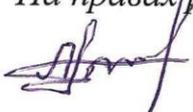


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи


Таровик Артем Борисович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

05.02.08 – Технология машиностроения

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов Александр Николаевич



Идентичность всех экземпляров
диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:
Учёный секретарь диссертационного
совета Д 01.014.02



Донецк — 2019

Р.М. Грубка

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
РАЗДЕЛ 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Анализ существующих методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий	10
1.2 Исследования комбинированных методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий	34
1.3 Цель и задачи работы	42
РАЗДЕЛ 2 МЕТОДИКА СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ.....	45
2.1 Общие положения	45
2.2 Классификация тонкостенных цилиндрических изделий	48
2.3 Методика проектирования технологического процесса комбинирован- ной обработки тонкостенных цилиндрических изделий	52
2.4 Основные особенности синтеза технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе функционально-ориентированного подхода	57
2.5 Особенности синтеза укрупненной универсальной структуры технологического процесса на базе технологических модулей	61
2.6 Синтез структуры технологических модулей на основе морфологического подхода	65
2.7 Повышение эффективности комбинированной обработки на основе принципа последовательной минимизации параметров операций по структуре технологического процесса	69
2.8 Выводы	72

РАЗДЕЛ 3 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ	74
3.1 Оборудование для реализации комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий	74
3.2 Анализ особенностей измерения частоты и амплитуды колебаний инструмента	82
3.3 Влияние ультразвуковых колебаний при резании на качество получаемой поверхности	84
3.4 Выводы	87
РАЗДЕЛ 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ	88
4.1 Методика экспериментальных исследований	88
4.2 Обработка результатов	91
4.3 Результаты экспериментальных исследований	101
4.4 Выводы	107
РАЗДЕЛ 5 АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ. РЕКОМЕНДАЦИИ РАБОТЫ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВО	109
5.1 Общие сведения	109
5.2 Технологические особенности определения рациональных режимов резания при ультразвуковой обработке	110
5.3 Основные рекомендации работы	118
5.4 Внедрение результатов работы в производство	120
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	122
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	124
Приложение А. Документы, подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в связи с непрерывным прогрессом науки и техники постоянно повышаются требования к производительности технологических процессов изготовления различных изделий машиностроения. Эта проблема особенно остро стоит для тонкостенных цилиндрических изделий, широко используемых в самых различных отраслях промышленности: нефтедобывающей, самолето- и ракетостроении, в космических и военно-промышленных разработках. Поэтому решение вопроса повышения производительности обработки тонкостенных цилиндрических изделий является актуальной задачей для отечественного машиностроения.

В данный момент применение традиционных методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий уже исчерпали свои возможности в направлении дальнейшего повышения производительности. Поэтому сейчас все шире применяются комбинированные методы обработки изделий, обеспечивающие использование различных методов реализации технологических воздействий, например, механической обработки, акустических и физико-химических методов. Только комплексное использование комбинированных методов позволяет вести дальнейшее повышение эффективности обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

В частности, одним из перспективных методов повышения производительности при обработке тонкостенных цилиндрических изделий является ультразвуковое резание. Применение этого метода обработки способствует повышению производительности. При ультразвуковом резании создаются предпосылки для уменьшения влияния составляющих силы резания на формообразование деталей, особенно нежестких; для улучшения обрабатываемости материалов, прежде всего коррозионностойких и жаропрочных.

Выполненные предварительные исследования процессов комбинированной обработки показали, что для выполнения дальнейшего повышения параметров производительности изготовления тонкостенных цилиндрических изделий следу-

ет определить необходимые закономерности формирования структуры и параметров технологических процессов комбинированной обработки. Для реализации технологических процессов комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий необходима разработка технологического обеспечения для выполнения заданных операций процесса.

Степень разработанности темы. Вопросам комбинированной обработки цилиндрических изделий посвящено большое количество научных трудов отечественных и зарубежных ученых (среди которых стоит отметить работы А.И. Маркова, М.С. Нерубая, А.И. Исаева, В.С. Анохина, А.П. Бабичева, В.Н. Подураева, М.Л. Хейфец, Е.В. Пашкова, Д. Кумабэ, В.К. Асташева, А.А. Вожжова, В.П. Смоленцева и др.).

Пока что вопрос комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий остается недостаточно изученным, требующим детальных исследований.

Вместе с тем, можно отметить, что выполненные ранее исследования и полученные результаты являются хорошей базой для создания технологического обеспечения комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий машиностроения.

Цель и задачи исследований. Целью данной работы является повышение производительности изготовления тонкостенных цилиндрических изделий на базе комбинированной технологии обработки путем синтеза рациональной структуры технологического процесса и разработки технологического обеспечения.

На основе поставленной цели в данной работе определены следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Обосновать целесообразность применения комбинированной обработки.
2. Разработать структуру технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий, обеспечивающую повышение

производительности обработки. Предложить классификацию тонкостенных цилиндрических изделий.

3. Разработать на базе токарного станка ультразвуковую установку для комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

4. Выполнить экспериментальные исследования по определению влияния режимов резания на силовые параметры при обработке тонкостенных цилиндрических изделий.

5. Получить зависимости изменения среднего значения силы резания для обычного и ультразвукового точения тонкостенных цилиндрических изделий.

6. Установить область допустимых решений, с помощью которой определить оптимальные режимы резания и коэффициент производительности.

7. Внедрить результаты работы в производство.

Объект исследования. Процесс комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на основе лезвийного точения с наложением ультразвуковых колебаний на режущий инструмент.

Предмет исследования. Технологические показатели комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Научная новизна полученных результатов:

1. Предложена и обоснована на основе функционально-ориентированного подхода структура технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

2. Экспериментально получены зависимости, которые подтверждают снижения сил резания при ультразвуковом воздействии режущего инструмента на тонкостенные цилиндрические изделия.

3. Получила дальнейшее развитие методика выбора оптимальных режимов резания и оценки производительности комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе оптимизации в условиях технических ограничений.

Теоретическая значимость работы.

1. Разработана методика оптимизации режимов резания в условиях технических ограничений при комбинированной обработке тонкостенных цилиндрических изделий.

2. Получены математические зависимости, позволяющие определять технические ограничения по мощности привода и шероховатости поверхности в зависимости от режимов для заданных условий комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

3. Разработана укрупненная универсальная структура технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе технологических модулей.

Практическая значимость работы.

1. Разработанный рациональный технологический процесс комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий обеспечивает снижение радиальной составляющей силы резания на 22%, тангенциальной – на 51%.

2. Обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в условиях комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий позволяют повысить производительность обработки в 2 раза.

3. Результаты работы внедрены в производство на ООО «Завод Прогресс 2000» и в Донбасском государственном техническом университете (г. Алчевск). Ожидаемый экономический эффект от внедрения результатов работы составит 121500 рублей РФ (сто двадцать одну тысячу пятьсот рублей РФ).

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, использован следующий комплекс методов и научных положений: положения теории резания; основные положения и методы технологии машиностроения и теории оптимизации; методы и принципы функционально-ориентированных технологий машиностроения; методы математического моделирования и статистики. Экспериментальные исследования базировались на методах планирования эксперимента; обработку результатов экспериментов проводили с помощью статистических методов.

Положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие основные научные разработки и положения:

- научное положение о том, что ультразвуковая обработка тонкостенных цилиндрических изделий обеспечивается за счет выбора оптимальных режимов, что дает возможность получить более полную оценку повышения производительности обработки;

- результаты экспериментальных исследований по оценке снижения среднего значения силы резания при ультразвуковом воздействии режущего инструмента на тонкостенные цилиндрические изделия;

- методика оптимизации, позволяющая давать обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в условиях ультразвуковой обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Степень достоверности результатов. Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректностью применения современного математического аппарата и научных теорий, адекватностью разработанных моделей, применением современного оборудования; допустимой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, внедрением результатов исследования в производство.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты исследования, которые представлены в диссертации, были обсуждены на международных научно-технических конференциях: XIX Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2012 г.); XX Международная научно-техническая конференция «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, 2013 г.); Юбилейная международная научно-техническая конференция «60 лет ДонГТУ. Наука и практика» (г. Алчевск, 2017 г.); III Международная научно-техническая конференция «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2018 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на семинарах кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета

и кафедры «Технология и организация машиностроительного производства Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 10 научно-технических работах, в том числе: 2 статьи в ведущих рецензируемых изданиях ВАК, имеющем РИНЦ; 1 статья в ведущем рецензируемом журнале ВАК России; 2 статьи в сборниках научных трудов; 1 статья в студенческом научно-техническом журнале; 4 публикации в материалах международных конференций.

Структура и объем работы. Работа состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 141 наименование и приложения. Диссертация содержит 52 рисунка и 3 таблицы. Общий объем работы – 140 страниц.

РАЗДЕЛ 1

ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Анализ существующих методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий

В современной механике деформируемых тел тонкостенными называют стержни, длина которых существенно превосходит размеры (ширину и высоту) поперечного сечения, а последние, со своей стороны, во столько же раз превышают толщину стенок [77].

Обозначенные соотношения размерных характеристик тонкостенных цилиндрических изделий (ТЦИ) обуславливают их жесткость, т.е. способность противодействовать внешним нагрузкам в отношении деформации (изменения формы и размеров) и устойчивость, т.е. способность сохранять первоначальную форму упругого равновесия. При данных нагрузках деформация не должна превосходить определенной величины, которая устанавливается в согласовании с требованиями, которые предъявляются к ТЦИ.

Соотношение размерных характеристик ТЦИ с учетом факторов, которые характеризуют область применения, позволяет говорить о конструктивной или функциональной тонкостенности, под которой следует иметь ввиду способность ТЦИ противодействовать действующим на них нагрузкам в процессе эксплуатации и обеспечивать выходные характеристики изделий, в составе которых они используются. Этим определением руководствуются в процессе проведения проектно-инженерных и расчетных работ. Вместе с тем, обычно, в случае неудовлетворения ТЦИ требованиям жесткости, устойчивости иным аспектам идут по пути ужесточения конструкции, что достигается, к примеру, увеличением толщины стенок либо использованием ребер жесткости.

В ходе обработки, когда толщина стенок является конструктивно заданным параметром и его изменение неприемлемо, достижение требуемой точности обеспечивается лишь за счет технологического оборудования, оснастки и способов обработки. В данном случае следует принимать во внимание технологическую тонкостенность, под которой предполагается способность деталей быть обработанными с применением определенных способов обработки, технологического оборудования и оснастки, инструмента и режимов резания в пределах данного допуска на отклонение формы обрабатываемой поверхности для требуемой степени точности.

Так как усилиями, которые вызывают деформациями, являются, в основном, усилия зажима и резания, следует оценить суммарную величину деформации, возникающей при обработке с использованием существующих в распоряжении или разрабатываемых методов и средств обработки, и сравнить ее с допуском на обработку. Если допуск на обработку превосходит величину деформации, то деталь не является технологически тонкостенной, техпроцесс ее обработки не требует изменения принятого способа обработки, создания либо замены технологической оснастки, инструмента и изменения режимов резания.

Если же допуск на обработку близок к величине суммарной деформации или меньше ее, то такая деталь является технологически тонкостенной и требует изменения либо метода обработки, либо технологической оснастки, либо режимов резания, что, как правило, приводит к дополнительным экономическим затратам или к снижению производительности.

Основываясь на вышеизложенном можно сделать заключение, что технологическая тонкостенность прежде всего определяется способностью определенного объекта противодействовать деформациям, которые создаются действующими на него силами зажима и резания [77, 116].

При всем многообразии конструктивных решений тонкостенных цилиндрических изделий, встречающихся в машинах, приборах и других объектах производства, их можно свести к сравнительно небольшому числу основных классов: кольца, втулки, гильзы, чашки, барабаны, стаканы (рисунок 1.1).

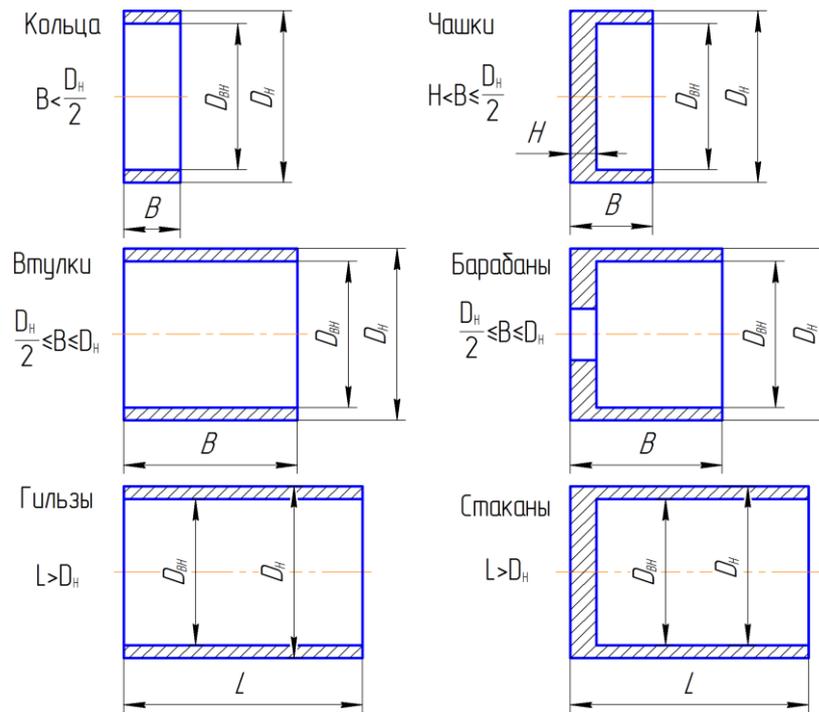


Рисунок 1.1. Классификация тонкостенных цилиндрических изделий

Принадлежность деталей к определенному классу характеризуется соотношением их габаритных размеров – длины L (высоты B) и наружного диаметра D_n . Наружные и внутренние поверхности ТЦИ могут быть образованы прямолинейными и криволинейными сплошными и прерывистыми поверхностями вращения, быть гладкими или ступенчатыми. Эти факторы, как и соотношение основных размерных параметров, являются определяющими при назначении метода обработки, технологической оснастки, режимов резания, режущих инструментов [20, 77, 106, 108].

В зависимости от условий, которые предъявляются к заготовке исходя из точности и качества поверхности, схема обработки может быть различной [118]. Так, обработка тонкостенных цилиндрических изделий 10-12-го качества и с шероховатостью поверхности 3-6-го класса ($Ra = 12,5-1,6$ мкм) осуществляется в большей степени на станках токарной группы точением одним либо несколькими резцами (токарные универсальные, токарно-револьверные, токарные многорезцовые, гидрокопировальные, токарные автоматы и полуавтоматы). В ряде всевозможных случаев (при снятии относительно больших припусков в неточных заготовках) обработку осуществляют методом черного шлифования.

Обработка валов наружных поверхностей тел вращения с точностью 7-9-го качества и 6-9-го класса шероховатости ($Ra = 1,6-0,2$ мкм) должна быть таковой: после чернового и получистового точения применяется шлифование или чистовое точение.

Более сложной является обработка наружных поверхностей 6-5-го качества точности и шероховатости поверхности 7-10-го классов ($Ra = 0,8-0,1$ мкм). После точения либо чернового шлифования – для достижения требуемых параметров точности размеров и качества поверхности применяют чистовое точение с последующим тонким точением; чистовое шлифование с последующей доводкой или суперфинишированием (а также выглаживанием, обкатыванием для уменьшения шероховатости).

Современная технология обработки ТЦИ базируется на использование следующих методов точения: свободное (статическое) точение, точение с предварительным увеличением жесткости объектов обработки, точение с упорами (люнеттами), точение с упругими деформациями объекта обработки, точение с вибрациями [10, 12, 13, 24, 39, 43, 47, 54, 77].

Свободное (статическое) точение. Данный метод обработки предусматривает использование схем построения техпроцесса, заключающихся в закреплении объекта обработки в штатных зажимных приспособлениях передней или задней бабок станка, вращении объекта и перемещения находящегося в контакте с ним режущего инструмента вдоль его наружной (внутренней) образующей. При обработке на расточных станках объект обработки неподвижен, но вращается режущий инструмент. Обработка может осуществляться одним или несколькими резцами одновременно. Никакой специальной технологической оснастки и приемов, изменяющих динамические характеристики процесса резания, и в первую очередь, жесткость объекта обработки, не применяется.

При консольном закреплении в зажимном устройстве (рисунок 1.2, а) деталь подвержена неравномерным радиальным деформациям от сил зажима P_z и сил резания P_y , вызывающим погрешности обработки в виде конусности по длине, огранности или эллипсности по диаметру, разностенности участков детали, нахо-

дящихся под действием усилий зажима и свободных от них. На практике эта схема закрепления используется при обработке тонкостенных колец, втулок, чашек и барабанов.

Обработка по схеме на рисунке 1.2, б, предусматривающей использование зажимных приспособлений передней и задней бабок станка и применяемой в основном для тонкостенных гильз и стаканов, дает погрешности обработки в виде корсетности (бочкообразности) и разностенности, огранности или эллипсности в местах закрепления, в зависимости от типа зажимного устройства. Из-за малой крутильной жесткости деталь в процессе обработки подвержена упругому закручиванию моментом, создаваемым силами трения в направляющих приспособления задней бабки и тангенциальной составляющей силы резания P_z , что вызывает крутильные колебания, негативно отражающиеся на качестве обработки.

При центрировании ТЦИ по внутреннему диаметру d , закреплении по торцам (рисунок 1.2, в) и нагружении двумя равными по величине крутящими моментами M_1 и M_2 , удается значительно снизить интенсивность крутильных колебаний. Однако присущими данной схеме обработки остаются погрешности формы в виде корсетности (бочкообразности) и несоосность внутренней и наружной поверхностей, которая порождает разностенность из-за гарантированного зазора между установочными поверхностями приспособления и поверхностью базового отверстия детали.

При равномерном распределении сил зажима P_3 по поверхности базового отверстия (рисунок 1.2, г) удастся снизить погрешности закрепления, повысить жесткость детали в радиальном направлении, уменьшив тем самым деформации от действия P_y . Широкая реализация данной схемы затруднена по причинам, связанным с созданием зажимных приспособлений, обеспечивающих равномерное распределение сил зажима, обладающих высокой жесткостью и широкими технологическими возможностями в отношении размерного диапазона закрепляемых деталей. Такая схема применима для ТЦИ всех классов, однако в настоящее время она используется чаще для обработки тонкостенных колец, втулок, чашек и барабанов, диаметром до 120 мм. Для деталей большего диаметра применение зажим-

ных приспособлений, способствующих реализации данного метода обработки, затруднительно из-за их большой массы и габаритных размеров.

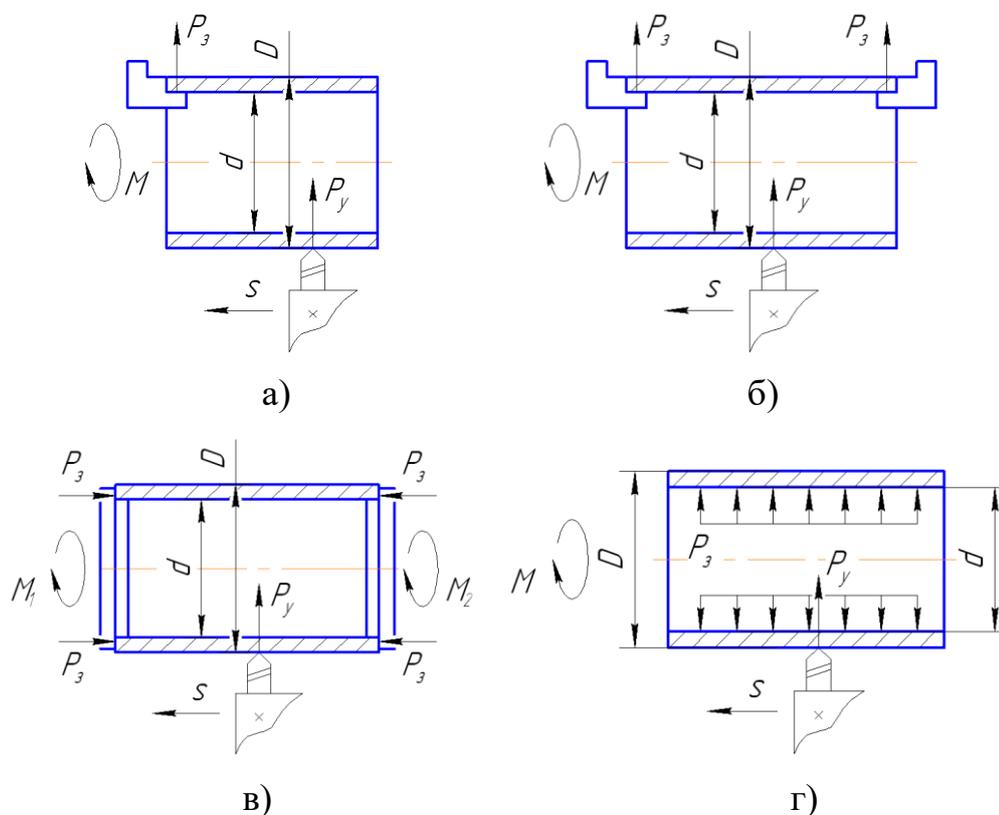


Рисунок 1.2. Методы свободного точения ТЦИ [77]

На практике при обработке ТЦИ с применением рассмотренных схем закрепления, достижение заданной точности обеспечивается максимальным снижением сил зажима, что влечет за собой снижение режимов обработки (глубины резания и подачи), а, следовательно, и производительности.

Точение с предварительным увеличением жесткости объектов обработки. Применение на практике данного метода обработки ТЦИ диктуется необходимостью увеличения их жесткости в радиальном направлении без применения сложной технологической оснастки (патронов и оправок), что способствует снижению деформаций от усилий зажима и резания [75, 77].

Простейшая реализация рассматриваемого метода в отношении тонкостенных колец возможна с помощью жестких конических центровых оправок (рисунок 1.3, а), воспринимающих действие P_y и создающих усилие закрепления за счет кольцевых напряжений в детали, величина которых изменяется вдоль оси

оправки вследствие конусности, переносимой на объект обработки и являющейся основной причиной возникновения погрешностей формы. Вторым недостатком является отсутствие точного позиционирования детали по длине оправки.

Тонкостенные втулки могут быть обработаны с помощью цилиндрических оправок, на которые они устанавливаются с натягом (рисунок 1.3, б), а их положение вдоль оси оправки фиксируется с помощью съемных упорных колец. Недостатки такого метода заключаются в возникновении погрешностей диаметрального размера после снятия детали и низкой универсальности в отношении размерного диапазона обрабатываемых деталей.

Снижение деформаций от усилий зажима, распространяющихся как по окружности, так и по длине объекта обработки, достигается применением разрезных обжимных (разжимных) колец переменного сечения, способствующих созданию равномерных кольцевых напряжений, направленных навстречу усилию зажима P_z , и увеличению жесткости объекта обработки в месте их приложения. Недостаток метода – невозможность обработки детали по всей длине за одну установку.

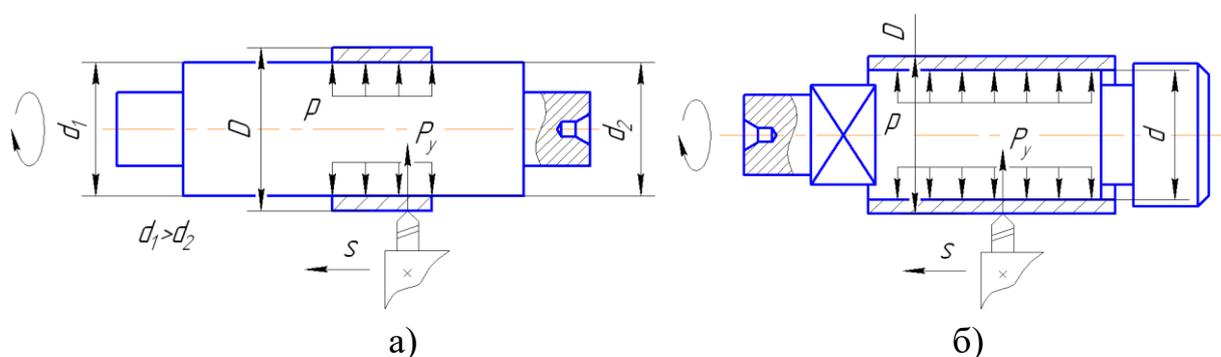


Рисунок 1.3. Методы точения ТЦИ с предварительным увеличением жесткости в радиальном направлении [77]

При обработке тонкостенных гильз с большими габаритными размерами достижение требуемой жесткости в радиальном направлении возможно с помощью твердых или жидких наполнителей, в качестве которых используются, например, смесь парафина с песком или нагнетаемое внутрь детали под давлением p машинное масло.

Увеличение радиальной жесткости может быть достигнуто за счет использования втулок из полиарилата. Втулки размещаются внутри объекта обработки с зазором, разогреваются до температуры размягчения, деформируются центробежными силами в радиальном направлении до контакта с объектом обработки и охлаждаются для сохранения достигнутых размеров. Затем детали обрабатываются с применением имеющихся в распоряжении зажимных устройств, и после охлаждения до более низких температур освобождаются от втулок, принимающих первоначальные размеры.

Недостатки этих методов заключаются в большом подготовительном времени, что негативно отражается на производительности и гибкости, а также в необходимости иметь специальные вспомогательные установки (печи, холодильники, насосы и др.).

Точение с упорами и люнетами. Суть данного метода обработки заключается в применении упоров и люнетов, находящихся в контакте с образующими поверхностями ТЦИ и воспринимающих действие на них составляющих силы резания, препятствующих тем самым появлению деформаций, приводящих к возникновению погрешностей формы и размеров [77].

Обработка тонкостенных гильз и стаканов может быть реализована с помощью неподвижного люнета, поддерживающего и центрирующего свободный конец растачиваемой детали, а также устраняющего ее пространственные смещения от сил резания. Однако при такой схеме обработки стенка детали подвержена локальным деформациям в зоне резания.

Кроме того, контактирование обрабатываемой детали с вращающимися роликами люнета приводит к возникновению неуправляемых вибраций, так как для устранения зазоров между деталью и роликами требуется приложить к последним определенные усилия прижатия.

Негативно отражается на точности обработки и тот факт, что действие на деталь радиальной составляющей силы резания P_y воспринимается небольшим количеством роликов (обычно 3...4), а, следовательно, сечение детали, расположенное в зоне контакта с роликами, подвергается неравномерным деформациям,

картина которых аналогична картине деформаций, имеющих место при закреплении в приспособлениях с сосредоточенными усилиями зажима.

Применение бесконтактных люнетов позволяет избежать указанных недостатков, но требует предварительно обработанных поверхностей. Центрирование детали относительно круговой опорной поверхности люнета обеспечивается подачей в радиальный зазор воздуха или жидкости под давлением.

Применение подвижных упоров (ПУ), воспринимающих действие P_y в сочетании с неподвижным люнетом (НЛ) (рисунок 1.4) способствует устранению локальных деформаций, но требует наличия у ТЦИ предварительно обработанных с соответствующей точностью направляющих поверхностей и высокоточного выполнения вращающегося упора. К недостаткам данной схемы обработки можно отнести перенос погрешностей формы направляющей поверхности на обрабатываемую и возникновение вибраций, источником которых являются направляющие качения ПУ и неравномерный характер сил трения, действующих между перемещающимся в осевом направлении роликом ПУ и направляющей поверхностью.

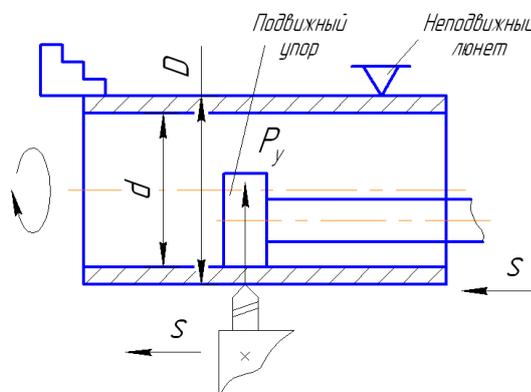


Рисунок 1.4. Метод токарной обработки ТЦИ с применением упора и люнета [77]

Точение с упругими деформациями. Особенностью данного метода обработки является нагружение обрабатываемой детали усилиями или моментами, вызывающими их направленное деформирование в пределах упругости и способствующими изменению механических свойств не только объектов обработки, но и всей технологической системы [77].

Изменение механических свойств, заключающееся в повышении жесткости и виброустойчивости, достигается деформированием объектов обработки либо в

радиальном или осевом направлениях, либо созданием в них крутильных деформаций. Упругодеформированное состояние детали, характеризующееся увеличением собственной частоты, снижает возможность возникновения автоколебаний, что способствует повышению качества обработки.

При обработке ТЦИ с соотношением $L/D \leq 2$ может использоваться способ, реализация которого заключается в упругом деформировании детали в радиальном направлении по всей длине вращающимися зажимными элементами, вызывающими за счет трения вращение детали с угловой скоростью. Усилие зажима P_z компенсирует действие радиальной составляющей силы резания P_y . Способ обладает расширенными технологическими возможностями в отношении размерного диапазона базовых поверхностей, но не обеспечивает высокой производительности. С его помощью удастся обеспечить равномерную толщину стенки по длине.

