродукте на выпуске на 2,5÷10 ppm;
- науглероживание полупродукта на уровень ниже на 0,1% масс нижнего марочного предела проводится в ДСП в конце окислительного периода непосредственно перед выпуском полупродукта из ДСП.

Реализация изменений в технологической инструкции выплавки полупродукта в ДСП-2 Danarc™ фирмы "Danieli" позволило вне зависимости от применяемых в дальнейшем материалов для легирования получить гарантированное содержание азота в литой заготовке не выше 0,008% масс.



А.И. Егоров



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

06.10.2021 № 30-12/166a

На № _____

Диссертационный совет
Д 01.019.03 при Донецком
национальном техническом
университете

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Корзуна Е.Л. на тему "Развитие научных и технологических основ
производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и
углерода", представленную на соискание ученой степени доктора
технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных,
цветных и редких металлов

Научные результаты и технические решения, полученные к.т.н., доцентом Корзуном Е.Л. в процессе работы над диссертацией на тему "Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода" на соискание ученой степени доктора технических наук были использованы в учебном процессе в материалах лекций, практических работах, при выполнении курсовых и дипломных работ студентов по направлению подготовки 22.03.02, 22 04.02 "Metallургия", программы подготовки бакалавриата и магистратуры "Metallургия стали" и "Электrometallургия стали".

Первый проректор,
канд. техн. наук, доцент



А.А. Каракозов

Начальник учебного отдела,
канд. техн. наук, доцент

Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой
"Электrometallургия",
докт. техн. наук, профессор

А.А. Троянский



**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА
МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
"ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"**

283001, г. Донецк, ул. Артема, 58 тел.: (062) 337-17-33, 335-75-62, факс: (062) 304-12-78
эл. почта: donntu.info@mail.ru

07.10.2021 № 30-12/167а

На № _____

Диссертационный совет
Д 01.019.03 при Донецком
национальном
техническом университете

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
Корзуна Е.Л. на тему "Развитие научных и технологических основ
производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и
углерода", представленную на соискание ученой степени доктора
технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных,
цветных и редких металлов

Научные результаты и технические решения, полученные к.т.н., доцентом Корзуном Е.Л. в процессе работы над диссертацией на тему "Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода" на соискание ученой степени доктора технических наук были использованы при выполнении научно-исследовательских работ, проведенных в ГОУВПО "ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ" – Г-2-81 "Разработка, исследование и освоение в опытно-промышленных условиях технологии электрошлакового переплава высококачественных металлов и сплавов с использованием постоянного тока (№ гос. регистрации 81021127), №85-201/241 "Разработка и исследование технологии повышения качества металлов и сплавов за счет электрошлакового переплава под активными шлаковыми системами заготовок из порошковых материалов" (№ гос. регистрации 01850005588); Г-12-86 "Разработка технологии рафинирования и микролегирования специальных сплавов с использованием активных флюсов" (№ гос. регистрации 01860028315); №03-201 "Создание базы данных термодинамических величин для пакета прикладных программ ГИБС применительно к условиям эксплуатации на установке печь-ковш РУП "Белорусский металлургический завод"; №04-201 "Создание базы данных

параметров сталеплавильных технологий для пакета прикладных программ оперативного анализа экономической эффективности сталеплавильного производства"; №05-204 "Разработка состава плавкой шлаковой смеси для внепечного обессеривания чугуна", Д-14-09 "Разработка термодинамической модели сталеплавильного процесса для инженерных расчетов и систем управления плавкой» (номер государственной регистрации 0108U011214).

Проректор по научной работе,
докт. техн. наук, профессор



С.В. Борщевский

Начальник учебного отдела,
канд. техн. наук, доцент



Б.В. Гавриленко

Заведующий кафедрой
"Электromеталлургия",
докт. техн. наук, профессор



А.А. Троянский

ПРИЛОЖЕНИЕ Д.
ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРАБОТОК

УТВЕРЖДАЮ
Проректор ГОУВПО "ДОННТУ"
по научной работе д.т.н., проф.
 С.В. Борщевский
"04" ноября 2021 года



Расчет

фактического годового экономического эффекта от внедрения результатов научно-технических разработок, полученных в процессе выполнения диссертации доцента кафедры "Электрометаллургия" ГОУВПО "ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ" Корзуна Евгения Леонидовича на тему "Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода", представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallurgy of black, colored and rare metals.

В процессе выполнения докторской диссертации Корзуна Е.Л. "Развитие научных и технологических основ производства сталей и сплавов с контролируемым содержанием азота и углерода" разработаны, опробованы и внедрены в промышленное производство ряд технологических процессов: выплавка в дуговой сталеплавильной печи (ДСП) и внепечная обработка на установке ковш – печь (УКП) углеродистой и низколегированной стали, позволяющая без вакуумирования стали гарантированно получить содержание азота в металле не выше 0,008% масс.; производство коррозионноустойчивых и маломангнитных сталей, легированных азотом, с гарантированным содержанием азота, в технологической цепочке ДСП-УКП-разливка в слитки – расходные электроды – ЭШП; производство в вакуумной индукционной печи (ВИП) коррозионноустойчивых сплавов на никелевой основе с низким (не выше 50 ppm) содержанием углерода; производство жаропрочных никелевых сплавов с содержанием азота не выше 65 ppm и кислорода не выше 50 ppm в технологической цепочке ВИП-ЭШП-ВДП.