При обработке ТЦИ с соотношением $L/D \geq 10 \dots 12$ на качество и точность обработки влияет упругое деформирование (закручивание) детали вокруг продольной оси и крутильные автоколебания, возникающие за счет действия тангенциальной составляющей силы резания P_z . Устранение их влияния возможно за счет увеличения жесткости, что достигается нагружением детали моментом M_T (рисунок 1.5), создающим напряженное состояние в кольцевых сечениях, либо растягивающими усилиями F , вызывающими напряженное состояние в продольных сечениях.

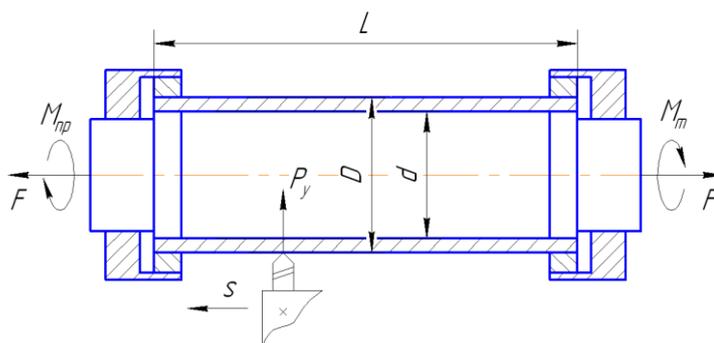


Рисунок 1.5. Метод обработки точением с приданием ТЦИ упругодеформированного состояния [77]

Точение с вибрациями. Сущность процесса вибрационного резания заключается в том, что на обычно принятую для данной операции кинематическую схе-

му накладывается дополнительное направленное вибрационное движение инструмента относительно заготовки [2, 4, 11, 70, 77, 80, 83, 84, 85, 94, 99, 110, 127].

Использование вибрационного резания способствует повышению производительности. При этом методе резания создаются предпосылки для уменьшения влияния составляющих силы резания на формообразование деталей, особенно нежестких; для улучшения обрабатываемости материалов; для повышения стойкости инструмента [77, 97, 98, 117, 141].

Анализ многочисленных результатов теоретических и практических исследований показывает, что одним из основных способов повышения точности обработки является уменьшение упругих отжати́й (деформаций) технологической системы путем повышения ее жесткости [34, 52, 76, 104, 136]. В работе [77] автор приводит пример технологической системы СПИД, предназначенной для обработки определенного ТЦИ и делает заключение, что станок, как элемент ТС, практически не участвует в процессе деформирования. Такое же заключение он делает в отношении других элементов ТС – приспособления и инструмента, сравнительная жесткость которых значительно превышает жесткость обрабатываемой ТЦИ. Значительное влияние на точность формообразования оказывает форма и качество поверхностей заготовок ТЦИ, зависящие от методов и средств накопления, транспортирования, ориентирования, загрузки и разгрузки.

Деформации при точении обязаны своим существованием радиальной составляющей силы резания, действующей в зоне прямого механического контакта резца с обрабатываемой поверхностью. В работе [77] автор предлагает следующие способы уменьшения деформации при точении: многопроходное точение при минимизации t , s , V ; создание противодействующих P_y усилий и напряжений; скоростное и вибрационное резание; вибрационное резание с негармоническими колебаниями.

В работах [59, 77, 79, 80] авторы подчеркивают, что шероховатость поверхности после резания с вибрациями уменьшается до теоретически возможной. При вибрационном резании авторы рассматривают механизм резания, нечувствительный к вибрациям, когда изменение подачи и глубины резания приблизительно

равно нулю. Таким образом, шероховатость обработанной поверхности приближается к теоретической.

В соответствии с общепринятой в строительной механике терминологией тела, ограниченные криволинейными замкнутыми поверхностями, расположенными на близком расстоянии друг от друга, относятся к оболочкам [31, 57, 86]. В этих трудах отмечается, что при нагружении оболочки возможны различные виды напряженного состояния. В оболочке может возникать только растяжение или сжатие без изгиба стенки (безмоментное состояние); растяжение совместно с изгибом (смешанное состояние) или только изгиб без растяжения (моментное состояние). В общем случае напряженного состояния в стенке оболочки возникают нормальные напряжения растяжения и изгиба, распределенные по толщине так, как показано на рисунке 1.6 (σ_m – напряжение, направленное по меридиану; σ_t – по касательной к окружности).

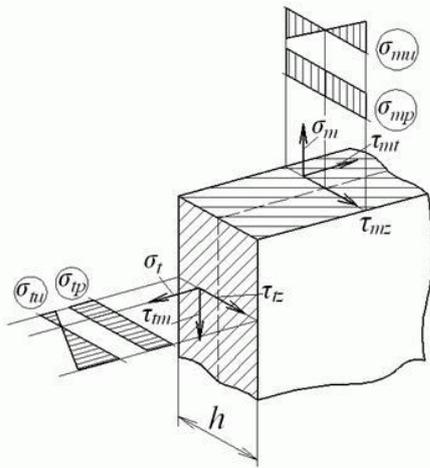


Рисунок 1.6. Распределение нормальных напряжений растяжения и изгиба

В работах [57, 77, 86] уделено внимание вопросам упругих деформаций тонкостенных цилиндрических деталей при обработке. Это деформация цилиндра при действии радиальной составляющей силы резания (рисунок 1.7), деформации при обработке торцовых поверхностей (рисунок 1.8), деформации обрабатываемых деталей при осевом растяжении (рисунок 1.9), деформации при нагружении обрабатываемой ТЦИ внешним давлением и осевыми растягивающими силами (рисунок 1.10).

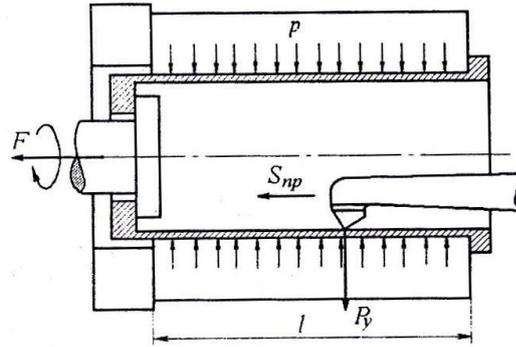


Рисунок 1.10. Определение деформаций ТЦИ при нагружении внешним давлением и осевой силой [77]

К настоящему времени в мировой практике металлообработки разработано большое количество методов обработки деталей.

По своей сущности методы обработки усложнились. Интенсивность протекания процессов разрушения, деформирования, преобразования материала деталей значительно возросла. В разработке и совершенствовании методов обработки имеет место тенденция одновременного воздействия на обрабатываемые заготовки и детали механических нагрузок и химических веществ, теплового или магнитного полей, электрической и лучевой энергии, энергии элементарных частиц и т.д. в различном их сочетании.

Все большее внимание уделяется развитию и совершенствованию методов обработки со съемом относительно небольших слоев металла и созданию на поверхности и в поверхностном слое необходимых физико-механических свойств и шероховатости. Это объясняется непрерывным совершенствованием методов получения заготовок, уменьшением припусков на механическую обработку, ростом требований к точности и необходимостью повышения качества и эксплуатационных свойств деталей и изделий, применением в машиностроении новых конструкционных материалов. Отмечается стремление к существенному повышению скорости резания и микрорезания (скоростная, сверхскоростная обработка); дальнейшее развитие прогрессивных методов обработки.

Под методом обработки понимают комплекс условий, характеризующих взаимодействие обрабатывающей среды или инструмента и обрабатываемой заго-

товки (детали), используемых для решения одной или совокупности технологических задач: изменения формы, размеров и взаимного расположения элементов детали, состояния и свойств ее материала, поверхности и поверхностного слоя [118].

В данной работе не будем подробно рассматривать традиционные методы обработки изделий, так как они достаточно полно исследованы и представлены в работах отечественных и зарубежных авторов [2, 4, 15, 16, 19, 22, 33, 37, 47, 50, 61, 66, 67, 69, 73, 78, 81, 82, 87, 92, 103, 124, 125, 129, 130, 131, 132, 134, 135, 137, 139, 140]. В этих и других работах выполнены глубокие исследования, связанные с различными методами, способами и принципами обработки изделий и обеспечения заданных показателей качества и производительности обработки.

К методам обработки тонкостенных цилиндрических изделий можно отнести следующие методы:

- методы механической обработки:
- металлическим лезвийным инструментом (тонкое точение (расточивание));
- абразивно-алмазным инструментом (шлифование, хонингование, суперфиниш, притирка (доводка), полирование, микрошлифование);
- свободным абразивом (виброабразивная обработка, струйно-абразивная обработка, галтовка, магнитно-абразивное полирование);
- пластическим деформированием (обкатывание, раскатывание, выглаживание, дорнование (калибрование));
- методы электрофизической обработки (электроэрозионное шлифование);
- методы химической обработки (химическое полирование);
- методы магнитной обработки (магнитно-импульсная обработка);
- методы лучевой обработки (светолучевая и электронно-лучевая обработка).

Рассмотрим некоторые особенности методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

При эксплуатации изделий с тонкими стенками основной причиной выхода их из строя является несоответствие технологических параметров детали предъявляемым требованиям, а именно:

- выдерживание размеров наружного и внутреннего диаметров с определенным качеством;
- прямолинейность оси отверстия и образующей;
- правильность цилиндрической формы отверстия (отсутствие конусности, овальности и огранки);
- перпендикулярность торцов цилиндрической детали к оси;
- соблюдение требуемой шероховатости обрабатываемого отверстия и обеспечение необходимых свойств поверхностного слоя.

Поэтому для решения вопросов обеспечения заданных параметров отклонений формы и расположения внутренних цилиндрических поверхностей, необходимых параметров качества наружных и внутренних цилиндрических поверхностей необходимо большое внимание уделять проектированию рациональной структуры технологических процессов. Эти вопросы затронуты в следующих работах ведущих ученых и специалистов [16, 32, 38].

Многообразие видов механической обработки, станков, инструментов и материалов для изготовления деталей машин предоставляет широкие возможности в обеспечении требуемых параметров качества поверхностного слоя наружных и внутренних цилиндрических поверхностей, определяющих эксплуатационные свойства изделий [61, 66, 89, 100, 101, 102, 113].

Обрабатывать наружные и внутренние цилиндрические поверхности можно со снятием и без снятия стружки [66, 67, 125, 138]. Повышение качества со снятием стружки можно добиться лезвийным и абразивным инструментами. Лезвийный способ осуществляется точением, растачиванием (в частности, тонким алмазным). Абразивный способ выполняют шлифованием, хонингованием, суперфинишированием (суперфиниш), микрошлифованием, притиркой (доводка), полированием [1, 15, 21, 72, 118, 126, 133].

Повышение качества наружных и внутренних цилиндрических поверхностей без снятия стружки производится обкатыванием, раскатыванием, выглаживанием, калиброванием [4, 15, 50, 71, 73, 93, 118].

Тонкое точение (расточивание) осуществляется на весьма малых величинах подач ($S = 0,02-0,12$ мм/об), глубиной резания t (от 0,002-0,006 до 0,3 мм) и высокими скоростями резания V (от 100 до 1000 м/мин). Силы резания при этом относительно низкие. Соответственно, усилия закрепления обрабатываемых деталей также более низкие, что позволяет обрабатывать нежесткие детали, исключая их деформацию при закреплении (в патроне, оправке). Для тонкого точения применяют специализированные быстроходные станки высокой точности [1, 62, 101].

Очень часто чистовая отделка производится методом тонкого алмазного точения (расточивания) [1, 34, 37, 62]. В большой скорости, малой глубине резания и малой подаче заключается сущность метода.

Данный метод имеет следующие достоинства и преимущества [62]:

- легко достигается высокая точность и точность по 5÷6 квалитету точности на овальность и конусность отверстий диаметром 100-200 мм;
- отсутствие в порах обработанной поверхности абразивных зерен (шаржирование абразивных зерен);
- простая конструкция режущего инструмента, оснащенного алмазом или твердым сплавом;
- возможность получения низкой шероховатости.

Трудности при обработке оболочковых деталей возникают при решении вопроса их закрепления на станке.

Наибольшее влияние на качество обработанных тонкостенных цилиндров оказывает зажимное приспособление, поэтому решение проблемы закрепления таких заготовок сводится к исследованиям в области технологической оснастки. Для обработки таких заготовок наиболее рационально применять приспособления с распределенными силами закрепления. Такие приспособления ориентированы на равномерное распределение усилий закрепления или стремящиеся к нему (множественность точек приложения). Считается, что равномерно распределен-

ные силы приводят к равномерной деформации тонкостенной поверхности оболочковой заготовки. Однако на практике при обработке тонкостенных цилиндров прецизионных деталей обнаружилось погрешности формы. Это связано с так называемым краевым эффектом. Наиболее заметно влияние краевого эффекта при обработке деталей с жесткими требованиями отклонения формы оболочковой поверхности. Эти отклонения сравнимы с величиной погрешности формы. В таком случае необходимо прибегать к преднамеренному искажению поверхности цилиндра. Суть преднамеренных искажений состоит в создании сил закрепления, распределенных по определенному закону. В настоящее время ведутся работы в области технологии машиностроения, связанные с заданным неравномерным распределением сил закрепления. Но оснастка, обеспечивающая любой заданный закон распределения, еще не получила распространения на производстве. Явления, связанные с преднамеренными искажениями, рассматривались в работах Ш.М. Билика, А.М. Дальского, М.П. Новикова и др. ученых.

При растачивании ТЦИ наблюдается искажение обрабатываемого отверстия, вызываемое деформацией стенок кулачками трехкулачкового патрона. После снятия детали со станка деформированные стенки занимают прежнее положение и расточенное отверстие приобретает огранку. Поэтому для закрепления тонкостенных заготовок применяют широкие (сегментные) или удлиненные кулачки. В отдельных случаях на заготовку надевают разрезную втулку [33]. Наружное обтачивание и внутреннее растачивание ТЦИ успешно выполняют при закреплении заготовки на гидропластной оправке и в гидропластном патроне соответственно.

В качестве окончательной обработки ТЦИ применяют главным образом абразивную обработку. На этой стадии технологического процесса окончательно формируются параметры поверхностного слоя и размеры готовой детали.

Но не стоит упускать из вида и предыдущие стадии обработки, так как для таких деталей особенно остро стоит вопрос о технологической наследственности. Вопросам наследственности посвящены работы таких ученых, как А.М. Дальский, А.Г. Колесников, А.М. Дмитриев, А.С. Васильев, Б.М. Базров, Ю.А. Шачнев, А.И. Кондаков, П.И. Ящерицин, Э.В. Рыжов, А.Г. Суслов и другие.

Наследственные связи как повышают, так и понижают показатели качества, поэтому важно на каждом этапе изготовления прецизионных ТЦИ учитывать их влияние на характеристики детали. Явление технологической наследственности позволяет формировать оптимальные технологические среды и изменять свойства предмета обработки в желаемом направлении, в том числе, на жизненный цикл. Одним из важнейших факторов, который влияет на качество деталей, является сила закрепления заготовки в технологическом приспособлении. Значимость этого фактора для качества деталей отмечалась еще в работах основоположников машиностроения В.М. Кована, В.С. Корсакова, А.П. Соколовского, А.Б. Яхина.

Наложение сил закрепления на обрабатываемую заготовку приводит к возникновению деформаций и, как следствие, возникновению погрешности. Для тонкостенных изделий, характеризующихся малой жесткостью, погрешности, связанные с наложением сил закрепления, могут принимать весьма значительных величин, поэтому этот фактор является определяющим при конструировании приспособления и подборе оптимальных режимов обработки. Особое внимание на это следует обращать внимание при шлифовании прецизионных тонкостенных цилиндров, так как в этом случае погрешности от сил закрепления могут превысить допуск на их изготовление и вывести их из разряда прецизионных.

Так же при шлифовании тонкостенных цилиндров возникают высокие температуры в зоне резания, в результате чего могут возникнуть проблемы, связанные с прижогами, изменениями структуры металла и возникновением внутренних напряжений. Отсюда вытекает еще одна проблема – подбор СОТС и определение наиболее приемлемой схемы охлаждения.

Тонкое шлифование обеспечивает достижение 1-2-го класса точности (6-7-го качества) и шероховатость $Ra = 0,16-0,08$ мкм. Оно осуществляется мелкозернистым кругом при повышенной его скорости (свыше 40 м/с), при относительно меньшей скорости вращения обрабатываемой заготовки (до 10 м/мин) и малой глубине врезания (до 50 мкм); процесс сопровождается обильной подачей СОЖ [66].

Круглое наружное шлифование осуществляется на универсальных и специальных круглошлифовальных станках, а шлифование отверстий производится на внутришлифовальных станках следующими способами [66, 74 101]:

- с неподвижной деталью на станках с планетарно вращающимся шпинделем;
- с вращающейся деталью, закрепленной в патроне;
- с вращающейся незакрепленной деталью – бесцентровое шлифование.

С помощью такой обработки можно получить высокую точность по диаметру, а точность на concentricity и параллельность осей внутреннего отверстия и наружной поверхности до 0,003 мм. Такой метод можно использовать для отверстий от 10 до 200 мм [66]. Шлифование позволяет получить 5÷8 квалитеты и шероховатость $Ra = 0,2 \dots 2,5$ мкм [66].

Сущность метода хонингования заключается в механической доводке предварительно расточенного или шлифованного отверстия специальной вращающейся головкой (хоном), кроме того имеющей возвратно поступательное движение [44].

Хонингование по сравнению с шлифованием имеет следующие преимущества [66]: отсутствие вибраций, что часто бывает у внутришлифовальных станков; обеспечение цилиндричности поверхности отверстия; плавность хода хонинговальной головки.

Хонингование позволяет получить 4÷6 квалитеты и шероховатость $Ra = 0,04 \dots 0,6$ мкм [44].

Притирка производится на токарных, шлифовальных и специальных притирочных станках [11, 45]. Процесс притирки заключается в удалении шероховатости с поверхности медными или чугунными притирами, после предварительной чистовой обработки. Эти притиры при помощи пружин создают давление на цилиндрическую поверхность и производят попеременные вращательные движения на пол оборота в обоих направлениях с одновременным перемещением вдоль оси обрабатываемой поверхности.

Такой способ обработки позволяет получить $4\div 5$ качества точности с параметрами шероховатости поверхности $Ra = 0,04 \dots 0,2$ мкм [66]. Однако этот способ не исправляет ни овальность, ни конусность, производится он медленно, вследствие чего является малопродуктивным и поэтому в машиностроении используется сравнительно редко.

Полирование обеспечивает шероховатость поверхности $Ra = 0,16 \div Rz = 0,025$ мкм и относится к безразмерной обработке, т.е. не влияет на форму и размеры обрабатываемых изделий [66]. В большинстве случаев полирование приводит к образованию сжимающих остаточных напряжений в тонком поверхностном слое, удаляя при этом дефекты предыдущих операций в виде разрушенной структуры, микротрещин, способствуя повышению циклической прочности, износостойкости, отражательной способности коррозионной стойкости поверхности. Глубина деформируемого слоя при полировании минимальна и может составлять от нескольких микрометров до десятых долей микрометра.

Микрошлифование – метод обработки, осуществляемый при замедленном вращении круга и повышенной скорости вращения шлифуемой заготовки. Микрошлифование обеспечивает съём припуска в пределах 5-7 мкм, в результате чего удаляются гребешки микронеровностей исходной поверхности и частично исправляется форма изделия. Окружная скорость обрабатываемого изделия $V_u = 150-500$ м/мин, скорость круга $V_k = 10$ м/мин. Микрошлифование осуществляется с постоянным прижимом круга к изделию с помощью пружины усилием $1 \cdot 10^2 - 2 \cdot 10^2$ Н. Продольная подача $S_o = 0,03$ мм/об. Обработка протекает с подачей СОЖ в виде смеси по 50% веретенного масла и керосина. В качестве оборудования используются модернизированные токарные станки с установленной на суппорте шлифовальной бабкой. Инструментом является мелкозернистый шлифовальный круг [66].

Сущность магнитно-абразивного полирования (МАП) заключается в том, что обрабатываемой поверхности детали или порошку с магнитными и абразивными свойствами, помещенными в магнитное поле, сообщают принудительное движение относительно друг друга. Съём металла осуществляется в результате

силового воздействия порошка на поверхность детали и указанных относительных движений [2].

МАП снижает шероховатость обрабатываемой поверхности с $Ra = 1,25-0,32$ до $Ra = 1,25-0,32$ мкм, улучшает отдельные характеристики точности геометрической формы детали: уменьшает волнистость и гранность; обеспечивает высокую интенсивность удаления металла (до 1 мкм/с на диаметр; за 10-50 сек. магнитного времени съём составляет 0,01-0,05 мм), сохранение размеров, полученных в результате предшествующей операции, в пределах допуска, повышение контактной прочности и износостойкости деталей в 1,5-2 раза.

Обработка поверхностей без снятия стружки заключается в их обкатывании, раскатывании, выглаживании, а также нанесении защитных покрытий на цилиндрические поверхности изделий [4, 15, 50, 73, 118].

При обкатывании и раскатывании тонкостенных деталей точность их размеров можно повысить на 10...20%, а отклонение формы при этом составит 10...30 мкм.

Обкатывание осуществляется специальным инструментом – обкаткой. Ему предшествуют операции обработки металлическим лезвийным инструментом или абразивным инструментом. Достижимые результаты: шероховатость поверхности изменяется в пределах 1-3-го класса; глубина (толщина) упрочненного слоя зависит от состояния материала детали и составляет от 0,05-0,1 мм до 1 мм и более. Для осуществления процесса обкатывания используются универсальные металло-режущие станки (токарные, расточные).

Раскатывание применяется для получения плотной и гладкой поверхности отверстия и производится стальными закаленными и отшлифованными роликами бочкообразной формы в количестве 10-12 штук, располагающихся в стальном корпусе, который служит для них опорной поверхностью. Однако, вследствие большого давления на стенки отверстия, неравномерной толщины стенок и неоднородности материала детали возникают трудности получения точного цилиндрического отверстия и это является главным недостатком раскатывания. Также это связано с тем, что иногда наблюдается закатывание заусенцев в стенки отвер-

ствия, что может вызвать нежелательные последствия при эксплуатации изделия. Раскатывание практически не меняет исходную точность и позволяет получить $Ra = 0,21 \dots 1,2$ мкм [118]. Процесс осуществляется на токарных и специальных раскатных станках.

При выглаживании поверхностей инструмент (алмаз, смонтированный в державке) прижимается с определённой силой к обрабатываемой поверхности [50, 55, 73, 118].

В процессе выглаживания поверхностей инструмент в месте контакта деформирующего элемента и обрабатываемой детали возникают значительные контактные напряжения. При определённом усилии выглаживания происходит пластическая деформация поверхностного слоя, в результате чего сминаются микронеровности и изменяются физико-механические свойства поверхностного слоя. Выглаживанием обрабатываются наружные и внутренние поверхности вращения, на токарных, карусельных, расточных и др. станках.

Алмазное выглаживание проводится копирующим инструментом. Поэтому отклонения формы в продольном и поперечном сечениях изменяются незначительно, а размер детали (за счёт смятия исходных микронеровностей) – на 11-15 мкм. Точность обработки при этом может несколько снизиться. В связи с этим целесообразно на предшествующем переходе обеспечивать точность размеров на 20-30% выше заданной точности для окончательно обработанной детали.

При правильно подобранных режимах выглаживания микронеровности на поверхности могут быть уменьшены в несколько раз (до $Ra 0,1 \dots 0,5$), микротвёрдость увеличивается на 5-60% (при глубине наклепанного слоя до 400 мкм).

На выглаженной поверхности возникают значительные остаточные напряжения сжатия. Например, величина наибольших остаточных напряжений для образцов из стали 45 после нормализации составляет 200...350 МПа, после закалки – 700...1000 МПа.

Детали с поверхностью, обработанной алмазным выглаживанием, обладают хорошими эксплуатационными качествами: высокой износостойкостью и усталостной прочностью.

Таким образом, на основании выполненного анализа различных методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий можно отметить, что они позволяют выполнять обработку поверхностей высокого качества и заданными параметрами точности. Вместе с тем можно отметить, что большинство из методов обработки рассматриваются авторами как обработка цилиндрических изделий не с тонкими стенками.

Здесь заметим, что в процессе эксплуатации тонкостенных цилиндрических изделий в машинах и технологических системах поверхности испытывают неравномерные нагрузки, износ рабочих поверхностей, кромочные контакты, которые вызывают при их эксплуатации неравномерное действие эксплуатационных функций.

Заметим еще, что в настоящее время к рабочим поверхностям детали с тонкими стенками в зависимости от условий эксплуатации устанавливаются определенные требования в отношении основных свойств (износостойкость, жаростойкость, коррозионная стойкость и др.). Свойство поверхности определяет эксплуатационную надежность детали.

Таким образом, анализ литературных источников, касающихся обработки тонкостенных цилиндрических изделий показал, что в настоящее время существует множество методов обработки цилиндрических изделий. Эти методы позволяют обеспечить заданные параметры качества и производительности обработки цилиндрических изделий, но не учитывают толщину стенки изделия.

Поэтому выполненные исследования показывают, что в настоящее время необходимы методы для дальнейшего повышения показателей качества и производительности обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Особенно это необходимо для изделий, работающих в зависимости от особенностей их эксплуатации в технологической системе. Это обусловлено непрерывным научно-технологическим прогрессом и потребностью существенного повышения свойств тонкостенных цилиндрических изделий.

1.2 Исследования комбинированных методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий

Современные требования к деталям машин таковы, что традиционные методы обработки часто не позволяют эффективно получать необходимые значения параметров качества поверхностей: твердости, прочности, вязкости, износостойкости и других характеристик.

Накопленный опыт показывает, что не существует универсальных методов обработки деталей из различных конструкционных материалов, так как каждый имеет свою конкретную область рационального применения. Технолог и конструктор должны выбрать высокоэффективный метод обработки из большого числа возможных или создать на основе их совмещения комбинированный метод изготовления детали. Назначение рациональных режимов для высокоэффективных методов обработки проводят исходя из заданных технико-экономических ограничений как по качеству поверхностей, так и по условиям эксплуатации детали.

На предприятиях машиностроения все шире применяют комбинированные методы термомеханической, электрофизической и ионно-лучевой обработки, в основу которых положено использование высокопроизводительных режущих и деформирующих инструментов, а также плазменных, электродуговых, электронных, ионных и других источников концентрированной энергии.

Для дальнейшего повышения показателей качества и эффективности обработки изделий наиболее целесообразно применение комбинированной обработки изделий.

Методами комбинированной обработки называют методы, в которых процесс преобразования, нанесения или удаления обрабатываемого материала происходит в результате протекания двух и более воздействий, осуществляемых по своему механизму [2, 4, 49, 67, 81, 82, 94, 99, 118, 119, 120, 124, 127, 128].

Создание новых методов комбинированной обработки рекомендовано проводить по трем основным направлениям:

- применение интенсифицирующих факторов путем использования дополнительных потоков вещества в энергии;
- изменение кинематических схем обработки при введении дополнительных видов движений;
- совмещение дополнительных воздействий потоками вещества и энергии с дополнительными движениями формообразующих инструментов.

При создании методов комбинированной обработки традиционно выделяют три вида совмещения воздействий:

- 1) совмещение только в пространстве, но при воздействии с определенным сдвигом во времени;
- 2) совмещение во времени, но при разнесении областей воздействий в пространстве;
- 3) совмещение как в пространстве, так и во времени.

Первые два вида совмещения воздействий проходят последовательно во времени или в пространстве и имеют только различные организационные признаки: единство предмета обработки или оборудования. Последнее совмещение происходит параллельно при единстве предмета обработки и оборудования. Поэтому главным признаком комбинированной обработки, при двух и более воздействиях, является их единый механизм.

Таким образом, под комбинированной обработкой следует понимать воздействие потоками вещества и энергии, протекающее последовательно или параллельно [118]. При последовательном протекании предыдущее воздействие оставляет изменения, влияющие на последующие, т.е. происходит наследование свойств. Параллельные воздействия образуют единый механизм совместных действий в результате их самоорганизации.

В данной работе не будем подробно рассматривать классификацию комбинированных методов обработки, так как они достаточно полно исследованы и представлены в работах отечественных и зарубежных авторов [14, 118, 124, 127]. Мы только рассмотрим по каким признакам осуществляется классификация ком-

бинированных методов обработки и какие существуют методы обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Классификация комбинированных методов обработки может осуществляться по ряду признаков [118]:

1. По количеству и природе подводимых видов энергии (энергетических воздействий).
2. По способу подвода энергии в зону обработки.
3. По характеру распределения энергетических воздействий в пространстве и времени.
4. По количественным характеристикам энергетических воздействий.

Классификация по первому признаку основывается на использовании известных видов энергии: механической, электрической, лучевой, энергии химических реакций, термической, магнитного поля, акустического поля, путем комбинированного их воздействия (двух и более видов энергии) на материал обрабатываемой заготовки.

Второй признак – способ подвода энергии в зону обработки – делит комбинированные методы на подклассы методов последовательного и параллельного энергетического воздействия. К первым относится, например, механическая обработка с подводом в зону резания электрического тока. Ко вторым относится резание с предварительным подогревом слоя материала индуктором токов высокой частоты, размещаемым на суппорте станка, впереди резца.

Третий признак делит комбинированные методы обработки на группы, дифференцирующие характер подвода энергии в зону обработки в пространстве и во времени на методы, воздействующие на весь объем материала заготовки, методы обработки поверхностей, методы точечного (локального) воздействия с непрерывным и дискретным подводом энергии.