Расчет фактического экономического эффекта имеет две составляющих:

- 1) экономический эффект от внедрения технологии выплавки углеродистых и низколегированных сталей, гарантирующей получение готового металла с содержанием азота не выше 80 ppm, в технологической цепочке дуговая сталеплавильная печь – установка внепечной обработки стали ковш-печь;
- 2) экономический эффект от освоения технологии выплавки низкоуглеродистого коррозионноустойчивого сплава на основе никеля ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ).

Первая часть расчета опирается на фактические данные, отраженные в справках о внедрении результатов диссертационной работы Корзуна Е.Л.,

полученных от ООО "Инновационное Бюро Металлургических Технологий" (№48 от 13.08.2021) и ООО "Донецкий металлургический завод" (№01-14/2184 от 08.10.2021).

Вторая часть расчета основана факте получения импортозамещающего материала для создания инновационного энергетического оборудования, отраженного в справке о внедрении результатов диссертационной работы Корзуна Е.Л., полученной от ООО "Металлургическая Лаборатория" (№89 от 16.08.2021).

Д.1 Переход выплавки низкоуглеродистых, углеродистых сталей на технологию, гарантирующую максимальное содержание азота в готовом металле не выше 0,008% масс., без применения внепечной вакуумной обработки стали

Исходные условия для расчета:

- ёмкость сталеразливочного ковша 100 тонн;
- марка стали – сталь 70, сталь 80;
- объём производства катанки из указанных марок стали – 12 тыс. тонн;
- объём инвестиционных затрат на совершенствование инфраструктуры ДСП и установки ковш – печь – 250 тыс. руб. РФ;
- дисконтная ставка – 0,0125 %/месяц.

Расчет денежного потока (руб. РФ), образуемого за счет применения разработанной технологии приведен в табл. Д.1.

Таблица Д.1 – Оценка денежного потока при реализации технологии выплавки углеродистой стали в технологической цепочке ДСП-УКП с гарантированным достижением содержания азота ниже 80 ppm.

| Статьи калькуляции, параметры которых изменяются при внедрении технологии | Стоимость единицы, долл. США | Курс долл. США в рублях РФ | Старое значение в калькуляции и затрат на один ковш | Новое значение в калькуляции и затрат на один ковш | Изменение в объёме расхода статьи затрат | Масса плавки, т | Разница денежного потока, руб. РФ на 1 т стали |
|---|------------------------------|----------------------------|---|--|--|-----------------|--|
| Кокс | 357 | 70,8623 | 0,816 | 0 | -0,816 | 100 | -206,43 |
| Порошковая проволока с углеродистым наполнителем | 1467 | 70,8623 | 0 | 0,816 | 0,816 | 100 | 848,27 |
| Известь | 60 | 70,8623 | 2,5 | 0 | -2,5 | 100 | -106,29 |
| Известняк | 3,5 | 70,8623 | 0 | 2,5 | 2,5 | 100 | 6,20 |
| Электроэнергия, кВт-ч/т | 0,073 | 70,8623 | | | 36,875 | 100 | 190,75 |
| Дополнительный кислород для продувки полупродукта в печи, м ³ | 0,5 | 70,8623 | 37,33 | 0 | -37,33 | 100 | -13,23 |
| Кислород для обдува шлака в ковше, м ³ | 0,5 | 70,8623 | 0 | 1,5 | 1,5 | 100 | 53,15 |
| Затраты на вакуумирование на 1 т | 25 | 70,8623 | 25 | 0 | -25 | | -1 771,56 |
| Итого, руб. РФ/т | | | | | | | -999,14 |

Фактический экономический эффект рассчитывали за период 12 месяцев после осуществления совершенствования инфраструктуры технологического комплекса ДСП-УКП: прокладка кислородопроводов к установке ковше печь, установки расходоуемых дутьевых устройств для обдува кислорода поверхности шлака сталеразливочного ковша со средствами контроля и регулирования. Результаты расчета чистого дисконтированного дохода приведены в табл. Д.2.

Таким образом, фактический экономический эффект за год эксплуатации разработанной технологии производства стали 70 и стали 80 составил 132,587 млн. руб. РФ.

Д.2 Освоение технологии производства импортозамещающего коррозионностойкого сплава на никелевой основе для изготовления инновационного энергетического оборудования

Исходные условия для расчёта:

- стоимость приобретения никелевого сплава (Alloy C-4, Hastelloy C-4, UNS N06455, 2.4610) за рубежом – от 20 до 60 долл. США за 1 кг в зависимости от качества и сортамента; средняя сравнительная стоимость импортируемого сплава, принятая к расчету, – 40 \$/кг;
- объём производства для изготовления одной единицы опытной энергетической установки – 80 тонн в год;
- курс доллара США – 70,8623 руб. РФ.