Четвертый признак – количественное соотношение совмещаемых процессов – определяет степень взаимодействия различных видов физико-химического воздействия.

К комбинированным методам обработки можно отнести следующие методы [11, 17, 24, 29, 30, 58, 59, 67, 70, 87, 118]:

- методы механохимической обработки (вибрационная механохимическая обработка, притирка и полирование с применением ПАВ);
- электромеханическая обработка (электромеханическое точение и выглаживание, электроконтактная обработка);
- механотермическая обработка (высокотемпературная и низкотемпературная механотермическая обработка, вибрационная механотермическая обработка, фрикционная резка трением, плазменно-механическая обработка, теплоструйно-абразивная обработка, теплоструйная (газоплазменная обработка));
- методы электрохимической обработки (электрохимическое полирование, электрохимическая размерная обработка);
- механомагнитная обработка (магнитно-абразивная обработка, вибрационная магнитно-абразивная обработка, магнитогидроабразивная обработка);
- методы механоакустической обработки (вибрационная стабилизирующая обработка (вибростарение), вибрационная штамповка);
- химико-термическая обработка (цементация, азотирование, цианирование, силицирование, сульфидирование, алюминирование, борирование, термомагнитная обработка);
- механоэлектрохимическая обработка (анодно-механическая обработка, виброабразивная электрохимическая обработка, абразивно-катодная обработка);
- методы механохимико-термической обработки (вибрационная механохимико-термическая обработка);
- механотермомагнитная обработка (вибрационная механотермомагнитная обработка);
- механотермоакустическая обработка (обработка взрывом, ультразвуковая абразивная обработка).

Рассмотрим некоторые особенности комбинированных методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Абразивные методы обработки с применением активных технологических жидкостей [2, 4, 118]. Сущность данных методов состоит в комплексном физико-химическом воздействии абразивного зерна и технологической жидкости на материал деталей в процессе обработки. При обработке детали могут обрабатываться в несколько переходов: обдирка до достижения шероховатости $Ra = 2,6-1,25$ мкм; шлифование до $Ra = 1,25-0,32$ мкм; предварительно полирование до $Ra = 0,16$ мкм; окончательное полирование до $Ra = 0,32-0,04$ мкм; зеркальное полирование до $Ra = 0,08-0,02$ мкм. Обработка ведется на специальных полировальных станках, бесцентрово-полировальных станках, полуавтоматах и автоматах. Достоинство рассмотренного метода является сравнительно высокая производительность и высокое качество обработки, а недостатками – трудности, возникающие при обработке мелких деталей, шаржирование обрабатываемой поверхности.

При абразивно-электрохимической обработке сохраняются все основные физические закономерности, присущие составляющим ее процессам – анодному электрохимическому растворению и механическому резанию со снятием микростружки [2, 118].

Одной из особенностей абразивно-электрохимической обработки является способ подачи электролита в зону обработки. Электролит подается в зону обработки свободным поливом на инструмент. Инструмент рабочей частью увлекает электролит в зону обработки и обеспечивает ему ту же скорость, с которой он вращается.

В результате проведенных исследований [4] установлено, что одним из наиболее существенных факторов, тормозящих анодное растворение металла, является образование на его поверхности оксидных пленок. Из различных способов депассивации наиболее эффективным способом удаления подобных пленок является механический, т.е. шлифовальный круг. Таким образом, в каждой точке обрабатываемой поверхности происходит непрерывное чередование процессов микрорезания и электрохимического растворения.

Введение в зону резания ультразвуковых колебаний повышает производительность в 2-2,5 раза при улучшении качества поверхности. Эти методы приме-

няются для обработки нежестких заготовок, т.к. силы резания при использовании комбинированного подобного способа обработки незначительные [59, 60, 115, 127].

Электрохимическое круглое шлифование, электрод-инструмент – абразивный или алмазный круг с электропроводной связкой вращается со скоростью $V_{\text{окр}}$ и перемещается в радиальном направлении, заготовка совершает возвратно-поступательное движение и вращается со скоростью V_z вокруг своей оси. Электролит через сопло подается на электрод-инструмент и попадает в рабочую зону [2, 4, 67, 118]. Применяется для шлифования наружных и внутренних поверхностей.

Преимущества электрохимического шлифования по сравнению с обычным шлифованием: исключаются сколы и трещины при обработке хрупких сплавов; исключаются прижоги и другие дефекты при обработке нержавеющей стали; резко повышается производительность при шлифовании твердых сплавов.

При круглом электрохимическом шлифовании наружных и внутренних поверхностей (с последующим чистовым шлифованием без тока) точность достигает порядка 0,005-0,01 мм [118].

Анодно-механическая обработка основана на сочетании электротермических и электромеханических процессов [2, 4, 49, 67, 118]. Заготовку подключают к аноду, а инструмент – к катоду. Обработку ведут в среде электролита (водный раствор жидкого натриевого стекла). Рабочие движения такие же, как при механической обработке резанием. Электролит в зону обработки подают через сопло. Этим способом обрабатывают поверхности тел вращения; шлифуют поверхности, имеющие форму тел вращения; полируют поверхности.

Термомагнитная обработка основана на совместном воздействии на заготовку теплового поля, повышающего пластичность металла, и импульсного магнитного, осуществляющего формоизменения [118]. Использование совместного воздействия на материал детали теплового и магнитного полей с целью влияния на его структуру и механические свойства затрудняется вследствие потери магнитных свойств всех материалов в процессе их нагрева.

Операция ультразвуковой механической обработки резанием связана со снятием поверхностного слоя материала с заготовки и образованием стружки [59, 60, 115]. При этом формообразование новых поверхностей сопровождается деформированием и разрушением поверхностных слоев материала.

Наложение УЗК на режущие инструменты обеспечивает: возможность резания инструментами с большими передними углами [3]; изменение силы резания по синусоидальному закону [18]; уменьшение среднего сопротивления резания; получение тонкой стружки, возможность определения толщины стружки; повышение точности обработки, значительное снижение средней температуры резания, исключение образования нароста (при наложении УЗК в направлении главной составляющей силы резания). Во всех случаях УЗК позволяет: уменьшить пластическую деформацию обрабатываемой поверхности; исключить образование заусенцев, обеспечить плавный ход стружки, улучшить смазывающее и охлаждающее действие СОЖ [46]; повысить стабильность микрогеометрических параметров обрабатываемой поверхности, износостойкость и коррозионную стойкость деталей [5, 6, 7, 8, 9, 48, 51].

Ультразвуковая механическая обработка резанием цилиндрических поверхностей реализуется на универсальных и специальных металлорежущих станках [91].

Стабилизирующая и упрочняющая обработка осуществляется преимущественно с использованием колебаний меньших частот (10-50 Гц) при амплитуде 0,5-1 мм.

Можно отметить, что решение вопросов проектирования процессов комбинированной обработки изделий машиностроения представлено в работах [2, 4, 55, 67, 118, 128]. В этих трудах отмечается, что в настоящее время традиционные методы изготовления изделий уже исчерпали свои возможности в направлении повышения качества изделий, и сейчас необходимо более шире использовать комбинированные методы изготовления изделий. Комбинированные методы обработки изделий позволяют обеспечивать качественно новую совокупность свойств изделий за счет реализации не менее двух различных методов технологических воз-

действий. В данных работах разработаны все необходимые основы создания технологических процессов комбинированной обработки изделий. Вместе с тем, в этих работах нет данных об особенностях реализации комбинированных методов обработки для ТЦИ. Поэтому исследования этих вопросов и установления закономерностей реализации операций технологического процесса является актуальной проблемой в технологии машиностроения.

В работе [114] представлены следующие этапы комплексного технологического процесса для изготовления изделия, а именно: получение материала заготовки, изготовление заготовки, механическая обработка, химико-термическая обработка, отделочные и финишные методы обработки, операции консервации и упаковки.

Функционально-ориентированные технологии имеют определенные особенности построения и строятся в соответствии со следующей последовательностью: комплексный анализ изделия и установление особенностей действия функций; деление изделия на функциональные элементы; определение необходимых параметров функциональных элементов; классификация и объединение функциональных элементов; определение необходимых технологических воздействий для каждого функционального элемента изделия; ориентация технологических воздействий и свойств изделия на базе группы особых принципов ориентации; разработка и реализация всех видов обеспечения; определение организационной формы и структуры технологического процесса; реализация технологических воздействий по уровням глубины технологии; обеспечение заданной совокупности свойств всего изделия в целом за счет местного обеспечения свойств [63]. Вся эта последовательность представлена автором для общей методики синтеза ФОТ, в дальнейшем предстоит построить методику синтеза ФОТ на базе определенного ТЦИ.

Также можно отметить, что в работах [29, 49, 67, 118] представлены данные по повышению качества изделий машиностроения за счет применения комбинированных методов обработки. В этих трудах авторы представляют данные по реализации комбинированных методов обработки. Однако здесь не представлены

данные для реализации комбинированных методов обработки для ТЦИ, а также нет сведений по созданию структуры технологических процессов комбинированной обработки изделия с учетом закономерностей реализации операций по ходу процесса.

Таким образом, выполненный анализ литературных источников по вопросу синтеза технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ показывает отсутствие данных по синтезу таких технологических процессов.

Выполненные предварительные исследования технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ показали, что между операциями технологического процесса действуют определенные связи. Поэтому для выполнения дальнейшего повышения параметров качества и производительности изготовления изделий с тонкостенными цилиндрическими поверхностями необходимо установление закономерностей синтеза подобных технологических процессов. Для реализации технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ необходима также разработка технологического обеспечения, обеспечивающего реализацию заданных операций процесса.

На основании вышеизложенного можно сказать, что в настоящее время назрела необходимость в следующем:

- установлении закономерностей формирования технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ;
- определении связей между операциями технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ;
- разработке рекомендаций по реализации технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ.

1.3 Цель и задачи работы

Выполненные исследования современного состояния вопроса позволили сделать следующие выводы:

1. Анализ литературных источников показал, что в настоящее время существует множество методов обработки цилиндрических изделий. Эти методы позволяют обеспечивать заданные параметры качества и производительности обработки цилиндрических изделий. Вместе с тем можно отметить, что большинство из методов обработки рассматриваются авторами как обработка цилиндрических изделий не с тонкими стенками. Однако выполненные исследования показали, что в настоящее время необходимы методы для дальнейшего повышения показателей качества и производительности обработки ТЦИ. Это обусловлено непрерывным научно-техническим прогрессом и потребностью существенного повышения свойств тонкостенных цилиндрических поверхностей изделий.

2. Для дальнейшего повышения показателей производительности обработки изделий наиболее целесообразно применение комбинированной обработки изделий. Однако в настоящее время вопрос комбинированной обработки ТЦИ остается мало изученным, требующим детальных исследований. При этом анализ литературных источников по вопросу синтеза технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ показывает отсутствие данных по синтезу таких технологических процессов.

3. Представлены основные классы ТЦИ, соотношение их габаритных размеров. Остаются малоизученными ступенчатые ТЦИ.

4. Анализ источников показал отсутствие установленных оптимальных параметров резания и шероховатости для обработки ТЦИ.

5. Рассмотрены упругие деформации ТЦИ при закреплении и обработке.

6. Проанализирована общая методика проектирования синтеза функционально-ориентированных технологических процессов, которая может быть применима для ТЦИ.

7. Выполненные предварительные исследования технологического процесса комбинированной обработки изделий показали, что между операциями технологического процесса действуют определенные связи. Поэтому для выполнения дальнейшего повышения производительности изготовления изделий с тонкостенными цилиндрическими поверхностями необходимо установление закономерностей

стей синтеза подобных технологических процессов. Для реализации технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ необходима также разработка технологического обеспечения, обеспечивающего реализацию заданных операций процесса.

8. В работе возникает необходимость решения комплексной задачи, чтобы при повышении производительности не произошло снижения точности обработки, и, наоборот, при повышении качества поверхности не снизить производительность.

Целью данной работы является повышение производительности изготовления тонкостенных цилиндрических изделий на базе комбинированной технологии обработки путем синтеза рациональной структуры технологического процесса и разработки технологического обеспечения.

На основе поставленной цели в данной работе определены следующие основные задачи:

1. Выполнить анализ существующих методов обработки ТЦИ. Обосновать целесообразность применения комбинированной обработки.

2. Разработать структуру технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ, обеспечивающую повышение производительности обработки. Предложить классификацию ТЦИ.

3. Разработать на базе токарного станка ультразвуковую установку для комбинированной обработки ТЦИ.

4. Выполнить экспериментальные исследования по определению влияния режимов резания на силовые параметры при обработке ТЦИ.

5. Получить зависимости изменения среднего значения силы резания для обычного и ультразвукового точения ТЦИ.

6. Установить область допустимых решений, с помощью которой определить оптимальные режимы резания и коэффициент производительности.

7. Внедрить результаты работы в производство.

РАЗДЕЛ 2

МЕТОДИКА СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

2.1 Общие положения

Комбинируемая обработка тонкостенных цилиндрических изделий представляет собой совокупность процессов преобразования параметров качества изделия от исходного состояния к конечному, за счет реализации комбинированных технологических воздействий орудий и средств обработки на тонкостенные цилиндрические поверхности изделия. В этом случае технологические воздействия могут выполняться различными методами обработки, а преобразования параметров качества тонкостенных цилиндрических поверхностей изделия могут реализовываться различными принципами. При этом технологические воздействия в комбинированной обработке, характеризующиеся потоками материи, энергии и информации, могут реализовываться посредством комбинирования различных видов энергии, способов и схем (схемы технологического воздействия, кинематические схемы и тому подобное).

Классификация методов обработки может осуществляться по ряду различных признаков [2, 4, 67, 118]: по виду затрачиваемой энергии, эффективности технологических воздействий, виду применяемых средств технологических воздействий, обеспечения, физической сущности процесса преобразования заготовки в изделие.

На рисунке 2.1 представлена классификация методов обработки изделий по виду затрачиваемой энергии. По виду затрачиваемой энергии различают следующие методы обработки: механической обработки (М), химической (Х), электрической (Э), термической (Т), лучевой (Л), магнитной (Мг), акустической (Ак), комбинированные методы (К).

В настоящее время особый интерес для практики изготовления изделий в машиностроении представляет комбинированные методы обработки. Это связано с тем, что традиционные известные методы исчерпали свои возможности и не позволяют существенно повышать параметры свойств изделий. Это особенно остро стоит для обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

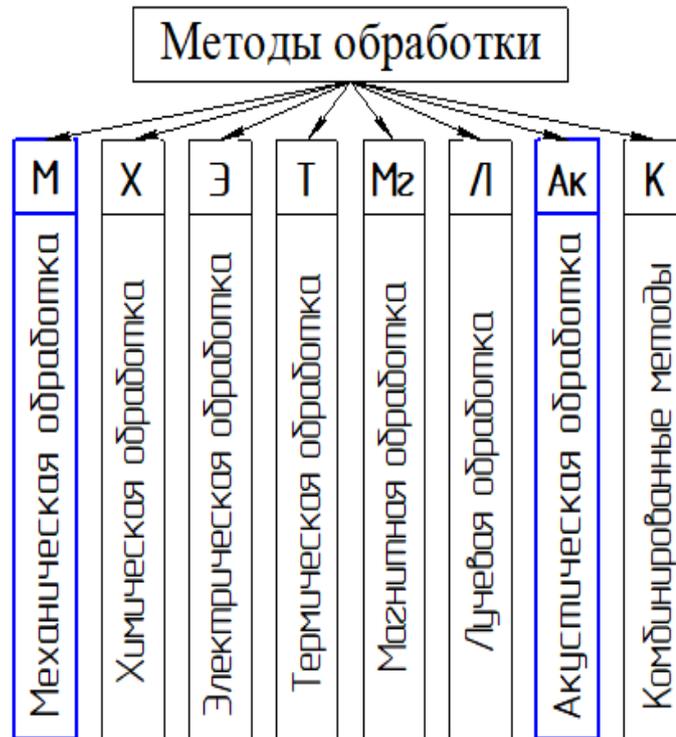


Рисунок 2.1. Классификация методов обработки по виду затрачиваемой энергии

На рисунке 2.2 представлена классификация комбинированных методов обработки изделий по виду затрачиваемой энергии. По виду затрачиваемой энергии различают следующие комбинированные методы обработки [4, 118]: методы механохимической обработки (МХ); электрохимическая обработка (ЭХ); механо-термическая обработка (МТ); методы электромеханической обработки (ЭМ); механомагнитная обработка (ММг); методы механоакустической обработки (МАк); химико-термическая обработка (ХТ); механоэлектрохимическая (МЭХ); методы механохимико-термической обработки (МХТ) и др.

На рисунке 2.3 представлена классификация комбинированных методов обработки изделий [107]. Здесь показано, что комбинированные методы обработки могут подразделяться:

- по составу методов (из 2-х методов, 3-х методов, ..., 7-ми методов);
- по составу операций в каждом методе (из 1-й операции, 2-х операций, ..., n операций);
- по структуре (ветвящаяся, иерархическая, мультипликативная, аддитивная, ..., мультипликативно-аддитивная);
- по характеру действия (последовательно, параллельно, смешанно);
- по производительности (низкой, нормальной, высокой, сверхвысокой);
- по прецизионности (низкой точности, нормальной точности, высокой точности и особо высокой точности);
- по последовательности выполнения (1-й вариант, 2-й вариант, ..., n -й вариант).



Рисунок 2.2. Классификация комбинированных методов обработки по виду применяемой энергии

Можно отметить, что в представленной работе разрабатывается технологический процесс на базе комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Структура технологического процесса комбинированной обработки ТЦД строится на основе механической обработки (точение), ультразвуковой обработки и выполнения ряда сопутствующих операций.

Далее, в представленной работе рассматриваются вопросы установления особенностей и закономерностей синтеза технологических процессов комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.



Рисунок 2.3. Классификация комбинированных методов обработки изделий

2.2 Классификация тонкостенных цилиндрических изделий

Для выполнения синтеза технологического процесса должна быть определенная база данных, из которой можно было бы производить выбор необходимых вариантов решений или относить получаемые решения к какому-либо классу объектов. При всем этом содержание базы данных должно быть подчинено опреде-

ленным законам, а расположение технологических объектов должно выполняться по некоторым закономерностям. Эта проблема решается с помощью классификации тонкостенных цилиндрических изделий.

При проектировании технологических процессов определение общих свойств объектов помогает найти общие ключевые абстракции, механизмы и принципы, что в свою очередь приводит к более простому проекту технологии изготовления тонкостенных цилиндрических изделий. На сегодняшний день пока не разработаны строгие методы классификации и нет общих правил, позволяющих выделять классы и объекты. Однако, классифицируя, мы объединяем в одну группу объекты, имеющие одинаковое строение или поведение. Классификация тонкостенных цилиндрических изделий существенно облегчает понимание основной проблемы и дальнейшее развитие общего теоретического подхода синтеза технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Классификация помогает определить обобщенную, специализированную и собирательную иерархию объектов и классов. Целью классификации является нахождение общих свойств объектов и их поведения.

Все изделия с цилиндрическими поверхностями классифицируются по следующим признакам: по виду изделия; по жесткости изделия; по толщине стенок изделия.

По жесткости, изделия с цилиндрическими поверхностями подразделяются на следующие: жесткие, нормальной жесткости и нежесткие. Здесь можно отметить следующее. К жестким можно отнести такие изделия, на деформацию которых не оказывают влияние силы закрепления в приспособлениях при обработке. К нормальной жесткости относятся изделия, деформация которых от закрепления в приспособлении при обработке находится в пределах допуска на обработку. Для нежестких изделий необходимы специальные приспособления для обеспечения заданной жесткости, так как без этих приспособлений возможна деформация изделия, превышающая допуск на обработку.

По толщине стенок, изделия с цилиндрическими поверхностями подразделяются следующим образом: тонкостенные, нормальной толщины и толстостен-

ные. В дальнейшем будут рассматриваться именно тонкостенные цилиндрические изделия.

Тонкостенные цилиндрические поверхности изделия классифицируются по следующим признакам (см. рисунок 2.4):

- по типу внутренней цилиндрической поверхности;
- по назначению тонкостенной цилиндрической поверхности;
- по виду выполняемых эксплуатационных функций;
- по методу комбинированной технологии обработки;
- по структуре комбинированной обработки технологического процесса;
- по качеству поверхностного слоя внутренней и наружной цилиндрической поверхности;
- по степени прецизионности.

По типу внутренней поверхности тонкостенные цилиндрические изделия подразделяются на следующие: сквозные гладкие, глухие, ступенчатые. По назначению тонкостенные цилиндрические поверхности можно подразделять: направляющие вращательного движения, гидро- и пневмоцилиндры, подшипники, ..., сопла. По виду выполняемых функций тонкостенные цилиндрические поверхности могут реализовывать следующие функции: стойкость к контактной усталости, износостойкость, стойкость к кромочным явлениям, сопротивляемость к коррозии, стойкость к схватыванию, ..., стойкость к комбинированному воздействию. По степени прецизионности тонкостенные цилиндрические поверхности могут быть следующие: низкой точности, нормальной точности, прецизионные.

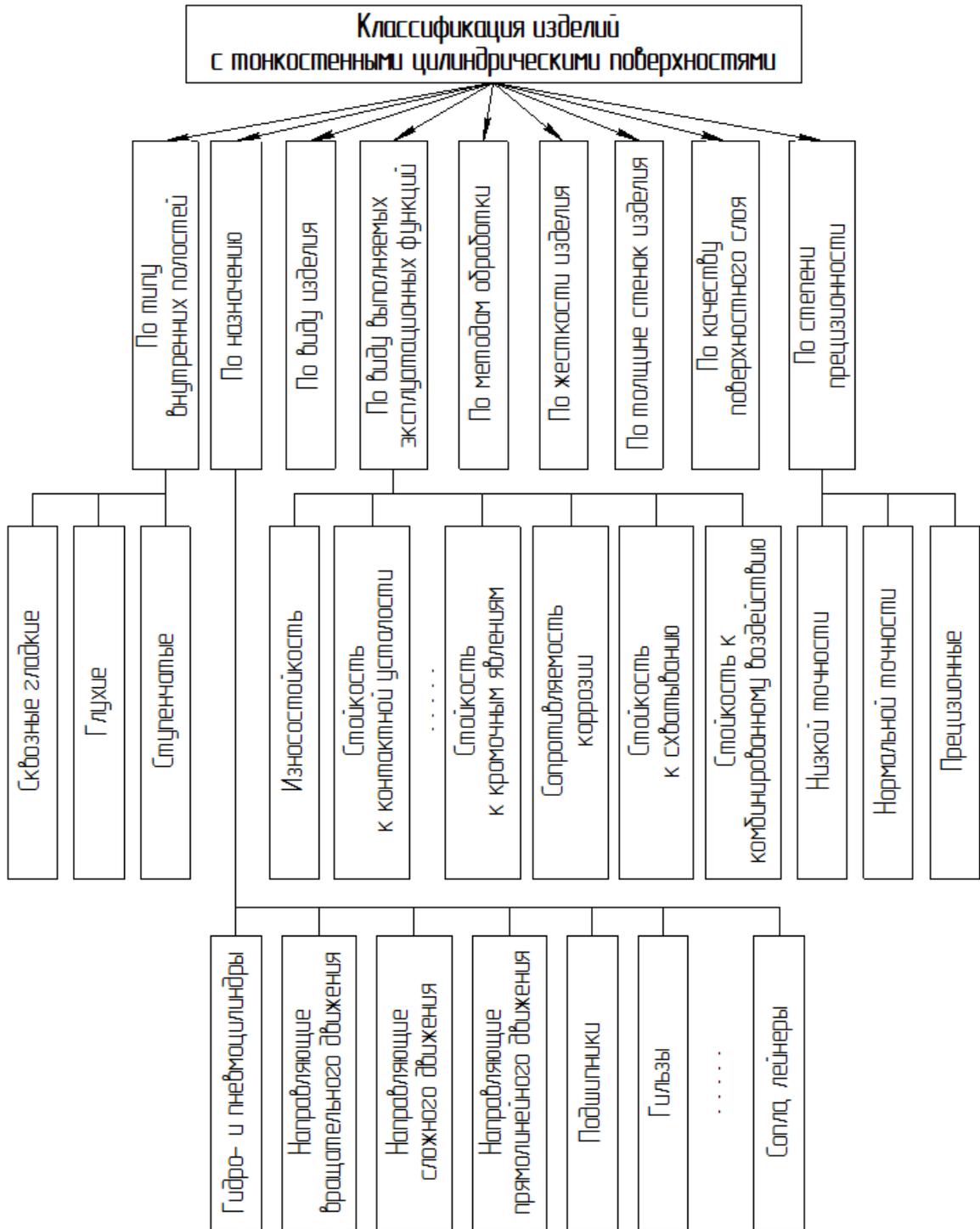


Рисунок 2.4. Классификация тонкостенных цилиндрических изделий

2.3 Методика проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий

В основе синтеза технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий лежит принцип обеспечения рациональных параметров на всех его этапах.

Вследствие того, что технологический процесс комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий является сложным многовариантным иерархическим образованием, его проектирование необходимо начинать с разработки укрупненной универсальной структуры технологического процесса, сформированной из технологических модулей операций. Далее необходимо проработать каждый технологический модуль операций и выполнить синтез его структуры, состоящий из множества технологических операций. Затем необходимо выполнить исследования и установить основные закономерности объединения операций. Здесь могут быть определены следующие связи:

- по параметрам шероховатости тонкостенных цилиндрических изделий;
- по параметрам точности тонкостенных цилиндрических изделий;
- по параметрам свойств тонкостенных цилиндрических изделий.

Решение этих вопросов обеспечивает повышение качества и эффективности технологического процесса изготовления тонкостенных цилиндрических изделий. Это может быть выполнено на основе использования принципа минимизации, принципа концентрации, за счет соответствующей структуры комбинированной обработки технологического процесса, за счет обеспечения рациональных параметров операций.

На рисунке 2.5 представлена структурная схема общего подхода проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Этот общий подход имеет следующую последовательность проектирования, формирующуюся по четырем уровням [63]:

– 1-й уровень – синтез укрупненной общей универсальной структуры технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе технологических модулей операций;

– 2-й уровень – синтез структуры операций технологического процесса каждого технологического модуля операций на базе морфологической матрицы;

– 3-й уровень – установление закономерностей объединения операций в технологическом процессе комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий;

– 4-й уровень – повышение качества и эффективности технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.

Данная последовательность и является методикой проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий. Она базируется на следующих принципах проектирования [63]:

– принцип модульности проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий;

– принцип иерархии процесса проектирования комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий;

– принцип параллелизма (концентрации) операций технологического процесса;

– принцип итерации процесса проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий.



Рисунок 2.5. Структурная схема общего подхода проектирования технологического процесса комбинированной технологии обработки тонкостенных цилиндрических изделий

Принцип иерархии позволяет значительно упростить понимание сложных задач проектирования технологии, что достигается за счет образования иерархической структуры из абстракций. Иерархия – это ранжированная или упорядоченная система абстракций.

Основными видами иерархических структур применительно к сложным системам (технологиям) являются структура классов (иерархия по номенклатуре) и структура объектов (иерархия по составу).

Предлагаемый подход базируется на использовании на 2-м уровне проектирования принципа модульности. Этот принцип дает возможность разделить тех-

нологический процесс на отдельные фрагменты и тем самым частично уменьшить его сложность. Разделение технологии на отдельные части – технологические модули операций позволяет улучшить детальную переработку этих частей. Изучение отдельных частей технологии дает исчерпывающую о технологии в целом. Модульный процесс проектирования технологии особенно полезен, когда процесс создания технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий состоит из большого числа подзадач. Вместе с тем, принцип модульности проектирования наряду с разделением технологии должен предусматривать средства связи между ними. Модульность проектирования технологий выполняет функцию физических контейнеров, в которые помещаются классы и объекты при логическом проектировании всей технологии как системы. При этом средства связи должны обеспечивать баланс между двумя противоположными тенденциями: стремлением ограничить доступ информации к данным и необходимостью решения заданной задачи проектирования на уровне абстракций, возникающей между модулями.

Исходя из этого, модульность процесса проектирования технологии – это свойство всей системы проектирования, связанное с возможностью ее декомпозиции на ряд тесно связанных модулей. При этом принципы абстрагирования, ограничения доступа и модульности являются взаимодополняющими. Технология и процесс ее проектирования определяют явные границы определенной абстракции, а ограничение доступа и модульность создают барьеры между абстракциями.

При проектировании технологий решение определенного класса задач должно выполняться одновременно. Параллелизм характеризует возможность одновременного функционирования объектов. Параллелизм – свойство множества объектов находиться в активном, либо пассивном состоянии.

Если в систему проектирования введен принцип параллельности, сразу возникает вопрос о том, как синхронизировать отношения между активными объектами проектирования, а также с остальными объектами, действующими последовательно. Здесь возможны варианты синхронизации параллельных объектов: одновременное решение задач, фазовые смещения, другие закономерности.

Учет представленных выше принципов проектирования позволяет на качественно новой основе создавать сложные многовариантные технологии. Однако разработка технологии остается до сих пор трудоемким процессом, целью которого является: обеспечение требуемых показателей качества технического обеспечения и выпускаемых изделий; обеспечение требуемого алгоритма функционирования (технологического воздействия); реализация приемлемой цены; решение вопросов конъюнктуры рынка; удовлетворение явным и неявным требованиям по качеству, ресурсопотреблению и дизайну; удовлетворение требованиям к стоимости и продолжительности разработки технологии [63].

Поэтому главным условием процесса проектирования технологий должен быть итерационный характер выполнения всех стадий, этапов, уровней и других элементов процесса проектирования. В этом случае, процесс проектирования может выполняться по различным схемам.

Следует также отметить, что общий подход проектирования технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий должен основываться на основных принципах функционально-ориентированных технологий. Этот подход позволяет создавать технологические процессы, обеспечивающие нетрадиционные свойства изделия в зависимости от особенностей его эксплуатации в заданной системе.

Таким образом, представленный общий теоретический подход позволяет проектировать технологический процесс комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий с учетом системного подхода. При этом повышение качества и эффективности технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий предусматривается на базе принципов концентрации, минимизации, за счет обеспечения необходимой структуры технологического процесса и рациональных параметров операций технологического процесса.

2.4 Основные особенности синтеза технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе функционально-ориентированного подхода

Технологические процессы комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий обычно относятся к технологиям, в которых технологические воздействия должны быть точно определены, ориентированы и реализованы на функциональные элементы изделия на местном уровне. При этом структура каждого технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий может быть многовариантна и строится в соответствии с алгоритмом реализации схем технологического воздействия. При этом процесс формирования технологического процесса имеет определенные особенности и закономерности. Рассмотрим основные из этих особенностей [63].

На рисунке 2.6 представлена структурная схема системы преобразования свойств изделия. Здесь показано, что технологический процесс комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий должен строиться из условия того, что процесс преобразования свойств изделия должен выполняться в зависимости от структуры и особенностей действия эксплуатационных функций. При этом технологический процесс наиболее целесообразно строить на базе функционально-ориентированного подхода [63]. Этот подход учитывает основные особенности и принципы функционально-ориентированных технологий. Для построения функционально-ориентированного технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий необходимы начальные данные и граничные данные. К начальным данным можно отнести следующее: начальные свойства заготовки, параметры имеющегося технологического обеспечения, особенности преобразования свойств изделия, принципы работы оборудования и другие параметры. Граничные условия могут содержать: конечные свойства изделия, технико-экономические показатели, себестоимость изготовления изделия и другие параметры.

Можно отметить, что в модели системы технологических преобразований (рисунок 2.6) процесс преобразования начальных свойств изделия V в конечные W выполняется с помощью технологических воздействий материального M , энергетического E и информационного I характеров. Здесь технологические воздействия можно моделировать с помощью схем технологического воздействия. С помощью схем технологического воздействия строятся технологические операции, составляется структура и определяются параметры функционально-ориентированной технологии (ФОТ).

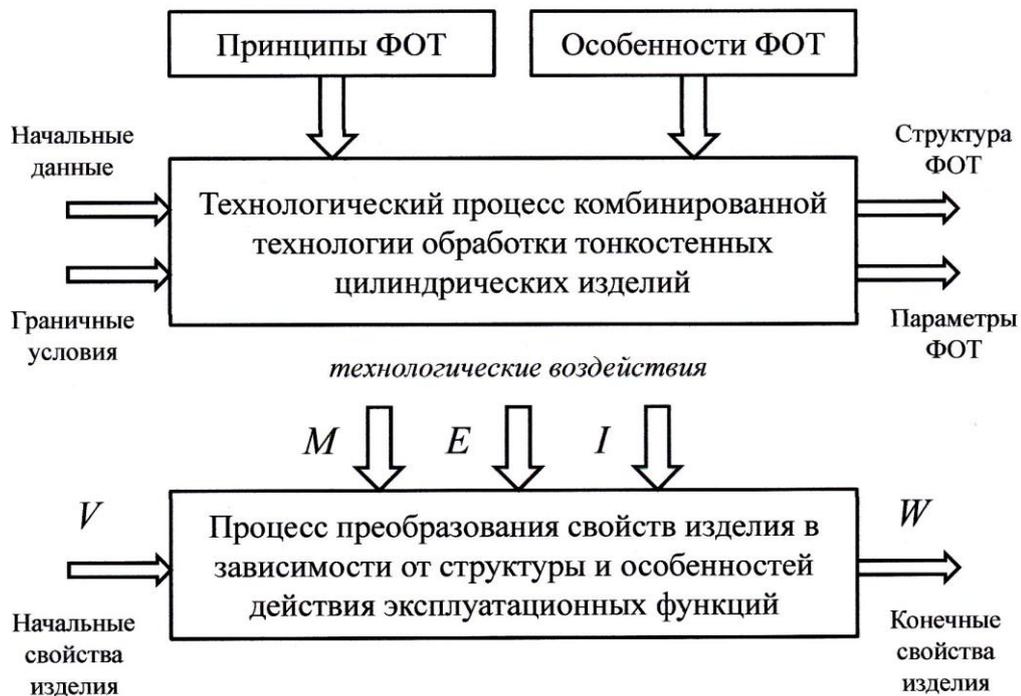


Рисунок 2.6. Структурная схема системы преобразования свойств изделия [63]

В целом проектирование технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий базируется на следующих этапах их проектирования:

- анализ особенностей эксплуатации тонкостенного цилиндрического изделия в машине или технологической системе, составление структуры действия эксплуатационных функций;

– деление тонкостенного цилиндрического изделия на функциональные элементы по уровням деления, составление структуры функциональных элементов;

– составление структуры технологического процесса для разработанной структуры функциональных элементов на базе группы особых принципов ориентации технологических воздействий и свойств функциональных элементов.

В качестве примера на рисунке 2.7 представлено тонкостенное цилиндрическое изделие. Здесь наружная цилиндрическая поверхность имеет две ступени, а внутренняя цилиндрическая поверхность – одну ступень. Эти поверхности должны обеспечивать высокую износостойкость. При этом на краях возникают концентрации напряжений из-за кромочных контактов, сопряженных с внутренней цилиндрической поверхностью элементов узла.

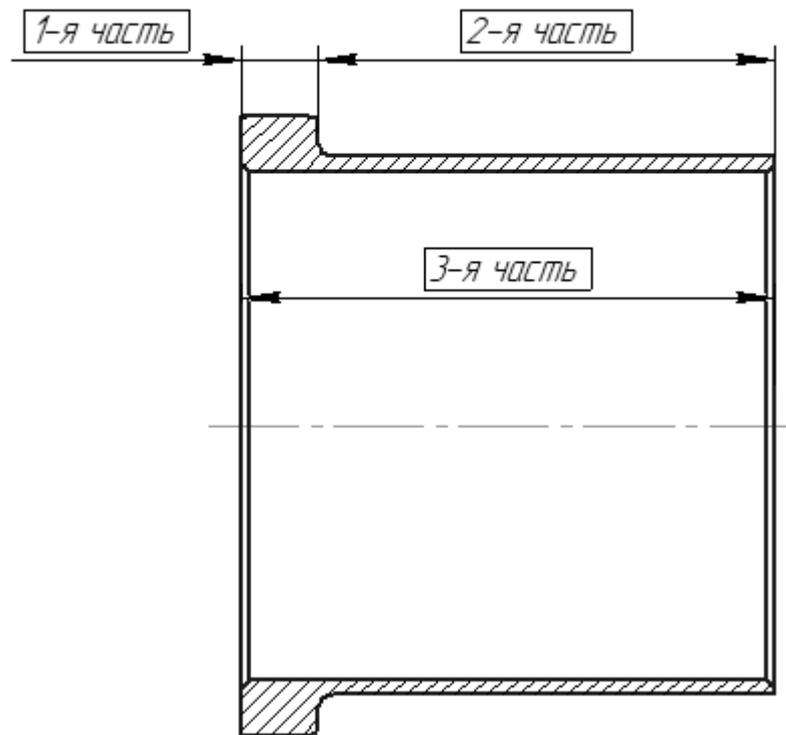


Рисунок 2.7. Тонкостенное цилиндрическое изделие

Функционально-ориентированный подход предусматривает деление поверхностей изделия на функциональные элементы по уровням глубины технологии (рисунок 2.7):

– уровень изделия с наружной цилиндрической поверхностью;

- уровень изделия с внутренней цилиндрической поверхностью;
- уровень частей с наружной цилиндрической поверхностью;
- уровень частей с внутренней цилиндрической поверхностью;
- уровень составляющих (поверхностная точка, объемная точка, поверхностная линия, объемная линия, поверхность).

На рисунке 2.8 показана иерархическая структура функциональных элементов изделия с наружной цилиндрической поверхностью и внутренней цилиндрической поверхностью. Здесь, на каждом уровне деления располагаются различные виды функциональных элементов изделия.

Можно отметить, что в целом функционально-ориентированный подход в создании технологических процессов дополнительно предусматривает деление изделия еще по следующим уровням: уровень зон, уровень микрозон и уровень нанозон. Однако в данной работе выполняется деление по трем уровням (рисунок 2.8).

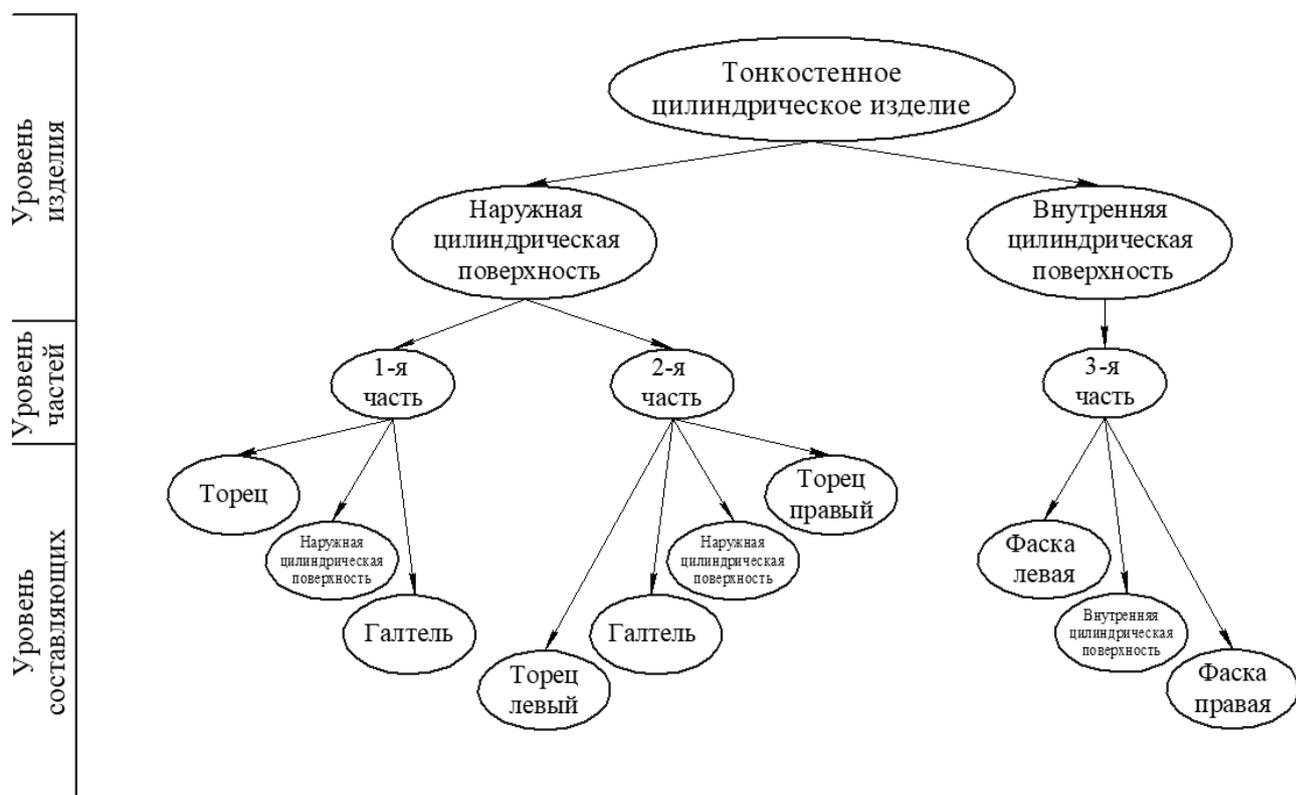


Рисунок 2.8. Иерархическая структура функциональных элементов тонкостенного цилиндрического изделия

Заметим, что при создании технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе функционально-ориентированного подхода выполняется деление изделия на функциональные элементы по уровням деления. Для этих функциональных элементов составляется в зависимости от уровня деления различные структурные варианты технологических процессов.

Таким образом, использование функционально-ориентированного подхода при синтезе технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий обеспечивает их качественно новые свойства в зависимости от особенностей эксплуатации изделий в машине.

2.5 Особенности синтеза укрупненной универсальной структуры технологического процесса на базе технологических модулей

Начальным условием разработки технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий является наличие операции механической обработки с ультразвуком. Для реализации этой операции необходимо выполнить целый комплекс дополнительных операций. Эти операции совместно с операциями механической обработки с ультразвуком должны обеспечить необходимые свойства тонкостенного цилиндрического изделия [111].

Выполненные исследования особенностей разработки структуры технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий позволили установить, что процесс разработки технологического процесса должен базироваться на следующих основных этапах (рисунок 2.9):

- 1-й этап – механическая обработка наружной цилиндрической поверхности;
- 2-й этап – механическая обработка наружной цилиндрической поверхности с ультразвуком;
- 3-й этап – контрольные операции свойств изделия.

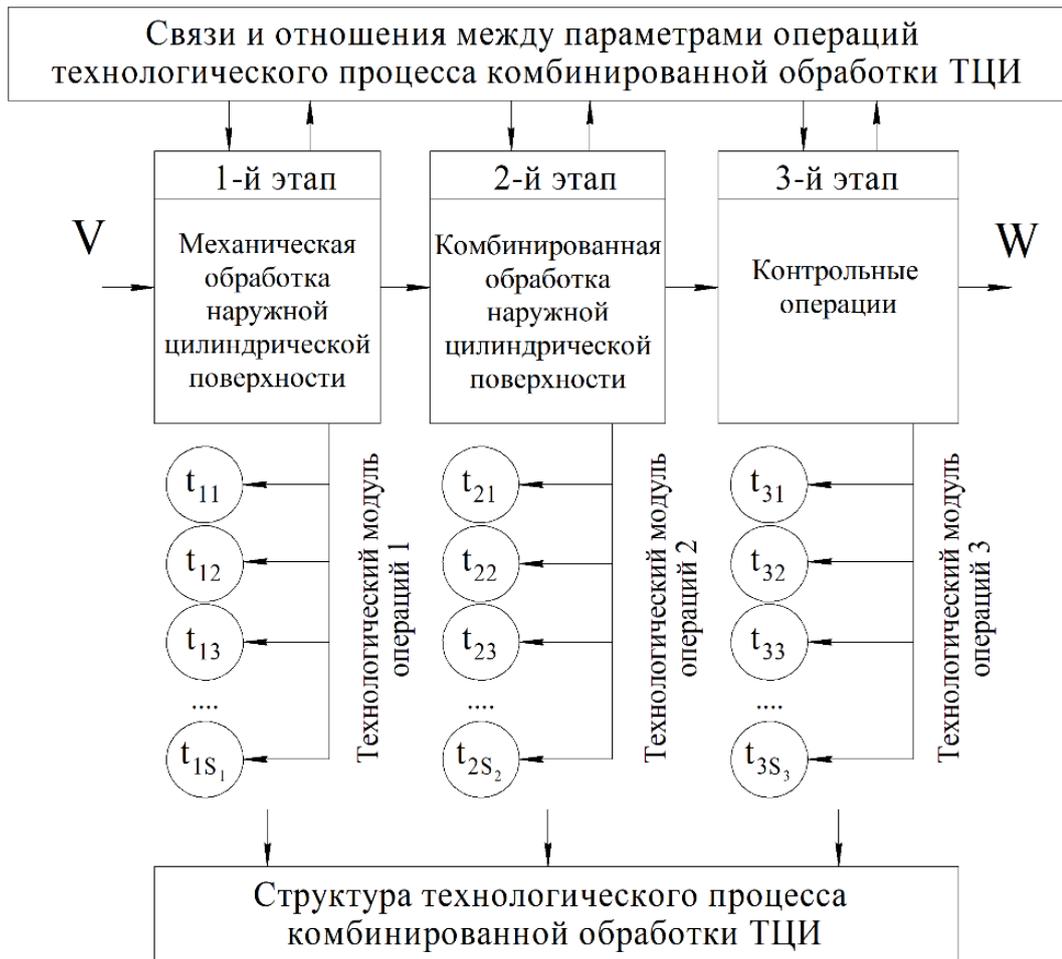


Рисунок 2.9 – Общая укрупненная универсальная структура технологического процесса ультразвуковой обработки

Эти этапы являются общими и универсальными для решения вопросов изготовления изделия с помощью ультразвуковой обработки. Здесь для каждого этапа проектирования технологического процесса формируется свой универсальный технологический модуль возможных операций (база данных) и на основе его структурируется необходимый подпроцесс и соответственно технологический процесс для конкретного изделия. На всех этапах технологического процесса необходимо предусматривать необходимые операции для составления технологического процесса на базе функционально-ориентированного подхода. То есть разрабатывать функционально-ориентированный технологический процесс с учетом всех особенностей его проектирования. Однако здесь можно отметить, что в ряде случаев для определенной обработки может быть применен традиционный техно-

логический процесс. Поэтому здесь возможны случаи комбинирования традиционных и функционально-ориентированных технологических процессов. На основании этого для обработки тонкостенного цилиндрического изделия может быть применены следующие виды технологических процессов:

- традиционные технологические процессы;
- функционально-ориентированные технологические процессы;
- смешанные технологические процессы.

На 1-м этапе технологического процесса обработки ТЦИ предусмотрена механическая обработка наружной цилиндрической поверхности (НЦП) изделия. На этом этапе технологического процесса необходимо обеспечить заданные свойства НЦП изделия, а именно следующие: заданные параметры точности НЦП изделия, необходимые параметры шероховатости поверхности НЦП изделия, требуемые свойства НЦП изделия. Эти параметры можно обеспечить различными вариантами структуры подпроцесса 1-го этапа технологического процесса. Поэтому на множестве возможных вариантов операций $T_1 = \{t_{11}, t_{12}, t_{13}, \dots, t_{1S_1}\}$ технологического модуля операций 1-го этапа технологического процесса, где S_1 – количество возможных вариантов операций на данном этапе, можно выбрать определенное подмножество подпроцессов (структур) $\{Str_{T_{11}}, Str_{T_{12}}, \dots, Str_{T_{1V_1}}\}$, каждый из которых будет обеспечивать те или другие параметры НЦП изделия. Здесь: V_1 – количество возможных структурных вариантов подпроцессов данного этапа технологического процесса. Далее на этом подмножестве подпроцессов 1-го этапа технологического процесса необходимо выбрать рациональную структуру Str_{T_1} подпроцесса обработки НЦП изделия. Этот вопрос может быть решен только на базе установления связей и отношений между параметрами операций всего технологического процесса в целом. Представленное множество возможных операций 1-го этапа технологического процесса должно формироваться в базе данных – в технологическом модуле операций 1.

На 2-м этапе технологического процесса обработки ТЦИ предусмотрена механическая обработка с ультразвуком НЦП изделия. На этом этапе технологического процесса необходимо обеспечить заданные свойства НЦП изделия, а имен-

но следующие: заданные параметры точности НЦП изделия, необходимые параметры шероховатости поверхности НЦП изделия, требуемые свойства НЦП изделия. Эти параметры можно обеспечить различными вариантами структуры подпроцесса 2-го этапа технологического процесса. Поэтому на множестве возможных вариантов операций $T_2 = \{t_{21}, t_{22}, t_{23}, \dots, t_{2S_2}\}$ технологического модуля операций 2-го этапа технологического процесса, где S_2 – количество возможных вариантов операций на данном этапе, можно выбрать определенное подмножество подпроцессов (структур) $\{Str_{T_{21}}, Str_{T_{22}}, \dots, Str_{T_{2V_2}}\}$, каждый из которых будет обеспечивать те или другие параметры НЦП изделия. Здесь: V_2 – количество возможных структурных вариантов подпроцессов данного этапа технологического процесса. Далее на этом подмножестве подпроцессов 2-го этапа технологического процесса необходимо выбрать рациональную структуру Str_{T_2} подпроцесса обработки НЦП изделия. Этот вопрос может быть решен только на базе установления связей и отношений между параметрами операций всего технологического процесса в целом. Представленное множество возможных операций 2-го этапа технологического процесса должно формироваться в базе данных – в технологическом модуле операций 2.

3-й этап технологического процесса предназначен для выполнения контрольных операций и определения соответствия свойств ТЦИ заданным параметрам. Здесь также на множестве контрольных операций $T_3 = \{t_{31}, t_{32}, t_{33}, \dots, t_{3S_3}\}$ технологического модуля операций 3-го этапа технологического процесса, где S_3 – количество возможных вариантов операций на данном этапе, можно выбрать определенное подмножество подпроцессов (структур) $\{Str_{T_{31}}, Str_{T_{32}}, \dots, Str_{T_{3V_3}}\}$, каждый из которых будет обеспечивать те или другие параметры ТЦИ. Здесь: V_3 – количество возможных структурных вариантов подпроцессов данного этапа технологического процесса. Далее на этом подмножестве подпроцессов 3-го этапа технологического процесса необходимо выбрать рациональную структуру Str_{T_3} подпроцесса контроля параметров и свойств ТЦИ. Представленное множество возможных операций 3-го этапа технологического процесса должно формироваться в базе данных – в технологическом модуле операций 3.

На основании приведенных выше соображений рациональную структуру технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ можно представить в виде следующего выражения:

$$Str_T = \{Str_{T1}, Str_{T2}, Str_{T3}\},$$

где $Str_{T1}, Str_{T2}, Str_{T3}$ – конкретная структура операций рациональных подпроцессов соответствующего этапа технологического процесса;

1, 2, 3 – значения номеров структурных вариантов рациональных подпроцессов по этапам технологического процесса, соответственно.

Выполненные исследования и представленные соображения показывают, что проектирование структуры технологического процесса имеют определенные особенности, связанные с установлением закономерностей параметров и свойств НЦП на каждой операции и реализации их рациональных величин. Причем здесь установлено, что для обеспечения определенных конечных параметров и свойств ТЦИ должна формироваться конкретная структура технологического процесса, которая зависит от начальных параметров и свойств ТЦИ.

Таким образом, выполненные исследования позволили установить, что для формирования рациональной структуры необходима база данных технологических операций, которая может формироваться из технологических модулей операций. Используя технологические модули операций и методы морфологического подхода можно определять необходимую структуру рационального технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ.

2.6 Синтез структуры технологических модулей на основе морфологического подхода

Общее количество возможных операций технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ может быть представлено следующим множеством

$$T = \{T_1, T_2, T_3\},$$

где T_i – i -й технологический модуль операций технологического процесса.

Процесс синтеза структуры операций технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ основывается на выборе его структуры, на множестве технологических операций, в том числе и функционально-ориентированных:

$$T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_j, \dots, t_N\},$$

где T – полное множество возможных операций рационального технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ;

t_j – любая элементарная технологическая операция комбинированной обработки ТЦИ;

N – общее количество возможных операций ТЦИ.

Здесь, из полного множества возможных вариантов отделочных операций необходимо выбрать требуемое подмножество операций, из которого будет создан необходимый технологический процесс комбинированной обработки ТЦИ. Этот процесс может быть реализован на основе применения морфологического синтеза технических решений [63].

Процесс морфологического синтеза рациональной структуры технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ состоит из следующих шагов проектирования (рисунок 2.10):

1. Постановка задачи.
2. Выбор морфологических признаков t_v (строк) для каждого этапа технологического процесса.
3. Выявление возможных вариантов каждого признака (K_v, L_v, M_v, N_v, P_v) по строкам каждого этапа технологического процесса.
4. Составление морфологической матрицы.
5. Генерирование множество возможных вариантов технологических процессов (ТП).
6. Определение критериев выбора технологического процесса.
7. Выбор рациональной структуры технологического процесса.

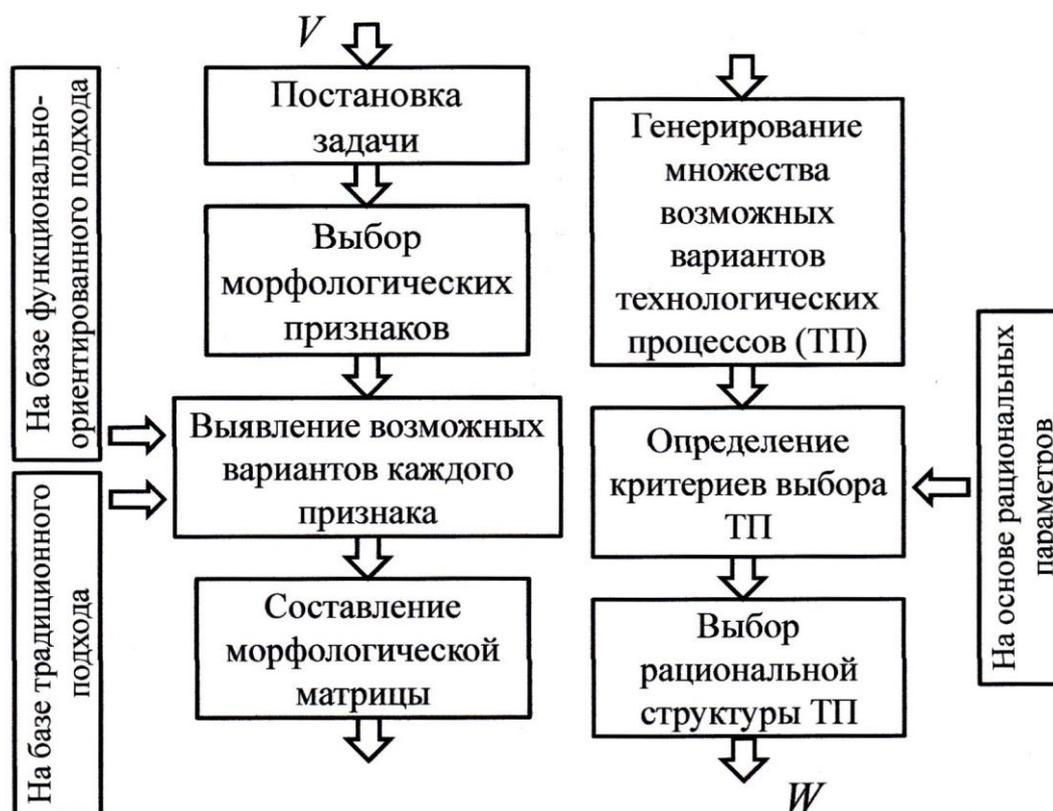


Рисунок 2.10. Основные этапы методики синтеза структуры рационального технологического процесса [63]

На рисунке 2.10 показано: V – входной поток информации по полному множеству существующих операций ТЦИ; W – выходной поток информации о структуре рационального технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ. Здесь, при постановке задачи синтеза, основными параметрами синтеза является выбор структуры рационального технологического процесса по параметрам производительности P , качества K и себестоимости изготовления ТЦИ с учетом его свойств C .

Можно отметить, что здесь выбор морфологических признаков t_v выполняется по строкам матрицы. В данной работе осуществляется выявление возможных вариантов каждого признака на основе формирования групп сходных операций по каждой строке мощностями K_v, L_v, M_v, N_v, P_v . Причем с увеличением номера строки повышаются параметры качества дополнительных операций комбинированной обработки ТЦИ.

Заметим, что выявление возможных вариантов каждого признака K_m может выполняться следующими методами: на базе функционально-ориентированного подхода; на базе традиционного подхода.

В морфологической матрице предусмотрено следующее. В каждой строке слева направо располагаются однотипные элементарные операции, в которых последовательно увеличивается производительность и снижается себестоимость обработки ТЦИ. В вертикальном направлении по строкам сверху вниз представлены различные операции комбинированной обработки ТЦИ, которые последовательно обеспечивают заданные свойства ТЦИ.

На этапе генерирования полного множества возможных вариантов структур технологического процесса выполняется определение этого полного множества.

Далее, выполняется определение критериев выбора рационального технологического процесса. В данном случае, в качестве критериев выбора структуры рационального технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ приняты производительность, качество и себестоимость обработки ТЦИ.

После определения критериев выбора структуры технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ выполняется выбор на полном множестве структурных вариантов технологических процессов рационального технологического процесса. К основным методам выбора рационального технологического процесса можно отнести следующие методы:

- метод направленного поиска рациональных вариантов структуры;
- метод табличной оценки положительных и отрицательных показателей свойств структурных вариантов технологического процесса;
- метод логического составления структуры технологического процесса на базе коэффициентов уточнения [63].

В данной работе используется принцип логического составления структуры технологического процесса на базе коэффициентов уточнения. На основе опытно-статистических данных рекомендуются следующие значения коэффициентов уточнения:

- при черновой обработке $k_i = 4 \dots 10$ и более;

- при чистовой обработке $k_i = 2 \dots 4$;
- при окончательной обработке $k_i = 1,5 \dots 2$.