Таблица Д.3 – Расчетная калькуляция затрат выплавки сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ).

| Наименование статьи | Количество, кг | Цена, руб. РФ | Стоимость, руб. РФ |
|--|----------------|---------------|--------------------|
| ПРШЗ NiMo | 422,50 | 2 154 | 910 214 |
| Никель-магний 4% | 7,80 | 1 488 | 11 607 |
| Никель-ниобий 85% | 0,73 | 6 732 | 4 940 |
| Алюминий А99 | 1,20 | 276 | 332 |
| Титан ВТ-1,0 | 0,84 | 1 900 | 1 589 |
| Никель Н1У | 359,16 | 1 063 | 381 759 |
| Хром ЭРХ-2 | 244,52 | 3 160 | 772 802 |
| Марганец металлический Мн-95 | 1,52 | 190 | 289 |
| Оксид никеля 99,99% марка ОСЧ 10-2 | 3,09 | 690 | 2 131 |
| Затраты по переделу | | | 78 087 |
| Итого затраты на изготовление слитка, руб/т | | | 2 163 751 |
| Итого затраты на изготовление слитка, руб/кг | | | 2 164 |

Фактический экономический эффект от освоения отечественного производства сплава ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) аналога Alloy C-4 определили как разницу средней стоимости Alloy C-4 на внешнем рынке и затрат на производство (табл. Д.3) умноженную на объём годового производства для одной энергетической установки:

$$(40 \cdot 70,8623 - 2164) \cdot 80000 = 53\,659\,281 \text{ руб. РФ/год.}$$

Таблица Д.2 – Расчёт чистого дисконтированного дохода от внедрения технологии выплавки углеродистой стали на комплексе ДСП-УКП без применения вакуумирования с гарантией получения содержания азота в готовом металле не выше 80 ppm.

| Наименование периода времени | Период времени, месяц | Объем производства в месяц, т | Денежный поток, руб | Средняя ставка дисконта в месяц, % | Дисконтный множитель | Дисконтированный доход | Дисконтированный кумулятивный доход | Объем инвестиций | Дисконтированный объем инвестиций | Чистый дисконтированный доход | Кумулятивный ЧДД |
|------------------------------|-----------------------|-------------------------------|---------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------------------|------------------|-----------------------------------|-------------------------------|------------------|
| Нулевой период | 0 | | | 0,0125 | 1 | 0 | 0 | 250 000 | 250 000 | -250 000 | -250 000 |
| 1-й месяц | 1 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,988 | 11 841 605 | 11 841 605 | | | 11 841 605 | 11 591 605 |
| 2-й месяц | 2 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,975 | 11 695 412 | 23 537 017 | | | 11 695 412 | 23 287 017 |
| 3-й месяц | 3 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,963 | 11 551 024 | 35 088 041 | | | 11 551 024 | 34 838 041 |
| 4-й месяц | 4 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,952 | 11 408 419 | 46 496 460 | | | 11 408 419 | 46 246 460 |
| 5-й месяц | 5 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,940 | 11 267 574 | 57 764 035 | | | 11 267 574 | 57 514 035 |
| 6-й месяц | 6 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,928 | 11 128 469 | 68 892 503 | | | 11 128 469 | 68 642 503 |
| 7-й месяц | 7 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,917 | 10 991 080 | 79 883 583 | | | 10 991 080 | 79 633 583 |
| 8-й месяц | 8 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,905 | 10 855 388 | 90 738 971 | | | 10 855 388 | 90 488 971 |
| 9-й месяц | 9 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,894 | 10 721 371 | 101 460 341 | | | 10 721 371 | 101 210 341 |
| 10-й месяц | 10 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,883 | 10 589 008 | 112 049 349 | | | 10 589 008 | 111 799 349 |
| 11-й месяц | 11 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,872 | 10 458 279 | 122 507 629 | | | 10 458 279 | 122 257 629 |
| 12-й месяц | 12 | 12000 | 11 989 625 | 0,0125 | 0,862 | 10 329 165 | 132 836 793 | | | 10 329 165 | 132 586 793 |

Примечание: величина денежного потока в месяц была определена как произведение удельного денежного потока 999,14 руб. РФ/т на месячный объём производства 12000 т – $999,14 \times 12000 = 11989625$ руб. РФ в месяц.

Фактический экономический эффект за год эксплуатации разработанной технологии производства ХН62М-ВИ (ЭК190-ВИ) составил 53,659 млн. руб. РФ.

Таким образом, суммарный годовой фактический экономический эффект составил 186,246 млн. руб. РФ. Доля Корзуна Е.Л. в суммарном экономическом эффекте составляет 30% (55,874 млн. руб. РФ).

Примечание: в виду длительного временного разрыва между составляющими экономического эффекта все цены на материалы приведены к ценам 2021 года, курс доллара США по отношению к рублю Российской Федерации взят по состоянию на 25.10.2021.

Декан факультета металлургии и
теплоэнергетики ГОУВПО
"ДОННТУ", д.т.н., проф.



С.М. Сафьянц

Заведующий кафедрой "Экономика
предприятия и инноватика" ГОУВПО
"ДОННТУ", к.э.н., доц.



А.В. Мешков