С помощью приведенных коэффициентов уточнения можно лишь приблизительно рассчитать количество переходов механической обработки. Окончательное решение о количестве переходов и структуре технологического процесса принимает технолог, исходя из достоверной информации о наличии и точностных характеристиках технологического оборудования, вида и качества заготовки, наличия и качества инструмента и других параметров. Значения коэффициентов уточнения зависят от многих факторов: жесткости технологической системы, режимов резания, механических свойств обрабатываемого материала, геометрии и стойкостных свойств режущего инструмента.

Таким образом, на базе морфологического подхода и технологических модулей операций можно выполнить синтез необходимой структуры технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ. Однако для установления рациональных параметров всех операций необходимо установить связи и закономерности параметров между операциями по ходу технологического процесса.

2.7 Повышение эффективности комбинированной обработки на основе принципа последовательной минимизации параметров операций по структуре технологического процесса

Операция комбинированной обработки ТЦИ свойственны следующие особенности:

- длительность обработки;
- высокая стоимость обработки;
- низкая производительность обработки;
- стоимость обработки поверхности изделия на последующей операции на порядок дороже предшествующей операции из-за повышения качества обработки.

Каждая операция или переход реализуют при обработке заданные параметры точности и шероховатость ТЦИ. Параметры точности и шероховатости ТЦИ

определяются определенным допуском. В этом допуске учтены отклонения формы и расположения поверхности ТЦИ, а также параметры (шероховатость, волнистость и тому подобное) поверхностного слоя ТЦИ.

В данной работе предлагается вести повышение эффективности процесса обработки ТЦИ на основе реализации принципа последовательной минимизации отклонений поверхности, обеспечения параметров поверхностного слоя и уменьшения допуска на предшествующих переходах и операциях технологического процесса. Реализация принципа последовательной минимизации параметров операций технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ на предшествующих операциях и переходах позволяет более легко и эффективнее достигать заданные параметры на данной операции или переходе за счет обеспечения более высоких параметров ТЦИ на предшествующих операциях. Это связано с тем, что по ходу технологического процесса обработки предшествующие операции обычно выполняются проще и эффективнее чем последующие, так как последующие операции должны обеспечивать параметры ТЦИ более высокого качества.

Рассмотрим более детально применение принципа последовательной минимизации на предшествующих переходах технологического процесса для повышения эффективности обработки ТЦИ.

В основе применения этого принципа лежит тот факт, что каждый вид обработки имеет разбросы параметров точности поверхности, а именно – верхнее значение и нижнее значение параметров точности и шероховатости ТЦИ. При этом реализация нижних параметров точности и шероховатости на предшествующей операции позволяет повысить производительность обработки на данной операции, так как здесь необходимы меньшие затраты на обработку для получения заданных параметров точности и шероховатости ТЦИ, чем на более точной операции или переходе. Отметим, что выполнение операций для получения более точных параметров поверхностей и шероховатости является более трудоемким процессом, чем выполнение операций с меньшим качеством. Это в целом ведет к повышению эффективности технологического процесса ТЦИ.

Например, выполнение предшествующей операции (менее точной) по минимальному значению параметров точности и шероховатости снижает эффективность (производительность и качество) обработки на 10%. При этом обеспечивается возможность повышения эффективности обработки на последующей, более точной операции, приблизительно на 30-40%. Применение такого подхода в целом обеспечивает повышение изготовления ТЦИ в целом для технологического процесса.

На базе использования принципа последовательной минимизации (обеспечения нижнего значения) отклонений поверхности, обеспечения параметров поверхностного слоя и уменьшения допуска на предшествующих переходах и операциях технологического процесса обеспечивается возможность повышения производительности обработки ТЦИ. Этот факт необходимо учитывать при составлении структуры технологического процесса и определении параметров обработки по операциям.

Применение предлагаемого принципа последовательной минимизации отклонений в машиностроении для синтеза технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ позволяет повысить производительность обработки на 5-25% по сравнению с обычными традиционными подходами. А также использование данного подхода ведет к снижению затрат на обработку и себестоимость изготовления ТЦИ.

Таким образом, выполняя последовательную минимизацию параметров геометрии и шероховатости ТЦИ на предшествующих переходах и операциях механической обработки по ходу технологического процесса, обеспечивается близкая к предельным значениям производительность и себестоимость изготовления ТЦИ на данном этапе процесса. Принцип последовательной минимизации (обеспечения нижнего значения) отклонений геометрии поверхности, параметров поверхностного слоя и уменьшения допуска на предшествующих переходах и операциях технологического процесса обеспечивает повышение эффективности технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ.

2.8 Выводы

В данном разделе выполнены исследования, связанные с особенностью проектирования технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ. Для разработки данного технологического процесса выполнен целый комплекс исследований. Основные из этих исследований следующие.

1. Представлена классификация комбинированных методов обработки изделий. Эта классификация дает возможность технологу назначать необходимые виды комбинированной обработки ТЦИ.

2. В работе разработана классификация тонкостенных цилиндрических изделий. Эта классификация является ограничивающим условием для объема и широты исследований.

3. В работе разработан общий теоретический подход, который позволяет проектировать технологический процесс комбинированной обработки ТЦИ с учетом системного подхода. При этом повышение качества и эффективности технологического процесса предусматривается на базе принципов концентрации, минимизации, за счет обеспечения необходимой структуры технологического процесса и рациональных параметров операций.

5. В работе установлено, что наиболее целесообразно строить структуру технологического процесса на базе функционально-ориентированного подхода. Использование функционально-ориентированного подхода при синтезе технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ обеспечивает их качественно новые свойства в зависимости от особенностей эксплуатации изделий в машине.

6. Для синтеза рациональной структуры технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ разработана укрупненная универсальная структура технологического процесса на базе технологических модулей. Выполненные исследования позволили установить, что для формирования рациональной структуры необходима база данных технологических операций, которая может формироваться из технологических модулей операций. Используя технологические моду-

ли операций и методы морфологического подхода, можно определять необходимую структуру рационального технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ.

7. В данной работе предложена методика синтеза технологического процесса комбинированной обработки на базе морфологического подхода. Эта методика позволяет выполнить синтез технологических процессов с учетом особенностей обработки ТЦИ.

8. Выполненный анализ особенностей построения технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ позволил установить, что между операциями рационального технологического процесса действуют связи и отношения. На основании этих связей устанавливаются закономерности синтеза рациональной структуры операций и переходов технологического процесса комбинированной обработки ТЦИ.

РАЗДЕЛ 3

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКЕ

3.1 Оборудование для реализации комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий

Для проведения исследований по ультразвуковому резанию тонкостенных цилиндрических изделий был задействован токарно-винторезный станок модели 1М61. Станок предназначен для выполнения разнообразных токарных работ в различных отраслях промышленности на всевозможных операциях для обработки разных материалов. Данный станок оснащен трехкулачковым патроном 7100-0007 ГОСТ 2675-80 диаметром 200 мм с цельными кулачками, класс точности Н.

Особенность таких патронов заключается в том, что усилия зажима сосредоточены на малых площадках контакта зажимных элементов с базовой поверхностью закрепляемой детали. Для обеспечения более равномерного распределения создаваемых кулачками зажимных усилий по окружности закрепляемых деталей 2, используем: разрезные втулки 1 постоянного сечения [23, 33], изображенные на рисунке 3.1.

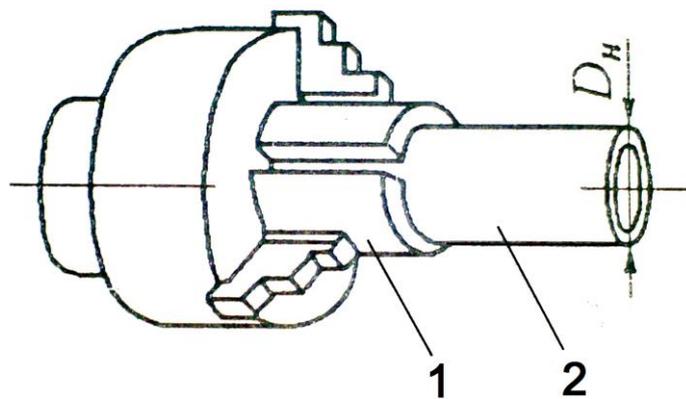


Рисунок 3.1. Эскиз закрепления тонкостенного цилиндрического изделия:
1 – разрезная втулка; 2 – тонкостенная цилиндрическая деталь; D_n – наружный диаметр детали

Рассмотрим устройства для ультразвукового точения. К устройствам данного класса относятся виброголовки, виброупоры, вибросуппорты с пневматическим, гидравлическим, электрическим, механическим и комбинированным возбудителем колебаний.

Виброголовки представляют собой автономные, закрепляемые в резцедержатели, колебательные системы, состоящие из вибратора, концентратора колебаний, волновода и резца, связанные гибкими коммуникациями с генераторами колебаний. Наиболее часто в составе виброголовок применяются магнитострикционные преобразователи (вибраторы). При использовании виброприводов, обеспечивающих ультразвуковые колебания, вибрация инструмента достигается практически независимо от геометрии и формы державки. Напротив, в области ультразвуковых частот, создаваемых магнитострикционными преобразователями, осуществить ультразвуковую обработку без создания державок-концентраторов колебаний соответствующей конструкции и выбора подходящей геометрии режущей части практически не удается.

Для колебательных систем режущего инструмента с магнитострикционными преобразователями необходимо выполнение следующих условий [35]:

- когда инструмент закреплен на концентраторе, используемом для увеличения амплитуды колебаний, необходимо, чтобы достигался резонанс частот вибратора и инструмента;
- режущий инструмент должен легко крепиться к вибратору или концентратору и легко сниматься с ним;
- для колебательной системы инструмента следует определить координаты узлов колебаний и крепить инструмент к суппорту именно в этих местах;
- если колебательная система инструмента соединяется с суппортом в узлах колебаний на болтах, то необходимо подобрать такие конструкции, при которых частота собственных колебаний системы не менялась бы.

Далее рассмотрим виды концентраторов. При ультразвуковой обработке используются концентраторы ступенчатой, конусной, экспоненциальной, катеноидальной и ампульной формы, изображенные на рисунке 3.2.

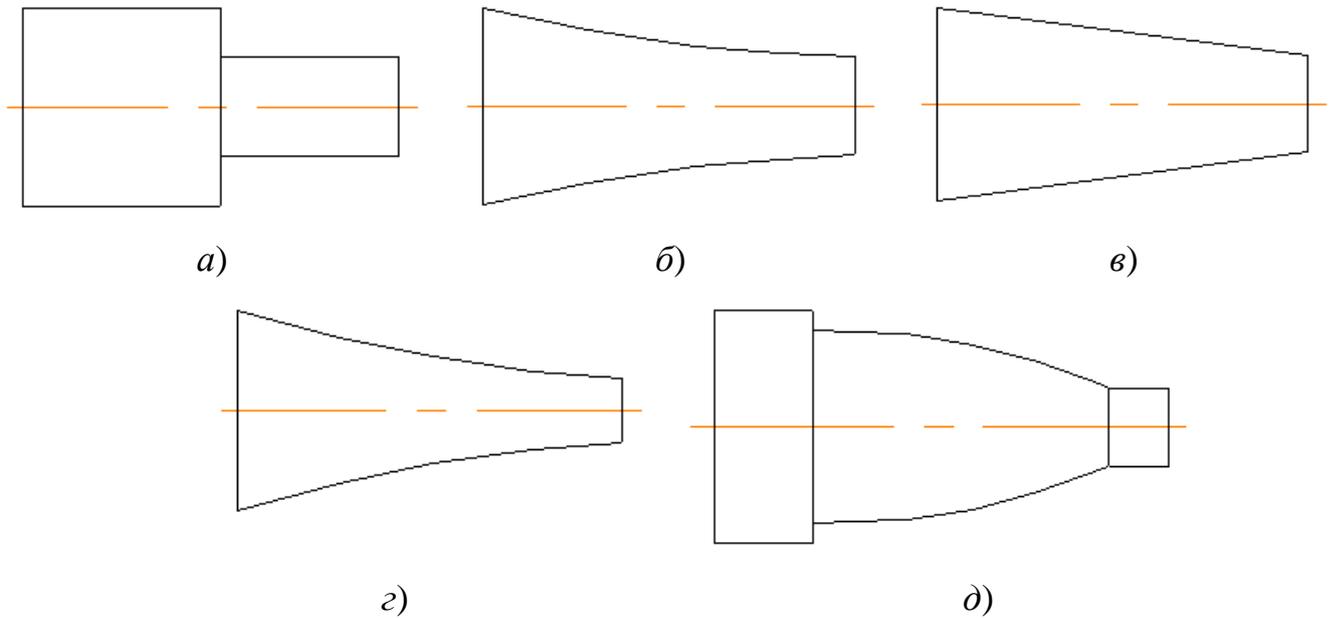


Рисунок 3.2. Виды полуволновых ультразвуковых акустических трансформаторов (концентраторов): а) ступенчатый; б) экспоненциальный; в) конусный; г) катеноидальный; д) ампульно-цилиндрический

При выборе материала для концентратора, работающего со знакопеременными нагрузками, необходимо учитывать усталостную прочность материала и механические потери в нем [41, 77]. Для изготовления концентраторов, используемых в качестве первой ступени усиления, наиболее широко применяются сталь 45, 30ХГСА, В8, обладающие сравнительно небольшими механическими потерями.

При выборе типа концентратора необходимо учитывать следующие их особенности [77]:

1. Конические концентраторы дают наименьший коэффициент трансформации, но они просты в изготовлении и расчете, надежны в эксплуатации;

2. Экспоненциальные и катеноидальные концентраторы обеспечивают большой коэффициент трансформации при работе под нагрузкой, являются хорошими трансформаторами механических сопротивлений; они могут выдерживать значительные механические напряжения в течение длительного времени. Недостаток - сложность в изготовлении.

3. Ступенчатые концентраторы дают наибольший коэффициент трансформации на холостом ходу и при малых нагрузках, просты в расчете и изготовлении. Однако большие амплитуды колебаний вызывают и максимальные механические напряжения. Чтобы эти напряжения не привели к разрушению концентратора, приходится ограничивать максимальную амплитуду колебаний на его выходном торце;

4. Ампульные концентраторы имеют почти постоянное по длине механическое напряжение и могут быть использованы при работе с наибольшими амплитудами смещения.

Принимаем ступенчатый концентратор, который прост в изготовлении и дает наибольший коэффициент трансформации.

Делаем его расчет:

- материал – сталь 45;
- резонансная частота $f = 22000$ Гц;
- скорость звука для углеродистой стали $c = 5150$ м/с;
- коэффициент усиления амплитуды колебаний, обеспечиваемый концентратором $K = 4$;
- наибольший диаметр концентратора находим с учетом большого диаметра магнитострикционного преобразователя ПМС-1-1 ($\varnothing 72 \times 356$). Принимаем диаметр $D_1 = 72$ мм.

- находим меньший диаметр концентратора D_2 , определяем его по формуле:

$$D_2 = \frac{D_1}{\sqrt{K}} ;$$

$$D_2 = \frac{72}{\sqrt{4}} = 36 \text{ мм};$$

- рассчитываем резонансную длину ступенчатого концентратора:

$$l = \frac{c}{2f_0} ;$$

$$l = \frac{5150}{2 \cdot 22000} = 0,11705 \approx 117 \text{ мм};$$

– длина первой степени концентратора диаметром D_2 с учетом расположения узла колебаний:

$$l_{D_1} = \frac{c}{4f_0};$$

$$l_{D_1} = \frac{117}{2} = 58,5 \approx 59 \text{ мм.}$$

Опасное сечение у концентратора колебаний находится в месте перехода диаметров ступеней. Это место необходимо выполнить радиусом, чтобы выполнялось условие:

$$r \geq \left(\frac{D_1 - D_2}{2} \right) \Rightarrow r \geq 18 \text{ мм.}$$

По данным расчетам выполнен чертеж и изготовлен концентратор, изображенный на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3. Ступенчатый полуволновой ультразвуковой акустический концентратор

В левом торце ввернута шпилька, соединяющая концентратор с резцом. Правый торец, так же имеет шпильку, она соединяет концентратор с сердечником преобразователя.

Магнестрикционный преобразователь модели ПМС-1-1 имеет следующие характеристики:

- потребляемая мощность – 1 кВт;
- напряжение питания – 220 В;

- рабочая частота – $22 \pm 1,0$ кГц;
- амплитуда смещения торца – 15 мкм;
- масса, не более – 4,5 кг;
- габаритные размеры ($\varnothing 72 \times 356$).

Для проведения экспериментального исследования было разработано приспособление для тангенциального (рисунок 3.4) и радиального (рисунок 3.5) направления колебаний.

Установку, состоящую из магнестрикционного преобразователя 9, кольца 8, ступенчатого концентратора 7 и стального листа 6, устанавливали вертикально и закрепляли винтами 11 к стальному уголку 10, который в свою очередь крепился на резцедержателе 1 с помощью винтов 5. Резец 2, имеющий удлиненную хвостовую часть, устанавливался в рабочее положение между направляющими опорами 3 и закреплялся винтами 4. Резец к концентратору крепился с помощью шпильки.

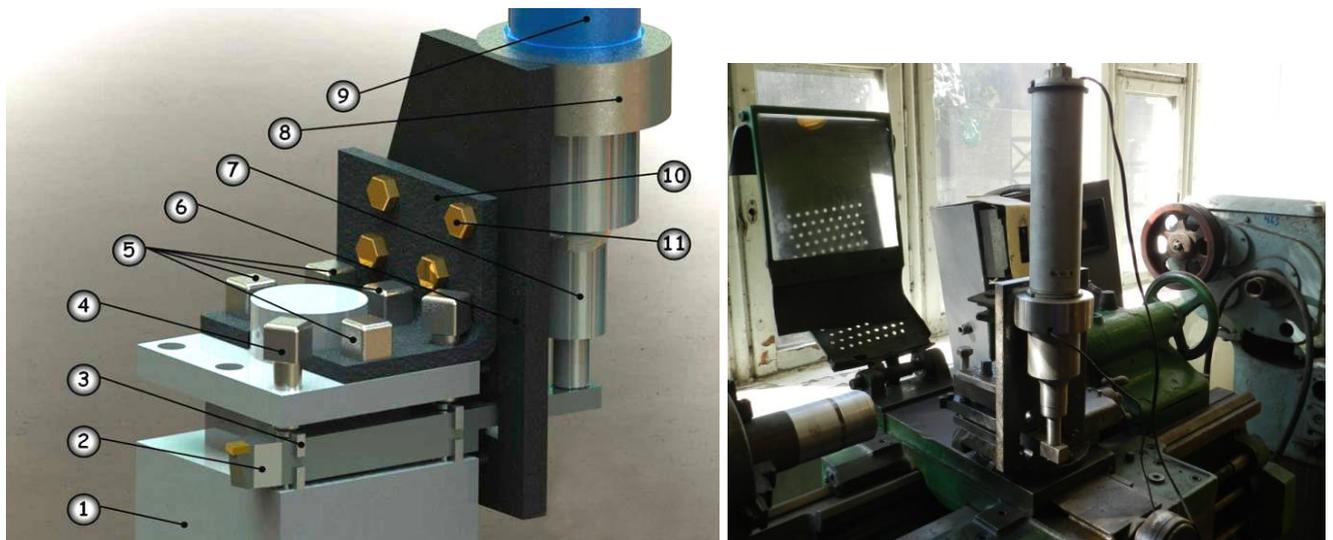


Рисунок 3.4. Экспериментальная установка для тангенциального направления колебаний:

- 1 – резцедержатель; 2 – резец; 3 – направляющие опоры; 4,5 – винты М14;
 6 – стальной лист; 7 – концентратор ступенчатый; 8 – кольцо;
 9 – преобразователь магнестрикционный; 10 – стальной уголок; 11 – винт М12

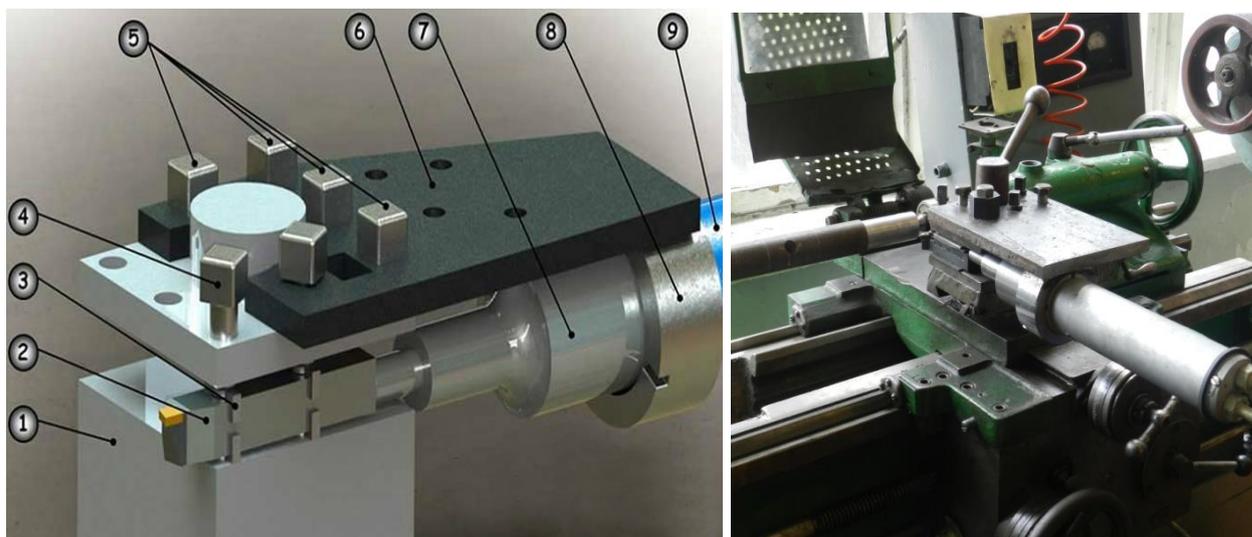


Рисунок 3.5. Экспериментальная установка для радиального направления колебаний:

- 1 – резцедержатель; 2 – резец; 3 – направляющие опоры; 4,5 – винты М14;
 6 – стальной лист; 7 – концентратор ступенчатый; 8 – кольцо;
 9 – преобразователь магнитострикционный

Источником питания преобразователя служит ультразвуковой генератор модели УСО 1-1М, который преобразовывает электрическую энергию промышленной частоты в электрическую энергию ультразвуковой частоты. В связи с тем, что преобразователь в ходе работы может нагреваться, предусмотрено подведение охлаждающей жидкости электронасосом станка к соплу 3 преобразователя, расположенного на задней части корпуса.

После установки приспособления на станке, необходимо снять выходные параметры. В качестве такого параметра выступает радиальная и тангенциальная составляющие силы резания. Измерение осуществлялось с помощью датчиков на основе тензорезисторов с сопротивлением в 95,9 Ом. Тензорезисторы R1 и R2 собирались по схеме, показанной на рисунке 3.6. Затем подключались через трехканальный разъем к усилителю, который усиливал входной сигнал на выходе. Также с помощью усилителя выполнялась установка сигнала на 0. С усилителя по шине 4 через каналы 0 и 1, подключалась к плате ADC-16 британского производителя «Pico Technology Limited» (рисунок 3.7).

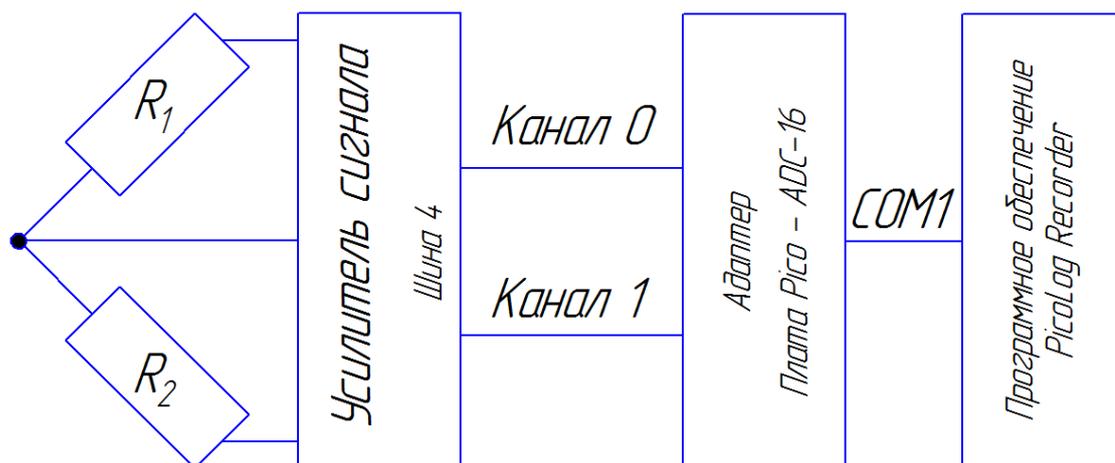


Рисунок 3.6. Схема подключения датчиков на основе тензорезисторов

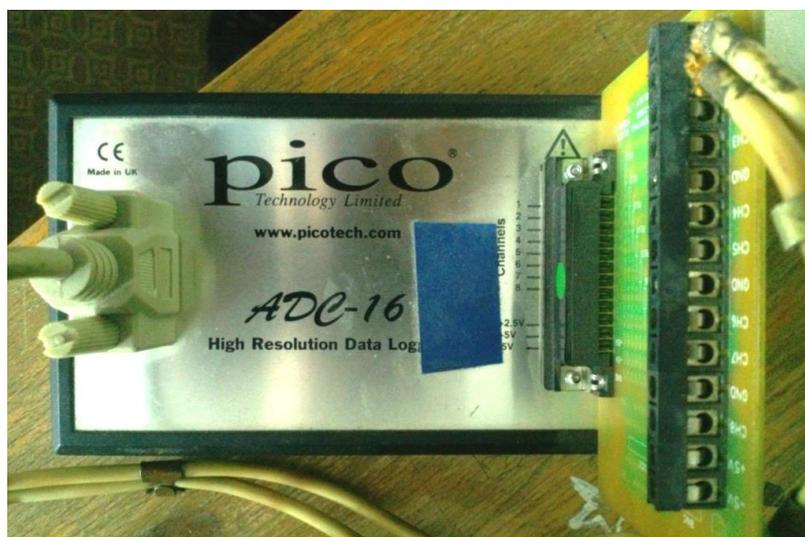


Рисунок 3.7. Высокочастотная плата ADC-16 «Pico Technology Limited»

Данная плата подключалась к компьютеру через COM-порт, и с помощью программного обеспечения PicoLog Recorder позволяла считывать данные в процессе обработки.

Программа выводила данные на экран в милливольтках mV. Для получения значения силы резания в Ньютонах, необходимо было сделать тарировку, предварительно нагрузив систему определенными эталонами веса ($1\text{mV} = 4,478\text{ Н}$).

На рисунке 3.8 изображен ультразвуковой модуль для обработки тонкостенных цилиндрических изделий на базе токарно-винторезного станка модели 1М61.



Рисунок 3.8. Ультразвуковой обрабатывающий модуль

3.2 Анализ особенностей измерения частоты и амплитуды колебаний инструмента

Частота колебаний инструмента при обработке материалов проверялась с использованием отпечатков, оставленных на обработанной поверхности заготовки. При каждом движении вершины инструмента оставался отпечаток, а при известном диаметре заготовки и числе оборотов можно без проблем рассчитать частоту колебания инструмента. Воспользуемся формулой для определения периода колебания t в секундах:

$$t = (\Delta S \cdot 60) / (D \cdot \pi \cdot n) [\text{сек.}],$$

где ΔS – шаг отпечатки на обработанной поверхности детали в мм;

D – диаметр обработанной поверхности в мм;

n – число оборотов в минуту детали.

Для нахождения значения частоты использовали формулу:

$$f = 1/t [\text{Гц}],$$

где f – частота колебаний инструмента в Гц;

t – период колебаний в секундах.

По результатам измерения шагов, оставленных на обработанной поверхности заготовки получили среднее значение шага отпечатка $S = 0,0142 \pm 0,0001$ мм. Заготовка вращалась с частотой $n = 60$ об/мин., а диаметр заготовки был равен $D = 100 \pm 0,1$ мм.

$$t = (\Delta S \cdot 60) / (D \cdot \pi \cdot n) = (0,0102 \cdot 60) / (100 \cdot 3,14 \cdot 60) = 4,522 \cdot 10^{-5} \text{ (сек.)},$$

$$f = 1/t = 1/4,522 \cdot 10^{-5} = 22,10 \text{ (кГц)}$$

Для измерения амплитуд колебаний инструмента при обработке материала был использован метод высокоскоростной видеосъемки на аппарате «Photron Fastcam SA-4». Это камера, способная получать изображения со скоростью 3600 кадров в секунду при мегапиксельном (1024x1024) разрешении. При уменьшенном разрешении скорость возрастает до 500000 кадров в секунду. Скорость видеосъемки ультразвукового течения была 30000 кадров в секунду.

Заготовка была закреплена в 3-х кулачковом патроне станка 1М61, а камера находилась на станине станка. Режимы резания были: $s = 0,5$ мм/об, $t = 1,0$ мм, $V = 18,84$ м/мин. Режущим инструментом служила твердосплавная пластина Т5К10.

Для измерения амплитуды с помощью высокоскоростной видеосъемки, понадобилась помощь программного обеспечения «ТЕМА MOTION».

На панели генератора есть шкала, которая указывает на большую (значение 1) или меньшую (значение 20) мощность работы концентратора. Эти значения варьируются с помощью регулятора, который находится в левом нижнем углу шкалы. При каждом значении шкалы, вибрационная головка колеблется с определенной амплитудой. Наша задача – измерить амплитуду колебания вибрационной головки для каждого значения мощности на шкале, т.е. провести тарировку.

Вибрационная головка неподвижно установилась в горизонтальном положении на столе микротвердомера для измерения размаха колебания вершины инструмента. При выключенном генераторе ультразвукового прибора, в поле зрения микроскопа, фиксировали одну точку на вершине инструмента. Затем, включали генератор и наблюдали за размахом.

Размах амплитуды для каждого показателя мощности генератора измерялся пять раз. Среднее значение полученных результатов для каждого уровня мощности записаны в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Среднее значение амплитуды колебаний

Показания шкалы мощности	Размах колебаний концентратора в тангенциальном направлении (мкм)	Размах колебаний концентратора в радиальном направлении (мкм)
1	15,01	10,08
3	12,92	6,89
5	9,12	4,72
10	6,93	2,16
20	3,48	0,12

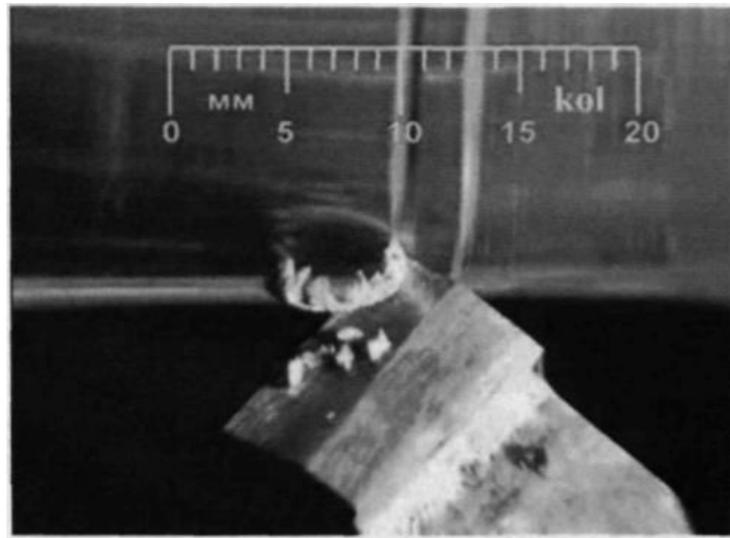
3.3 Влияние ультразвуковых колебаний при резании на качество получаемой поверхности

Как известно, автоколебания влияют на процесс формирования стружки. Сливная стружка соответствует устойчивому резанию, а сегментная – менее устойчивому. На рисунке 3.9 иллюстрируются процессы формирования стружки при обработке с ультразвуком и без него, и подтверждается вышесказанное об особенностях формирования сливной и сегментной стружек. Поскольку обработка с ультразвуком сопровождается сливной стружкой, то это подчеркивает, что такая технология способствует повышению устойчивости резания.

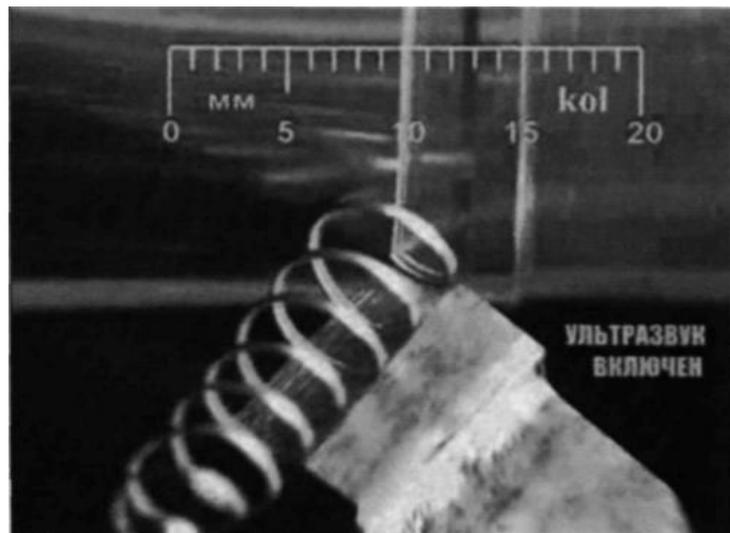
Для изучения влияния ультразвукового воздействия использовали материал Сталь коррозионностойкая жаропрочная X18H12T. Материал обрабатывали на станке 1М61.

Ниже приводятся увеличенные фотографии поверхностей, обработанных с ультразвуком и без него, для того, чтобы сравнить результат применения этой технологии. Увеличенные изображения обработанных поверхностей были сделаны с помощью микроскопов ММУ-3, ПМТ-3 и цифровой камеры «Webbers» DCM-130M. Перед работой на микроскопе проводилась тарировка масштаба увеличения камеры. После этого масштаб отображался на самой фотографии [36, 40].

На рисунке 3.10 показаны результаты обработки материала без ультразвука и с ультразвуком.



а)



б)

Рисунок 3.9. Изменение характера стружки при обработке с ультразвуком:

- а)* сегментная стружка (неустойчивое резание);
- б)* сливная стружка (устойчивое резание) [95]

Визуальное наблюдение поверхности, полученное после обработки материала с использованием ультразвукового приспособления, показали, что применение этого метода обработки положительно сказывается на шероховатости получаемой поверхности, если сравнивать с обычным резанием в тех же условиях, но без применения ультразвука.

Нижеуказанные фотографии отображают поверхности, обработанные без применения СОТС, т.е. сухое ультразвуковое резание.

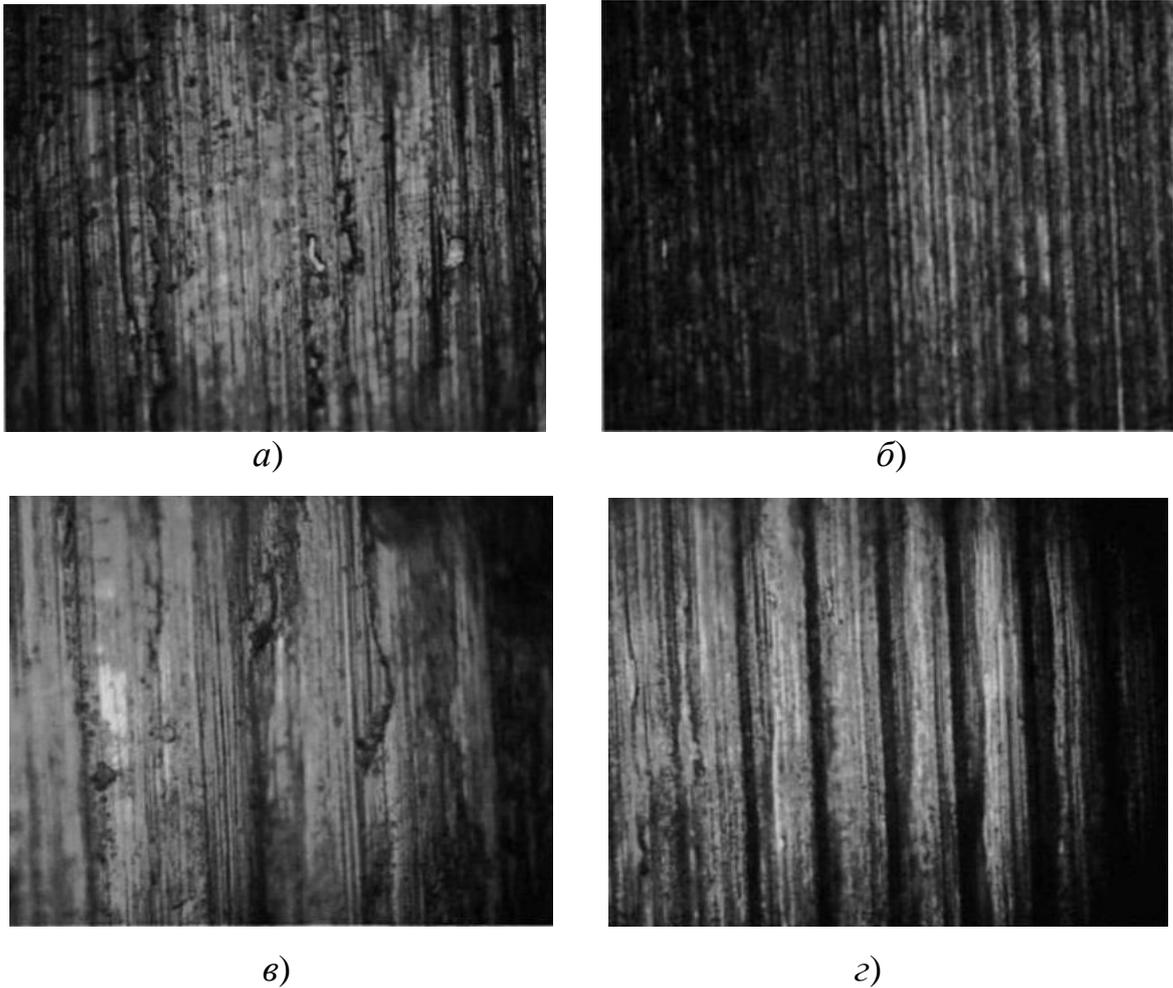


Рисунок 3.10. Поверхности после обработки:
без ультразвука $Rz = 22,7$ мкм, а) 100х, в) 200х;
с ультразвуком $Rz = 4,21$ мкм, б) 100х, г) 200х

Нужно сказать, что процессы резания при обработке материала были устойчивыми. Эту устойчивость можно оценить по качеству оставленных инструментом следов канавок. На фотографиях канавки, оставленные после обработки с ультразвуком, имеют четкий профиль, который сохраняется за всё время обработки. Этого нельзя сказать о канавках, оставленных после обработки без ультразвука, где видны следы удара инструмента о поверхности. Хотя есть участки поверхности, где присутствуют следы с хорошим профилем, они не сохраняются на всей протяженности обработки.

3.5 Выводы

В данном разделе проведен анализ технологических методов повышения производительности тонкостенных цилиндрических изделий при ультразвуковой обработке. Выполненные здесь исследования заключаются в следующем.

1. Рассмотрены основные особенности направления действия колебаний, их достоинства и недостатки. Определено тангенциальное направление колебаний в качестве наиболее предпочтительного, которое позволяет снизить тангенциальную составляющую силы резания.

2. Рассмотрена конструкция и внешний вид оборудования, входящего в состав ультразвукового обрабатывающего модуля.

3. Решена проблема закрепления тонкостенной цилиндрической заготовки с помощью установки дополнительной разрезной втулки, увеличивающей площадь зажима.

4. Проанализированы типы концентраторов, выбран наиболее подходящий - ступенчатый концентратор, проведен его расчет.

5. Решен вопрос измерения выходного параметра с помощью тензометрических датчиков. Проведена тарировка получаемого сигнала.

6. Проанализированы особенности измерения частоты и амплитуды колебаний инструмента.

7. Рассмотрено влияние ультразвуковых колебаний при резании на качество получаемой поверхности. Визуальное наблюдение поверхности, полученное после обработки материала с использованием ультразвукового приспособления, показали, что применение этого метода обработки положительно сказывается на шероховатости получаемой поверхности, если сравнивать с обычным резанием в тех же условиях, но без применения ультразвука (без ультразвука $Rz = 22,7$ мкм, с ультразвуком $Rz = 4,21$ мкм).

РАЗДЕЛ 4

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комбинированная обработка ТЦИ представляет собой совокупность процессов преобразования свойств изделий от начального состояния к конечному состоянию за счет реализации комбинированных технологических воздействий орудий и средств обработки на ТЦИ. В этом случае, технологические воздействия могут реализовываться различными методами, а преобразования свойств изделия различными принципами. При этом технологические воздействия, характеризующиеся потоками материи, энергии и информации, выполняются за счет комбинации различных видов материи, энергии и информации.

В данной главе проведены экспериментальные исследования по определению влияния режимов резания на силовые параметры при обработке тонкостенных цилиндрических изделий за счет наложения ультразвуковых колебаний [64, 65, 96, 105, 112].

4.1 Методика экспериментальных исследований

Целью данного экспериментального исследования является подтверждение либо опровержение теории, которая гласит о том, что во время наложения ультразвуковых колебаний на инструмент при обработке тонкостенных изделий возможно снижение силы резания, что в конечном итоге позволит повысить производительность обработки в целом [25, 26, 27, 28, 42].

Реализация вибрационной обработки осуществляется на модернизированном токарно-винторезном станке модели 1М61. Модернизация станка состоит в установке на резцедержатель специальной виброголовки, описанной в разделе 4. Источником высокочастотных колебаний служит магнитострикционный преобразователь модели ПМС-1-1. Преобразует бытовые частоты в ультразвуковые – ультразвуковой генератор модели УЗГ-1-1.

В качестве режущего инструмента был взят резец проходной MSSNR 2020 K12 с механическим креплением квадратной твердосплавной пластины T5K10. Модернизация резца состоит в увеличении длины резца для того, чтобы колебательная система резца являлась резонансной [123].

Для эксперимента в качестве заготовки были взяты две стальные тонкостенные цилиндрические заготовки с габаритными размерами $\varnothing 100 \times 356$.

Из анализа литературных источников и по результатам однофакторных экспериментов выделены для дальнейшего исследования следующие факторы:

- глубина резания t , мм;
- скорость резания V , м/мин.

Остальные факторы имеют следующие значения:

- частота колебаний $f = 22 \pm 7,5\%$ кГц;
- амплитуда колебаний $a = 15$ мкм;
- подача $S = 0,5$ мм/об;
- концентратор – ступенчатый;
- материал заготовки – сталь 45, X18H12T.

Для облегчения построения эксперимента фактор должен иметь определенное число дискретных уровней. Это есть условие проведения одного из возможных состояний. Значения уровней и интервалов варьирования факторов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1. Значения уровней и интервалов варьирования факторов

Наименования и обозначения факторов	Уровни варьирования			Интервалы варьирования
	-1	0	+1	
Глубина резания t , мм	0,5	1	1,5	0,5
Скорость резания V , м/мин	60	80	100	20

Измеряемым параметром являлась тангенциальная составляющая силы резания P_z . Измерения проводились с помощью датчиков на основе тензорезисто-

ров, и в конечном итоге выдавались на экран компьютера с помощью программного продукта «PicoLog Recorder». Данные были получены в милливольтгах mV с интервалом в 1 миллисекунду (ms).

Работа проводилась в два этапа. Проведение полнофакторного эксперимента при обработке первой заготовки. На втором – обрабатывалась вторая заготовка.

На первой заготовке производилась обработка ступенчато с наибольшей глубины с последовательным изменением с меньшей скорости, к наименьшей глубине и большей скорости. На второй заготовке весь эксперимент проводился в обратном порядке для исключения факторов отжата системы СПИД, а также избегания погрешностей, связанных с изменением толщины стенки. Ведь при каждом последующем проходе исходная величина толщины стенки уменьшается, что может оказать соответствующее влияние на результат.

Если перебрать все возможные наборы состояний, то получается множество различных состояний. Одновременно это и будет число возможных различных опытов, которое определяется:

$$N = p^k,$$

где p – число уровней;

k – число факторов.

$$N = 3^2 = 9.$$

Имеем эксперимент, в котором реализуются все возможные сочетания 3х уровней 2х факторов. Условия эксперимента записываем в виде таблицы 4.2.

Таблица 4.2. Матрица планирования эксперимента

Уровни t \ Уровни V	1	2	3
1	Y1	Y2	Y3
2	Y4	Y5	Y6
3	Y7	Y8	Y9

Данная матрица планирования эксперимента определяет порядок проведения эксперимента.

4.2 Обработка результатов

Используемое программное обеспечение британской компании «Pico Technology Limited» позволяет получать точные данные с весьма малым интервальным шагом, всего в 1 миллисекунду. При проведении эксперимента в файлы записывалось по 50000 значений каждый раз. Включая запись, сразу же начиналось обычное резание. После некоторого промежутка времени, подавались высокочастотные колебания на инструмент, при этом фиксируя начало и конец по временной шкале в программном продукте «PicoLog Recorder». Затем обработку останавливали, изменяли режимы, и запускали все заново.

На второй заготовке, порядок проведения повторялся. Необходимо сказать, что явных отличий при обработке заготовок в разном порядке не было выявлено. После проведения эксперимента был снят слой материала, и значения полученных сигналов весома не отличались для каждой заготовки. Поэтому дальнейшие результаты приводятся для одной заготовки.

Для анализа полученных результатов в каждом опыте эксперимента, было взято по 250 значений выходного параметра. Причем взято так, чтобы серединой являлась зона перехода от обычного к ультразвуковому резанию.

Проанализируем полученные данные эксперимента.

В первом опыте выходной параметр, а именно значение тангенциальной составляющей силы резания P_z был получен при глубине резания $t = 0,5$ мм и скорости резания $v = 60$ м/мин. На рисунке 4.1 изображена диаграмма, полученная в PLW Graph, на которой заметен «скачек» сигнала при наложении высоких частот.

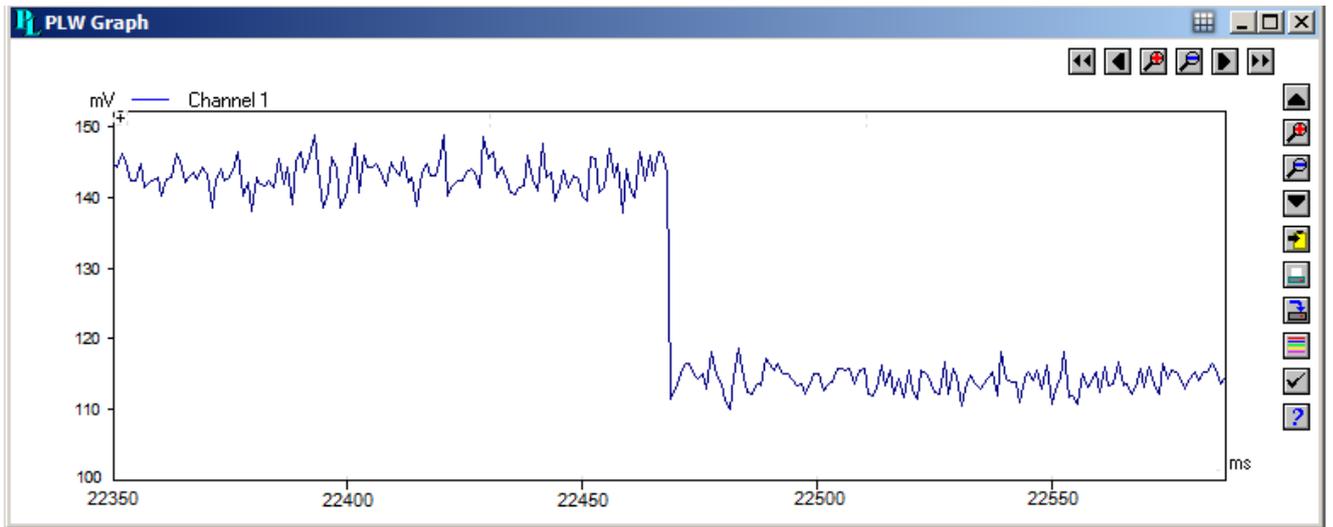


Рисунок 4.1. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 0,5$ мм и $v = 60$ м/мин)

Тарировка была произведена ранее и получен коэффициент перевода милливольт (mV) в ньютон (H). Пересчитываем и выводим средние значения для первого опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 641 H ;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 356 H .

Определяем относительную величину снижения силы резания по формуле:

$$\Delta = 100 - \frac{P_{z2}}{P_{z1}} \cdot 100, \%$$

где P_{z2} – среднее значение силы резания при вибрационном точении, H ;

P_{z1} – среднее значение силы резания при обычном точении, H .

$$\Delta = 100 - \frac{356}{641} \cdot 100 = 44,46\%$$

В первом опыте при глубине резания $t = 0,5$ мм и скорости резания $v = 60$ м/мин сила резания уменьшилась на 44,46%.

Во втором опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 0,5$ мм и скорости резания $v = 80$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала представлена на рисунке 4.2.

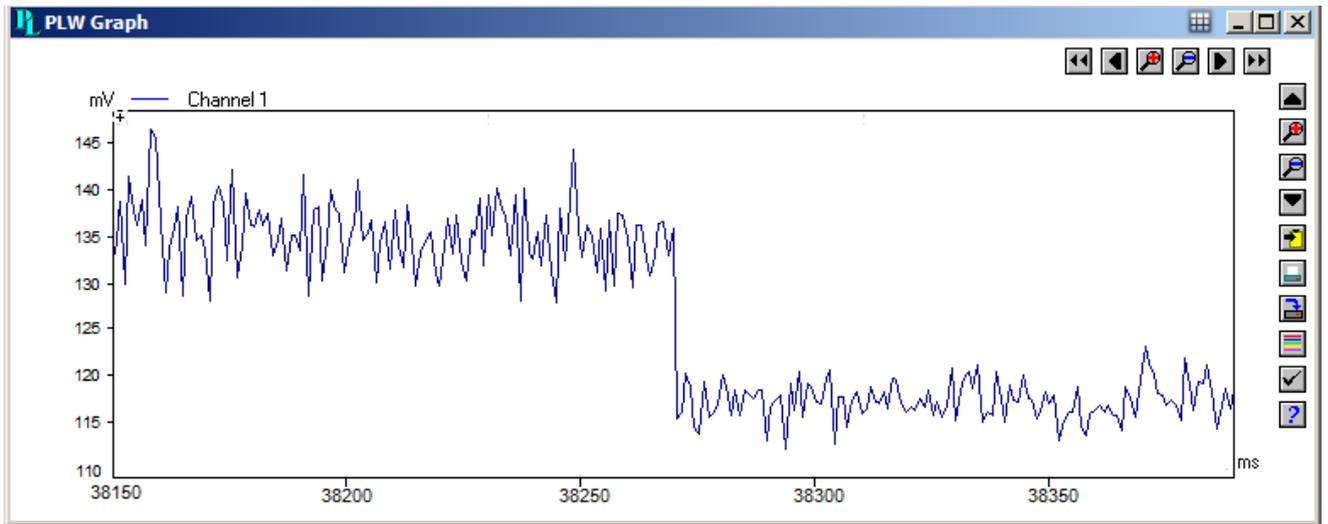


Рисунок 4.2. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 0,5$ мм и $v = 80$ м/мин)

Пересчитываем и выводим средние значения для второго опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 603 Н;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 383 Н.

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{383}{603} \cdot 100 = 36,48\%$$

Во втором опыте при глубине резания $t = 0,5$ мм и скорости резания $v = 80$ м/мин сила резания уменьшилась на 36,48%.

В третьем опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 0,5$ мм и скорости резания $v = 100$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала изображена на рисунке 4.3.

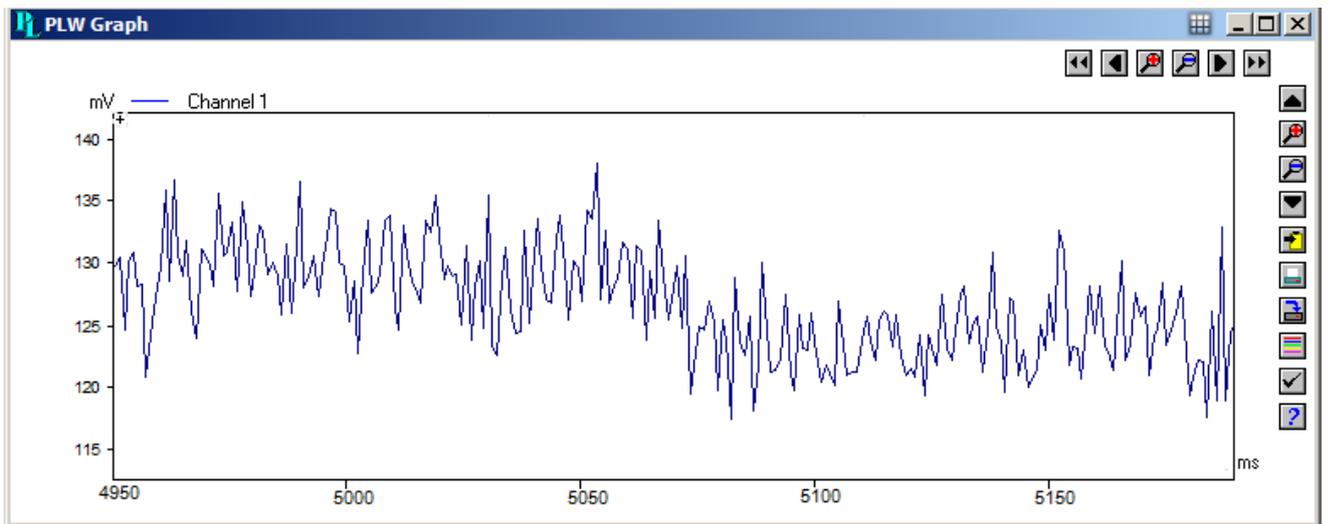


Рисунок 4.3. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 0,5$ мм и $v = 100$ м/мин)

Пересчитываем и выводим средние значения для третьего опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 578 Н;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 412 Н.

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{412}{578} \cdot 100 = 28,72\%$$

В третьем опыте при глубине резания $t = 0,5$ мм и скорости резания $v = 100$ м/мин сила резания уменьшилась на 28,72%.

В четвертом опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 1$ мм и скорости резания $v = 60$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала изображена на рисунке 4.4.

Пересчитываем и выводим средние значения для четвертого опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 1282 Н;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 642 Н.

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{642}{1282} \cdot 100 = 49,92\%$$

В четвертом опыте при глубине резания $t = 1$ мм и скорости резания $v = 60$ м/мин сила резания уменьшилась на 49,92%.

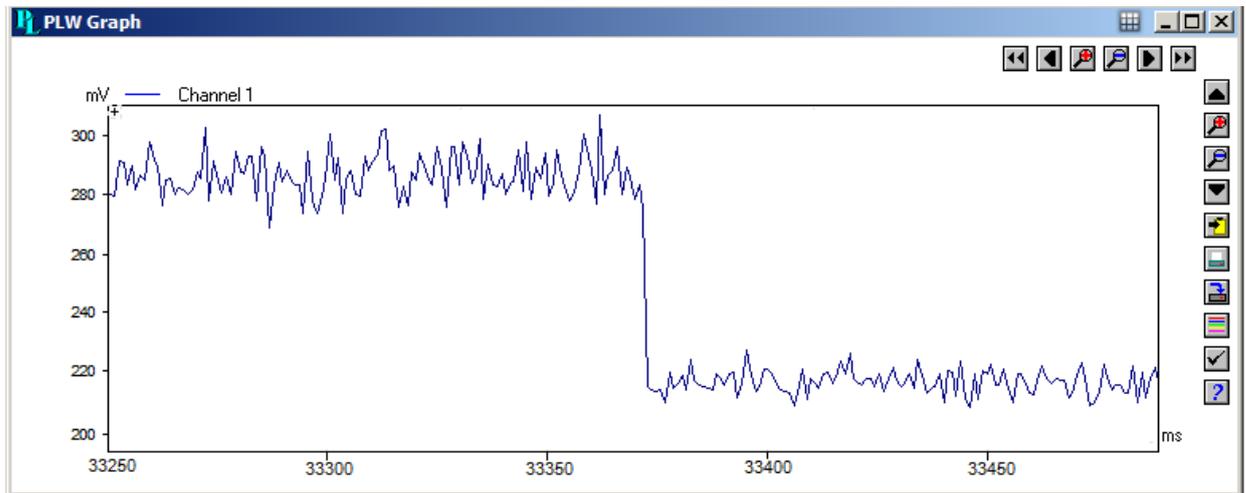


Рисунок 4.4. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 1$ мм и $v = 60$ м/мин)

В пятом опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 1$ мм и скорости резания $v = 80$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала изображена на рисунке 4.5.

Пересчитываем и выводим средние значения для пятого опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 1207 Н;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 712 Н.

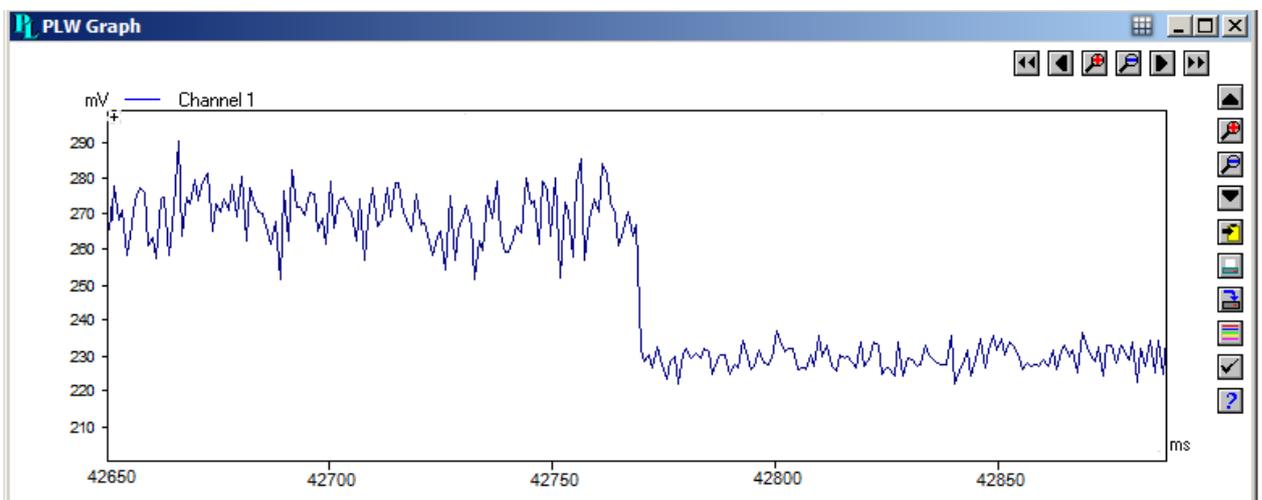


Рисунок 4.5. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 1$ мм и $v = 80$ м/мин)

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{712}{1207} \cdot 100 = 41,01\%$$

В пятом опыте при глубине резания $t = 1$ мм и скорости резания $v = 80$ м/мин сила резания уменьшилась на 41,01%.

В шестом опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 1$ мм и скорости резания $v = 100$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала изображена на рисунке 4.6.

Пересчитываем и выводим средние значения для шестого опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 1156 Н;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 783 Н.

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{783}{1156} \cdot 100 = 32,27\%$$

В шестом опыте при глубине резания $t = 1$ мм и скорости резания $v = 100$ м/мин сила резания уменьшилась на 32,27%.

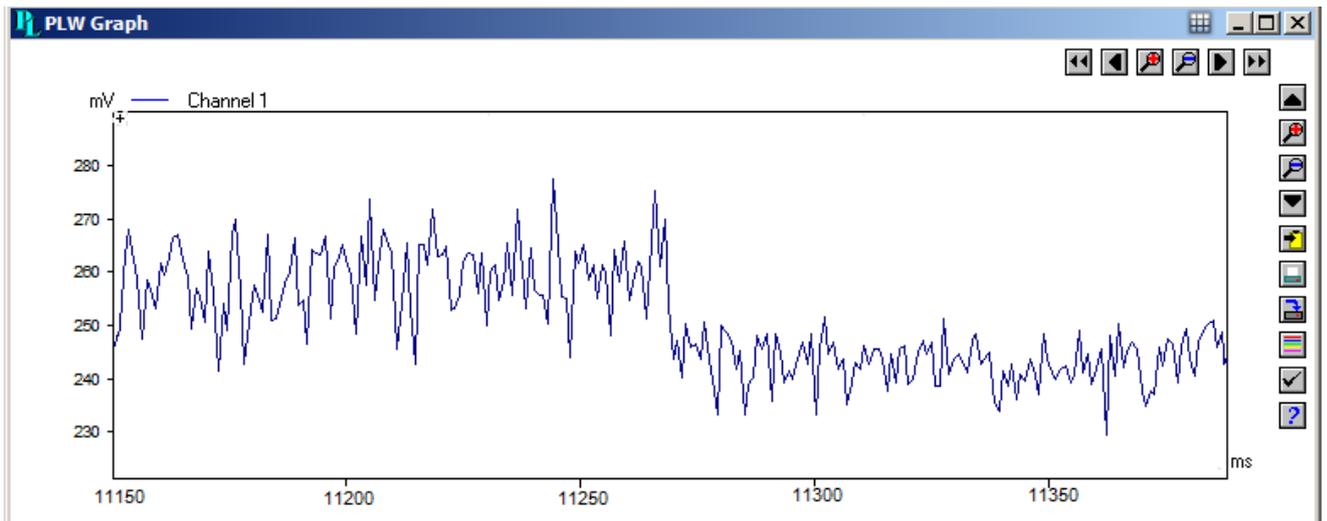


Рисунок 4.6. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 1$ мм и $v = 100$ м/мин)

В седьмом опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 1,5$ мм и скорости резания $v = 60$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала изображена на рисунке 4.7.

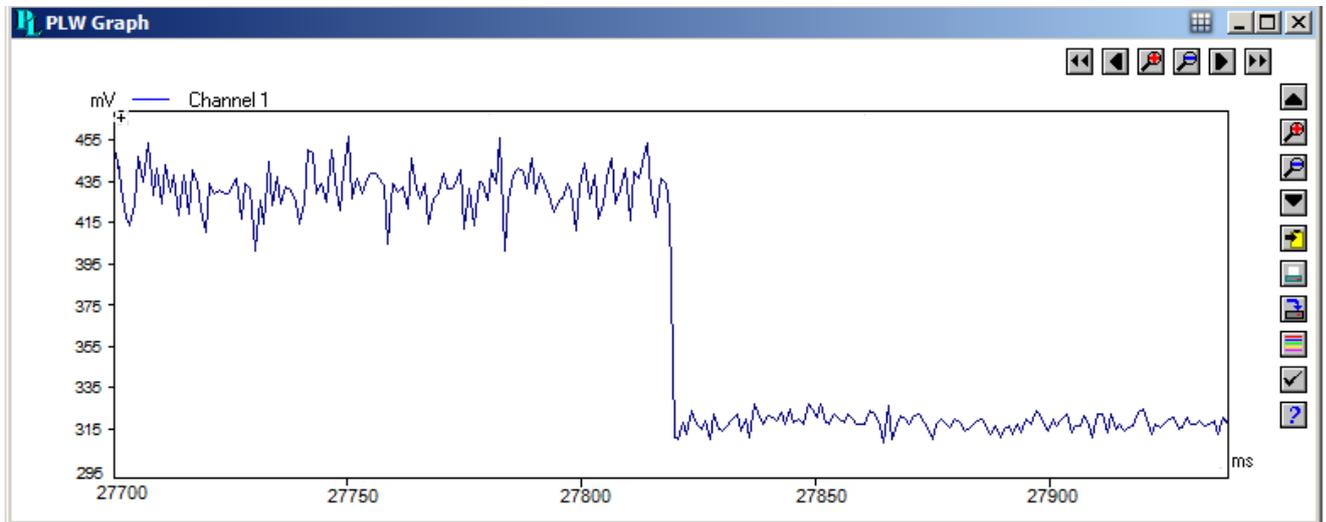


Рисунок 4.7. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента при $t = 1,5$ мм и $v = 60$ м/мин

Пересчитываем и выводим средние значения для седьмого опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 1923 Н;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 853 Н.

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{853}{1923} \cdot 100 = 55,64\%$$

В седьмом опыте при глубине резания $t = 1,5$ мм и скорости резания $v = 60$ м/мин сила резания уменьшилась на 55,64%.

В восьмом опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 1,5$ мм и скорости резания $v = 80$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала изображена на рисунке 4.8.

Пересчитываем и выводим средние значения для восьмого опыта:

- среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 1810 Н;
- среднее значение P_z при вибрационном резании равно 962 Н.

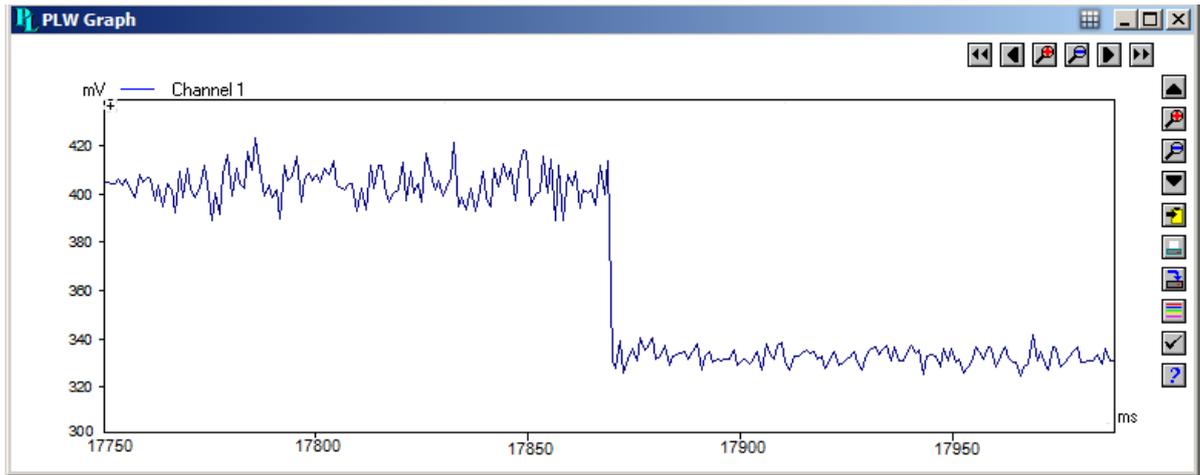


Рисунок 4.8. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 1,5$ мм и $v = 80$ м/мин)

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{962}{1810} \cdot 100 = 46,85\%$$

В восьмом опыте при глубине резания $t = 1,5$ мм и скорости резания $v = 80$ м/мин сила резания уменьшилась на 46,85%.

В девятом опыте значение силы резания были получены при глубине резания $t = 1,5$ мм и скорости резания $v = 100$ м/мин. Диаграмма изменения сигнала изображена на рисунке 4.9.

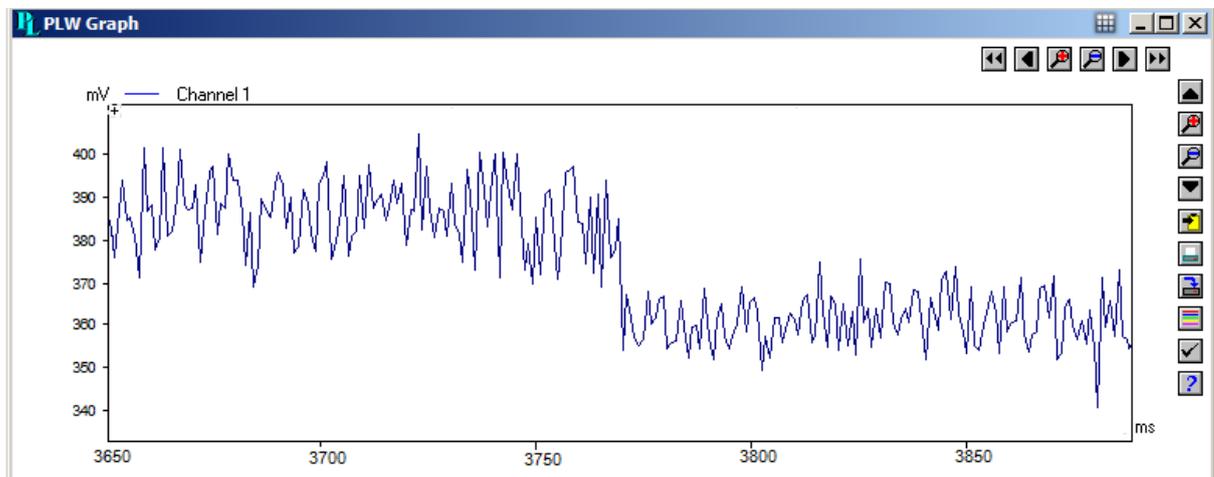


Рисунок 4.9. Диаграмма изменения выходного сигнала при наложении высокочастотных колебаний инструмента ($t = 1,5$ мм и $v = 100$ м/мин)

Пересчитываем и выводим средние значения для девятого опыта:

– среднее значение P_z при обработке без ультразвука равно 1733 Н;

– среднее значение P_z при вибрационном резании равно 1103 Н.

Определяем относительную величину снижения силы резания:

$$\Delta = 100 - \frac{1103}{1733} \cdot 100 = 36,35\%$$

В девятом опыте при глубине резания $t = 1,5$ мм и скорости резания $v = 100$ м/мин сила резания уменьшилась на 36,35%.

В результате получено по 9-ть сил резания для обычного точения (n1) и ультразвукового (n2):

n1: 641; 603; 578; 1282; 1207; 1156; 1923; 1810; 1733;

n2: 356; 383; 412; 642; 712; 783; 853; 962; 1103.

При проведении серии параллельных опытов возможен случай, когда в одном или нескольких опытах получен результат, значительно отличающийся от основной массы результатов. Такой результат называют грубой ошибкой, а выборку, содержащую грубые ошибки – неоднородной. Наличие в выборке грубых ошибок может существенно исказить результаты исследования, поэтому необходимо провести проверку однородности выборок и дисперсий, с целью удаления грубых ошибок.

Определяем выборочное среднее по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i,$$

где N – количество значений в выборке;

x_i – единичное значение выборки.

$$\bar{x}_1 = \frac{641 + 603 + 578 + 1282 + 1207 + 1156 + 1923 + 1810 + 1733}{9} = 1214,78 \text{ Н};$$

$$\bar{x}_2 = \frac{356 + 383 + 412 + 642 + 712 + 783 + 853 + 962 + 1103}{9} = 689,56 \text{ Н}.$$

Определяем среднеквадратическое отклонение выборки по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}.$$

$$S_1 = \sqrt{\frac{1}{9-1} \left((641-1214,78)^2 + \dots + (1733-1214,78)^2 \right)} = 529,32H;$$

$$S_2 = \sqrt{\frac{1}{9-1} \left((356-689,56)^2 + \dots + (1103-689,56)^2 \right)} = 290,7H;$$

Методика проверки однородности выборки сводится к определению с соответствующей вероятностью доверительного интервала по формуле:

$$\bar{x} - hS \leq x \leq \bar{x} + hS,$$

где \bar{x} – среднеарифметическое значение выборки;

h – параметр, значение которого зависит от уровня значимости $a = 0,05$ и объема выборки n , $h = 2,11$;

S – среднеквадратическое отклонение выборки.

$$\text{Для } n_1: 1214,78 - 2,11 \cdot 529,32 \leq x \leq 1214,78 + 2,11 \cdot 529,32 \Rightarrow 97,91 \leq x \leq 2331,64;$$

$$\text{для } n_2: 689,56 - 2,11 \cdot 290,7 \leq x \leq 689,56 + 2,11 \cdot 290,7 \Rightarrow 76,18 \leq x \leq 1302,94.$$

Так как все результаты попадают в доверительный интервал, то можно сказать, что выборки однородны и возможна дальнейшая обработка результатов.

Проверим однородность дисперсий по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad S_1^2 > S_2^2,$$

$$F = \frac{529,32^2}{290,7^2} = 3,32.$$

Сравниваем расчетное значение критерия с критическим табличным, определяется для принятого уровня значимости a и степеней свободы f_1 и f_2 соответствующих дисперсий. Значение критерия F а (f_1, f_2) при уровне значимости $a = 0,05$ равно 3,44. Так как расчетное значение меньше табличного, то дисперсии однородны.

4.3 Результаты экспериментальных исследований

По полученным данным можно построить диаграммы зависимостей, изображенные на рисунках 4.10, 4.11, 4.12, тангенциальной составляющей силы резания от изменения глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости резания 60, 80 и 100 м/мин соответственно (сталь 45).

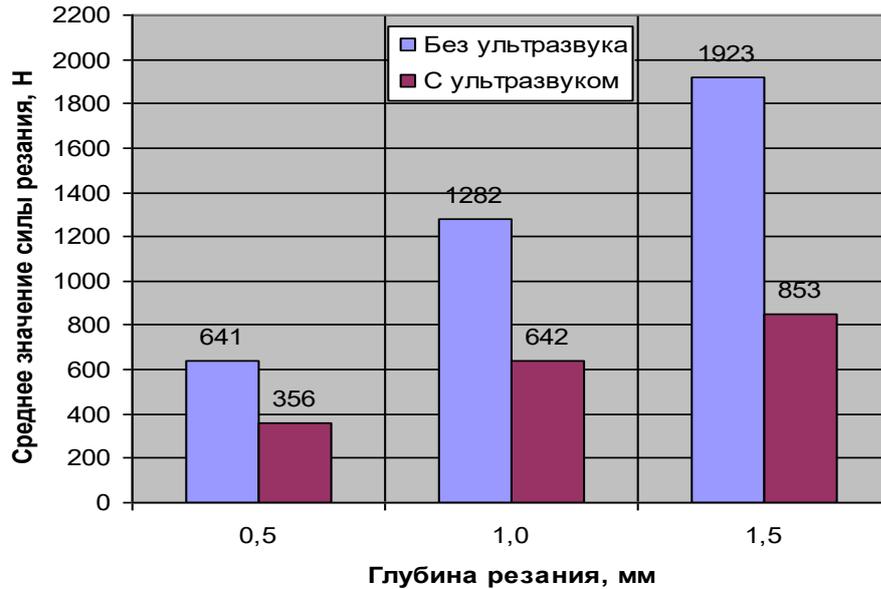


Рисунок 4.10. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 60 м/мин

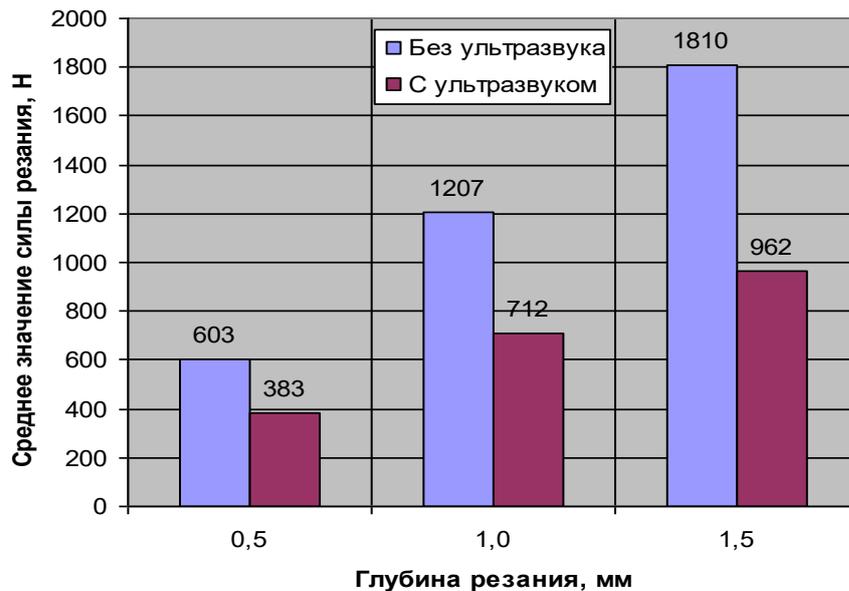


Рисунок 4.11. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 80 м/мин

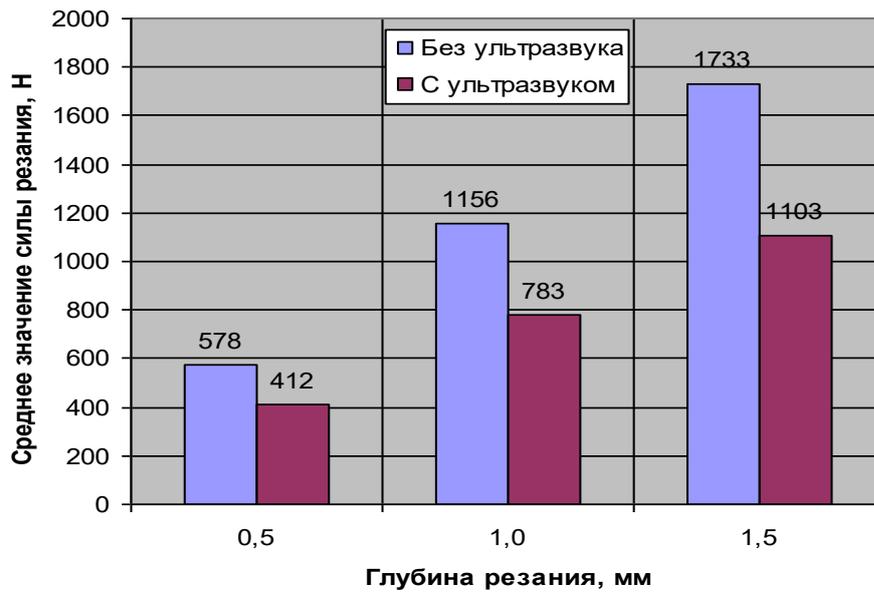


Рисунок 4.12. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 100 м/мин

На рисунках 4.13, 4.14, 4.15 приведены диаграммы зависимостей радиальной составляющей силы резания от изменения глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости резания 60, 80 и 100 м/мин соответственно (сталь 45).

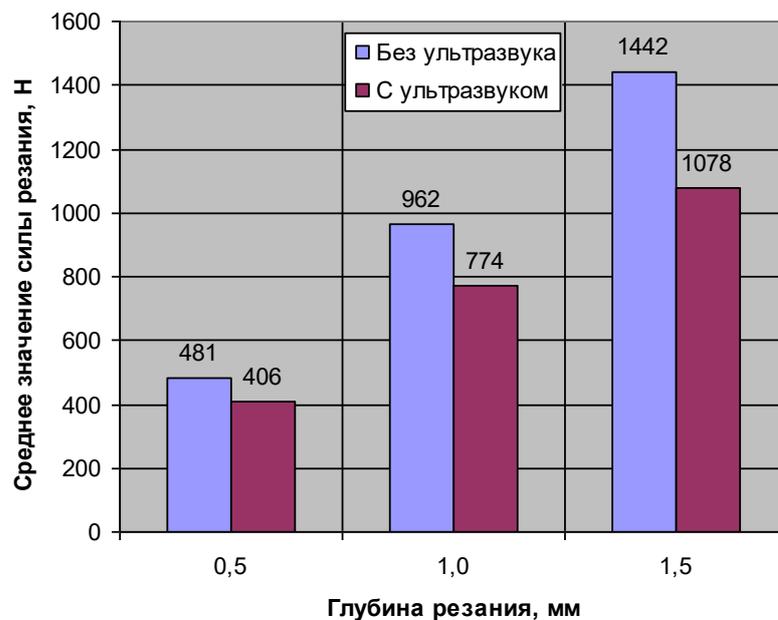


Рисунок 4.13. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 60 м/мин

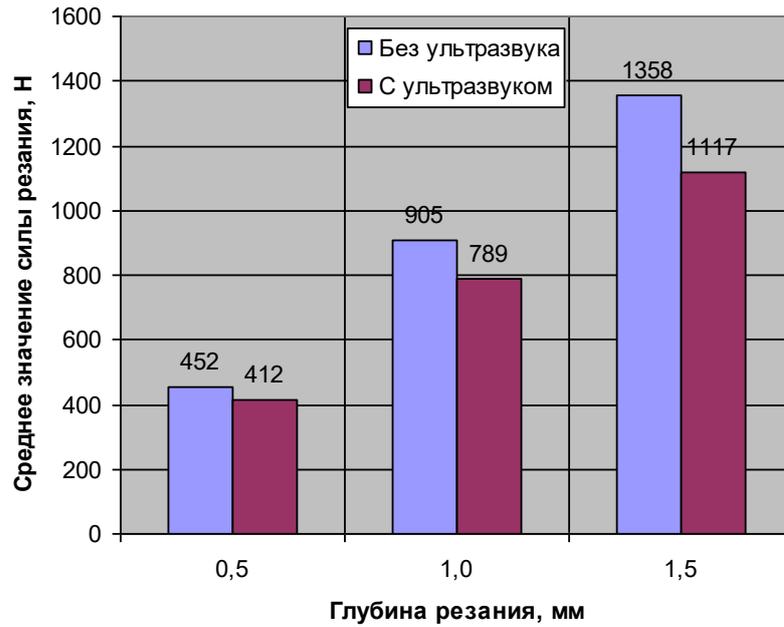


Рисунок 4.14. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 80 м/мин

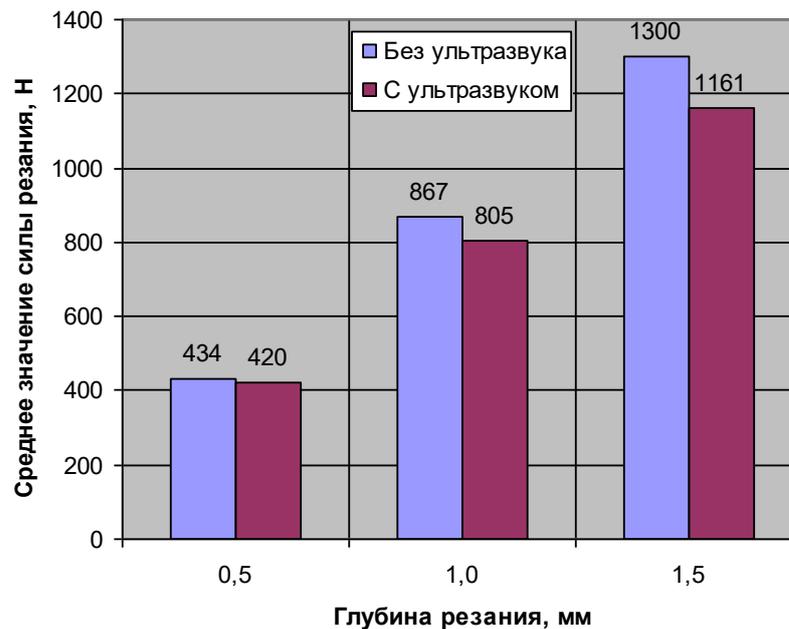


Рисунок 4.15. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 100 м/мин

На рисунках 4.16, 4.17, 4.18 представлены диаграммы зависимостей тангенциальной составляющей силы резания от изменения глубины резания для обыч-

ного и ультразвукового точения при скорости резания 60, 80 и 100 м/мин соответственно для стали X18H12T.

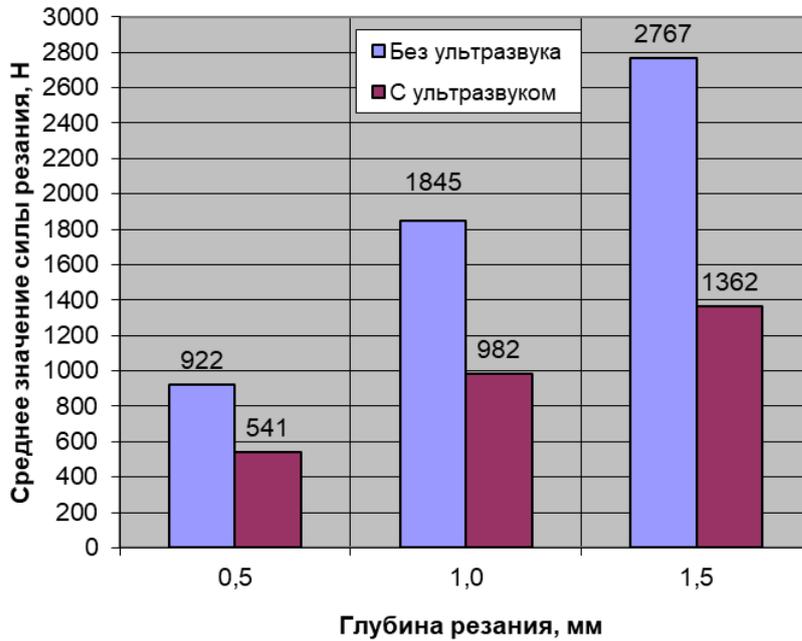


Рисунок 4.16. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 60 м/мин

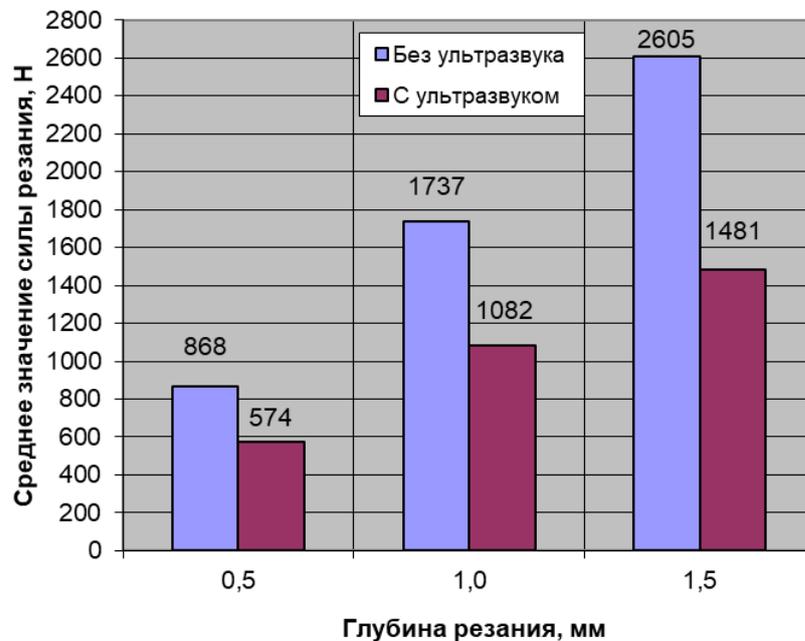


Рисунок 4.17. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 80 м/мин

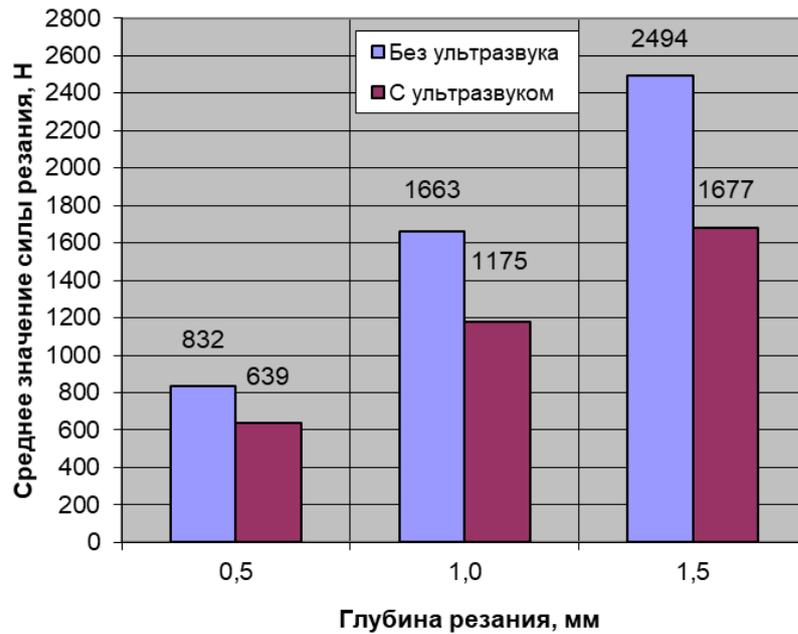


Рисунок 4.18. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 100 м/мин

На рисунках 4.19, 4.20, 4.21 представлены диаграммы зависимостей радиальной составляющей силы резания от изменения глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости резания 60, 80 и 100 м/мин соответственно для стали Х18Н12Т.

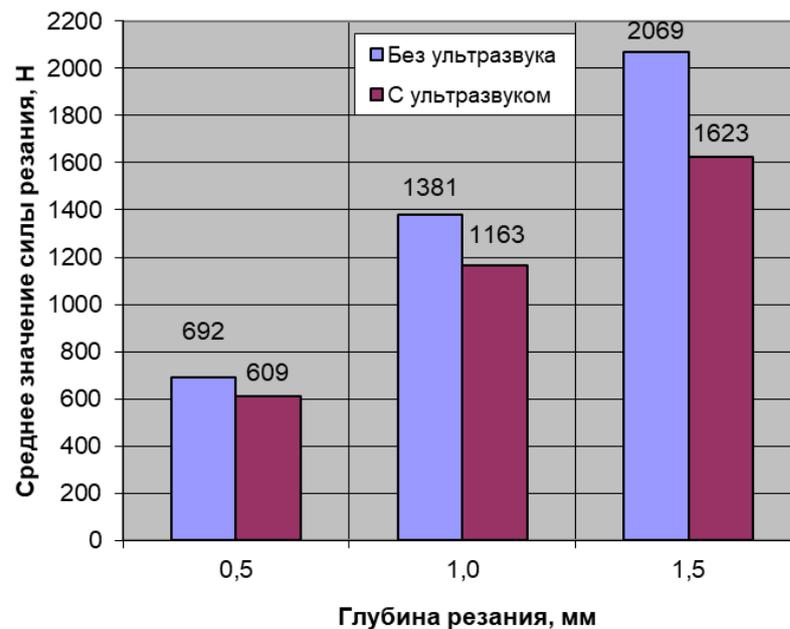


Рисунок 4.19. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 60 м/мин

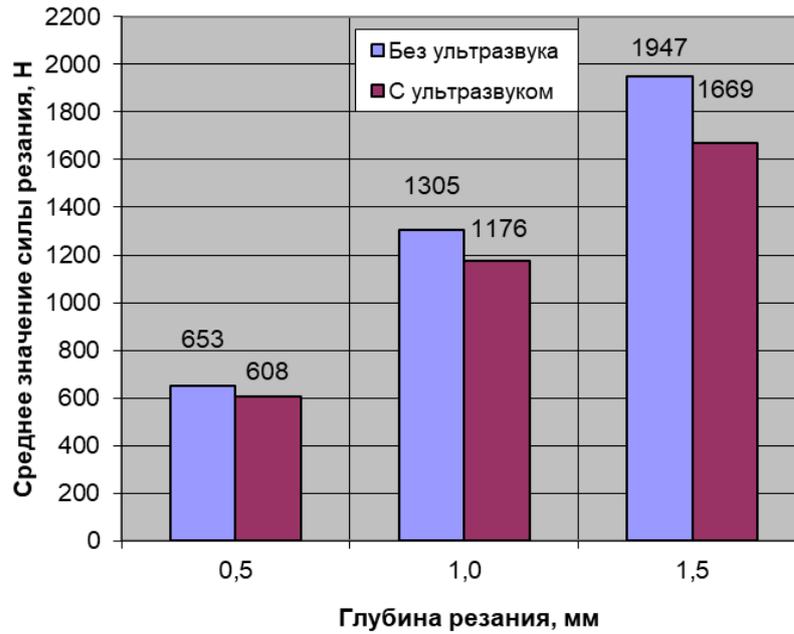


Рисунок 4.20. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 80 м/мин

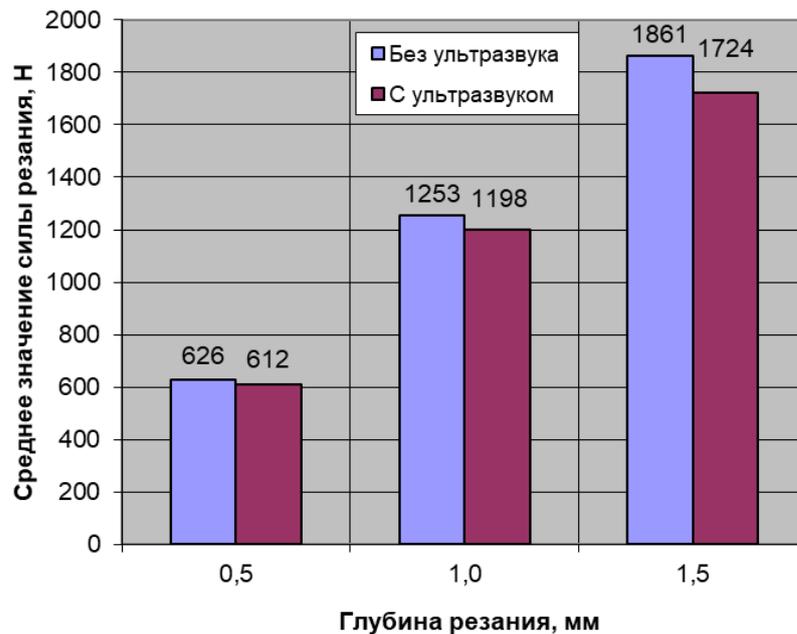


Рисунок 4.21. Диаграмма изменения среднего значения силы от глубины резания для обычного и ультразвукового точения при скорости 100 м/мин

По результатам экспериментальных исследований радиальную составляющую силы резания при комбинированной обработке ТЦИ определим по формуле:

$$P_y = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p \cdot K_o,$$

где K_o – коэффициент изменения среднего значения силы резания при ультразвуковом точении ТЦИ для конкретных условий обработки:

Глубина резания $t, мм$	Скорость резания $v, м/мин$		
	60	80	100
0,5	0,84 / 0,88*	0,91 / 0,93	0,97 / 0,98
1,0	0,8 / 0,84	0,87 / 0,9	0,93 / 0,96
1,5	0,75 / 0,78	0,82 / 0,86	0,89 / 0,93

* в числителе приведены значения коэффициента для обрабатываемого материала – сталь 45, в знаменателе – сталь X18H12T.

По результатам экспериментальных исследований тангенциальную составляющую силы резания при комбинированной обработке ТЦИ определим по формуле:

$$P_z = 10 \cdot C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^n \cdot K_p \cdot K_o,$$

где K_o – коэффициент изменения среднего значения силы резания при ультразвуковом точении ТЦИ для конкретных условий обработки:

Глубина резания $t, мм$	Скорость резания $v, м/мин$		
	60	80	100
0,5	0,56 / 0,59*	0,64 / 0,66	0,71 / 0,77
1,0	0,5 / 0,53	0,59 / 0,62	0,68 / 0,71
1,5	0,44 / 0,49	0,53 / 0,57	0,64 / 0,67

* в числителе приведены значения коэффициента для обрабатываемого материала – сталь 45, в знаменателе – сталь X18H12T.

4.4 Выводы

В данном разделе проведены экспериментальные исследования, связанные с особенностями технологии обработки тонкостенных цилиндрических изделий за счет наложения ультразвуковых колебаний.

По результатам проведенных экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. При точении без ультразвука с повышением скорости резания средняя составляющая силы резания уменьшается. Для резания с ультразвуком наблюдается обратная зависимость, а именно с повышением скорости резания среднее значение составляющей силы резания повышается.

2. При применении ультразвукового резания фактор скорости резания в большей степени влияет на снижение силы резания, чем глубина резания. Но влияние глубины резания также значимо особенно при обработке тонкостенных цилиндрических изделий, где оно может сыграть решающую роль.

3. При обработке стали 45 наименее эффективным оказалось ультразвуковое резание при скорости 100 м/мин, о чем говорит незначительное снижение силы резания от 3,23 до 10,69% при радиальном направлении колебаний и от 28,72 до 36,35% при тангенциальном направлении колебаний. Наиболее эффективным оказалось ультразвуковое резание при скорости 60 м/мин: процентное снижение силы резания составило от 15,59 до 25,24% при радиальном направлении колебаний и от 44,46 до 55,64% при тангенциальном.

4. При обработке стали X18H12T наименее эффективным оказалось ультразвуковое резание при скорости 100 м/мин, о чем говорит незначительное снижение силы резания от 2,24 до 7,36% при радиальном направлении колебаний и от 23,20 до 32,76% при тангенциальном направлении колебаний. Наиболее эффективным оказалось ультразвуковое резание при скорости 60 м/мин: процентное снижение силы резания составило от 12,00 до 21,56% при радиальном направлении колебаний и от 41,32 до 50,78% при тангенциальном направлении колебаний.

5. Исследования показали, что наиболее рациональными условиями обработки на примере тонкостенного цилиндрического изделия является глубина резания 1,5 мм и скорость резания 60 м/мин, что привело к снижению тангенциальной составляющей силы резания более чем на 55%, а радиальной – 25%.

РАЗДЕЛ 5

АНАЛИЗ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ РЕЗАНИЯ ПРИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ. РЕКОМЕНДАЦИИ РАБОТЫ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ В ПРОИЗВОДСТВО

5.1 Общие сведения

Параметром оптимизации режимов резания является производительность обработки – объем припуска, снимаемый с заготовки за единицу времени. Принимая во внимание тот факт, что глубина резания рассматривается в работе величиной, назначенной из технологических соображений, то оптимизация выполняется только по подаче s и частоте вращения шпинделя n .

В настоящее время одним из распространенных методов оптимизации является метод линейного программирования [56, 68, 88, 90, 109, 121, 122], который позволяет одновременно оптимизировать скорость резания (частоту вращения шпинделя) и подачу с учетом действующих при точении ограничений по параметру максимальной производительности.

Целевая функция оптимизации (ЦФО) может быть представлена в виде произведения, прямо пропорционального производительности обработки:

$$\text{ЦФО: } F = s \cdot v \rightarrow \max \text{ или } F = s \cdot n \rightarrow \max ,$$

где v – скорость резания, м/мин;

n – частота вращения, об/мин;

s – подача, мм/об.

Как видно из целевой функции оптимизации, чем больше подача и частота вращения шпинделя, тем выше производительность. Впрочем, это совсем не значит, что, настроив металлорежущий станок на наибольшую частоту вращения и

подачу суппорта, можно получить приемлемую (максимальную) производительность обработки.

5.2 Технологические особенности определения оптимальных режимов резания при ультразвуковой обработке

В настоящее время известно большое количество разнообразных методов оптимизации режимов резания на металлорежущих станках. Выбор метода зависит от вида применяемого оборудования, структуры технологической операции, способа обработки, сведений о его технологических возможностях и других параметров. Каждый метод основан на математической модели процесса обработки, которая состоит из целевой функции оптимизации и технических ограничений, отражающих задачи оптимизации и закономерности резания металлов. В дальнейшем рассматривается схема построения математической модели оптимизации режимов резания технологических переходов при одноинструментальной обработке тонкостенных цилиндрических деталей. Модель имеет следующие ограничения:

- режущие свойства инструмента, определяемые его материалом, геометрией, рациональным периодом стойкости и условиями обработки;
- мощность электродвигателя привода главного движения станка;
- жесткость заготовки;
- точность обработки;
- температура резания;
- шероховатость поверхности;
- кинематические ограничения.

Кинематические ограничения. Эти ограничения накладываются именно на подачу s и частоту вращения n , они не могут быть ниже установленных уровней s_{min} и n_{min} , а также они не могут превышать максимально допустимых значений для станка модели 1М61 s_{max} и n_{max} . Совокупность кинематических ограничений можно представить в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} s \geq 0; \\ n \geq 0; \\ s \leq s_{\max} \\ n \leq n_{\max} \end{array} \right. \quad \text{ИЛИ} \quad \left\{ \begin{array}{l} s_{\min} \leq s \leq s_{\max}; \\ n_{\min} \leq n \leq n_{\max}. \end{array} \right.$$

Максимальная частота вращения задается из таких соображений: скорость резания при ультразвуковом точении будет иметь значение, не превышающее:

$$V(yз) \leq 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{1000000} \right) \cdot f \cdot 60$$

$$V(yз) \leq 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{a}{1000000} \right) \cdot f \cdot 60 = 2 \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{15}{1000000} \right) \cdot 22000 \cdot 60 = 124,34 \quad \text{м/мин}$$

Таким образом, максимальная частота вращения будет равна $n_{\max.} = 355$ об/мин.

Ограничение по жесткости заготовки. Ограничение на подачу, допускаемую жесткостью заготовки, определяется по формуле [56]:

$$s \leq x_{Pz} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot J \cdot E \cdot f}{1,1 \cdot C_{Pz} \cdot l^3 \cdot t^{y_{Pz}}}},$$

где f – прогиб заготовки при обработке;

E – модуль упругости материала обрабатываемой заготовки;

J – момент инерции сечения тонкостенной цилиндрической заготовки;

l – расстояние между точками закрепления заготовки;

ε – коэффициент жесткости;

C_{Pz} – постоянный коэффициент для заданных условий обработки;

x_{Pz}, y_{Pz} – показатели степени, характеризующие влияние глубины резания и подачи на силу резания.

Ограничение по стойкости режущего инструмента. Режущие возможности инструмента представлены в полученном искомом ограничении:

$$n \cdot s^{y_v} \leq \frac{1000 \cdot C_v}{T^m \cdot t^{x_v} \cdot \pi \cdot D} \cdot K_v,$$

где T – период стойкости инструмента;

m – показатель относительной стойкости инструмента;

C_v, x_v, y_v – коэффициенты, характеризующие условия обработки;

K_v – общий поправочный коэффициент, который приводит табличные значения коэффициентов к реальным условиям обработки с учетом физико-механических свойств материала заготовки, состояния ее поверхности и материала режущей части инструмента.

Ограничение по мощности привода главного движения станка. Это ограничение устанавливает связь между эффективной мощностью резания и мощностью привода главного движения станка. Ограничение по мощности имеет вид:

$$n^{(n_{Pz}+1)} \cdot s^{y_{Pz}} \leq \frac{6120 \cdot N_{cm} \cdot \eta}{K_o \cdot C_{Pz} \cdot t^{x_{Pz}} \cdot K_{Pz}} \cdot \left(\frac{1000}{\pi \cdot D} \right)^{(n_{Pz}+1)},$$

где N_{cm} – мощность привода главного движения станка;

η – коэффициент полезного действия главного движения;

K_{Pz} – поправочный коэффициент, который представляет собой произведение ряда коэффициентов, учитывающих фактические условия резания;

n_{Pz} – показатель степени, характеризующий влияние скорости на силу резания;

K_o – коэффициент, учитывающий уменьшение сил во время комбинированной обработки.

Ограничение по точности обработки. Это ограничение определяют взаимосвязь расчетных значений подачи и скорости резания с точностью обработки, ко-

торая зависит от жесткости технологической системы станок-приспособление-инструмент-заготовка [72]:

$$n^{n_{Py}} \cdot S_o^{y_{Py}} \leq \frac{\psi \cdot T_D \cdot K_T}{C_{Py} \cdot t^x \cdot K_{Py}},$$

где T_D – допуск на изготовление детали по качеству точности, мм;

ψ – часть допуска, используемая для компенсации погрешностей обработки, $\psi = 0,2 \dots 0,25$;

K_T – эмпирический коэффициент, определяемый по формуле:

$$K_T = \frac{0,05 \cdot 318^{n_{Py}} \cdot E \cdot \mu \cdot d^4}{L^3 \cdot D^{n_{Py}}},$$

где μ – коэффициент, зависящий от способа установки заготовки;

d – диаметр детали после обработки, мм.

Ограничение по температуре резания. Это ограничение связано с тем, что при режимах резания возникает высокая температура, превышающая термостойкость заготовки или материала инструмента $Q_{дон}$.

При ультразвуковом точении ограничение по температуре резания представлено в виде:

$$n^{z_t} \cdot s^{y_t} \leq \frac{1000^{z_t} \cdot Q_{дон}}{C_t \cdot t^{x_t} \cdot (\pi \cdot D)^{z_t}}.$$

Ограничение по шероховатости обработанной поверхности. На шероховатость основное влияние оказывает геометрия режущей части инструмента и подача, так как именно они определяют форму следа инструмента, оставляемого на поверхности.

При наружном чистовом точении ограничения по шероховатости имеет вид:

$$Ra = 0,85 \cdot \frac{t^{0,31} \cdot s^{0,58} \cdot \varphi^{0,4} \cdot \varphi_1^{0,4}}{v^{0,06} \cdot r^{0,65} \cdot HB^{0,05}}$$

Определение оптимальных режимов резания приведено для комбинированной обработки (точение и ультразвуковая обработка) тонкостенного цилиндрического изделия диаметром $D = 100$ мм, длиной $L = 200$ мм, толщина стенки 6,0 мм, материал заготовки – сталь X18H12T. Обработка осуществлялась на токарно-винторезном станке модели 1М61.

В результате линеаризации целевой функции и вышеуказанных ограничений путем логарифмирования определена математическая модель процесса резания, выраженная системой линейных неравенств, графически представленных на рис. 5.1 ($X_1 = \ln n$; $X_2 = \ln s$):

$$\begin{cases} b_1 \leq x_1 \leq b_2; \\ b_3 \leq x_2 \leq b_4; \\ x_2 \leq b_5; \\ x_1 + 0,35 \cdot x_2 \leq b_6; \\ 0,85 \cdot x_1 + 0,75 \cdot x_2 \leq b_7; \\ -0,3 \cdot x_1 + 0,6 \cdot x_2 \leq b_8; \\ 0,22 \cdot x_1 + 0,3 \cdot x_2 \leq b_9; \\ -0,06 \cdot x_1 + 0,58 \cdot x_2 \leq b_{10}; \\ (x_1 + x_2) \rightarrow \max. \end{cases}$$

$$b_1 = \ln n_{\min}; b_2 = \ln n_{\max}; b_3 = \ln s_{\min}; b_4 = \ln s_{\max};$$

$$b_5 = \ln \cdot \left(x_{Pz} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot J \cdot E \cdot f}{1,1 \cdot C_{Pz} \cdot l^3 \cdot t^y Pz}} \right);$$

$$b_6 = \ln \cdot \left(\frac{1000 \cdot C_v}{T^m \cdot t^x \cdot \pi \cdot D} \cdot K_v \right);$$

$$b_7 = \ln \cdot \left(\frac{6120 \cdot N_{cm} \cdot \eta}{K_o \cdot C_{Pz} \cdot t^x \cdot K_{Pz}} \cdot \left(\frac{1000}{\pi \cdot D} \right)^{(n_{Pz} + 1)} \right);$$

$$b_8 = \ln \cdot \left(\frac{\psi \cdot T_D \cdot K_T}{C_{Py} \cdot t^x \cdot K_{Py}} \right);$$

$$b_9 = \ln \cdot \left(\frac{1000^{z_t} \cdot Q_{don}}{C_t \cdot t^x \cdot (\pi \cdot D)^{z_t}} \right);$$

$$b_{10} = \ln \cdot \left(\frac{Ra \cdot (\pi \cdot D)^{0.06} \cdot r^{0.65} \cdot HB^{0.05}}{0.85 \cdot 1000^{0.06} \cdot t^{0.31} \cdot \varphi^{0.4} \cdot \varphi_1^{0.4}} \right).$$

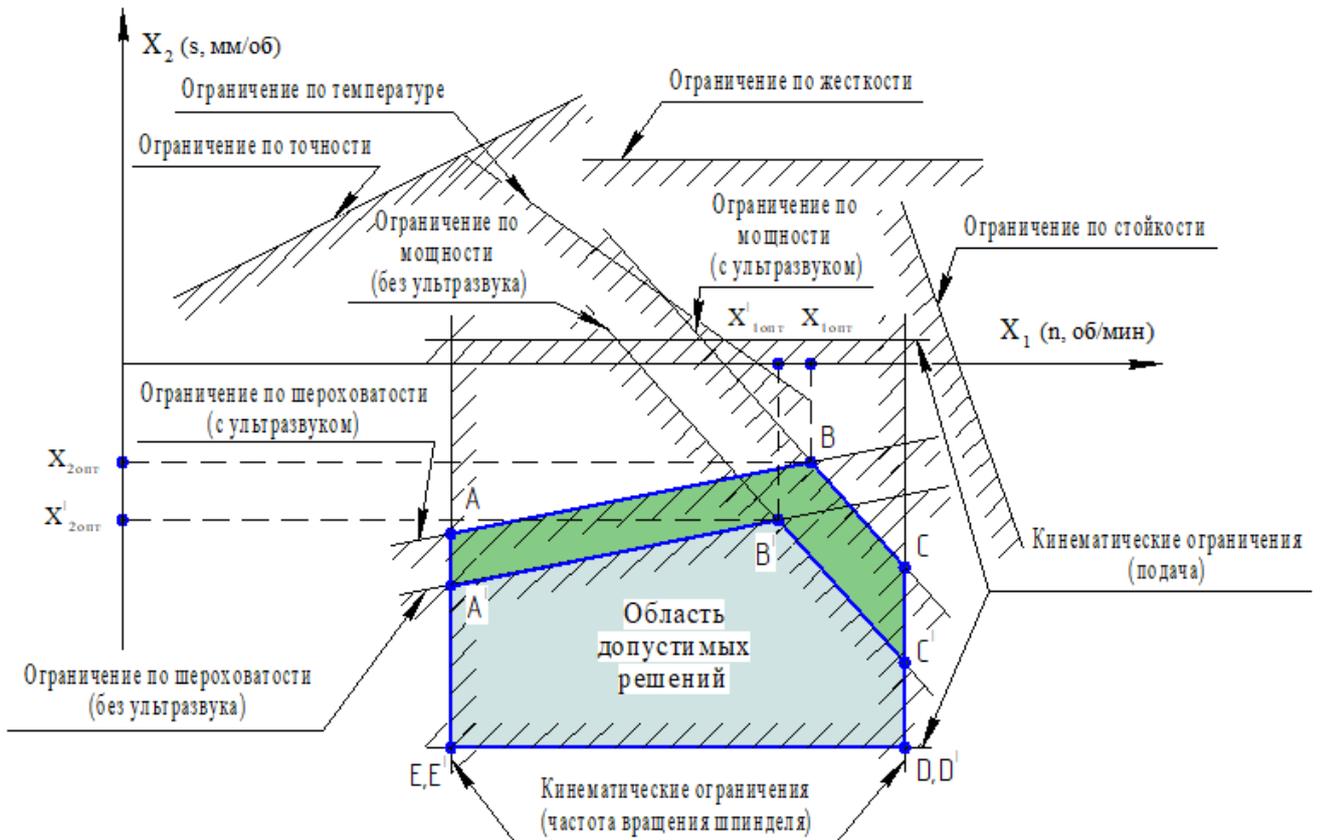


Рисунок 5.1. Графический метод нахождения области допустимых решений

Математическая модель системы линейных неравенств дает область допустимых решений.

Для графического представления области возможных решений, необходимо учитывать каждое из линейных неравенств. Кроме того, неравенство должно быть преобразовано и построены в плоскости x_1x_2 соответствующие прямые.

Оптимальное решение находится на пересечении ограничений области допустимых решений. Это значит, что координаты одной из вершин пятиугольника $A B C D E$ – области возможных решений, дадут максимум целевой функции $F(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = \max$.

Таким образом, чтобы найти оптимальное решение необходимо найти 5 координат точек A, B, C, D и E , и подставить их в уравнение для целевой функции. Та координата точки, которая даст максимальное значение целевой функции – и является оптимальным решением.

Значения целевой функции оптимизации $F(x_1, x_2) = x_1 + x_2$ для каждой из точек будут следующими (без ультразвука):

Точка	Координаты		Значение целевой функции $F(x_1, x_2) = x_1 + x_2$
	x_1	x_2	
A'	2,526	-1,73	0,796
B'	5,06	-1,22	3,84
C'	6,043	-2,33	3,713
D'	6,043	-2,996	3,047
E'	2,526	-2,996	0,47

Целевая функция имеет максимальное значение в точке B' ($x_1 = 5,06$; $x_2 = -1,22$).

Определим оптимальные значения частоты вращения шпинделя n , подачи s и скорости резания v :

$$n' = e^{x_1} = e^{5,06} = 157,59 \text{ об/мин};$$

$$s' = e^{x_2} = e^{-1,22} = 0,295 \text{ мм/об};$$

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 94 \cdot 160}{1000} = 47,23 \text{ м/мин.}$$

Значение целевой функции оптимизации при таких параметрах будет равняться:

$$F' = s' \cdot n' = 0,295 \cdot 157,59 = 46,49 \text{ мм/мин.}$$

Значения целевой функции оптимизации $F(x_1, x_2) = x_1 + x_2$ для каждой из точек будут следующими (с ультразвуком):

Точка	Координаты		Значение целевой функции $F(x_1, x_2) = x_1 + x_2$
	x_1	x_2	
A	2,526	-1,33	1,196
B	5,319	-0,77	4,549
C	6,043	-1,59	4,453
D	6,043	-2,996	3,047
E	2,526	-2,996	0,47

Целевая функция имеет максимальное значение в точке B ($x_1 = 5,319$; $x_2 = -0,77$).

Определим оптимальные значения частоты вращения шпинделя n , подачи s и скорости резания v :

$$n = e^{x_1} = e^{5,319} = 204,18 \text{ об/мин;}$$

$$s = e^{x_2} = e^{-0,77} = 0,46 \text{ мм/об;}$$

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} = \frac{\pi \cdot 94 \cdot 200}{1000} = 59,03 \text{ м/мин.}$$

Значение целевой функции оптимизации при таких параметрах будет равняться:

$$F = s \cdot n = 0,46 \cdot 204,18 = 93,92 \text{ мм/мин.}$$

Коэффициент производительности будет равен:

$$K_{\text{произ}} = \frac{s \cdot n}{s' \cdot n'} = \frac{0,46 \cdot 204,18}{0,295 \cdot 157,59} = \frac{93,92}{46,49} = 2,02$$

5.3 Основные рекомендации работы

Проведенные исследования дают основания дать следующие рекомендации.

Процесс ультразвукового резания тонкостенных цилиндрических изделий может быть выполнен только с использованием разработанного устройства.

При данных режимах резания никаких негативных эффектов, связанных с погрешностью формы тонкостенного цилиндрического изделия, не наблюдалось. Также при ультразвуковой обработке не наблюдалось высоких температур, что не повлекло за собой изменение структуры материала.

Можно отметить, что для обеспечения заданных параметров качества и производительности необходимо выполнять синтез рациональных вариантов структуры технологического процесса комбинированной обработки.

При использовании на базе токарного станка ультразвуковой установки сила резания уменьшилась более чем на 55%, что является не предельным значением. Некоторым ученым удавалось снизить силу резания до 90%, что является достаточно весомым аргументом для применения ультразвукового резания.

Для получения таких результатов недостаточно просто установить ультразвуковое оборудование на металлорежущий станок, а еще необходимо сделать некоторые изменения.

Рекомендации, которые позволяют снизить силу резания:

- необходимо свести к минимуму отклонения шпинделя в осевом и радиальном направлениях;
- необходимо использовать электродвигатели с небольшим биением вала, а также обеспечить необходимые условия, при которых вращающиеся элементы и передачи не могут служить источником низкочастотных колебаний;
- движение по направляющим станины в продольном направлении следует отрегулировать, чтобы мертвый ход был сведен к минимуму;
- отрегулировать положение режущего клина и добиться полного исключения мертвого хода в направлении глубины резания;

– станина должна быть выверена и установлена с расчетом обеспечения по возможности нулевых значений неплоскостности и непрямолинейности.

На токарных станках, предназначенных для ультразвукового резания, необходимость в этом отпадает.

Рекомендации по применению ультразвукового резания:

– при обработке тонкостенных цилиндрических изделий любых типоразмеров с применением дополнительных опорных поверхностей;

– при обработке тонкостенных цилиндрических колец, в которых, например, есть канавка, и под влиянием обычных способов резания деталь деформируется и не происходит снятие материала;

– при обработке детали с некоторым вылетом типа тонкостенная труба, обработка дает лишь упругие отжимы заготовки;

– при любой механической обработке, так как ультразвуковое резание положительно влияет на многие параметры обработки.

5.4 Внедрение результатов работы в производство

В представленной работе выполнены исследования по повышению производительности изготовления тонкостенных цилиндрических изделий на базе комбинированной технологии обработки путем синтеза рациональной структуры технологического процесса и разработки технологического обеспечения.

Для решения этих задач и внедрения результатов работы в производство в данной работе выполнено следующее:

- разработана структура технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий, обеспечивающая возможность выполнять синтез рациональной структуры на основе универсальной структуры технологического процесса, включающего ультразвуковое резание;
- разработана на базе токарного станка ультразвуковая установка для тангенциального и радиального направления колебаний;
- проведены экспериментальные исследования по определению влияния режимов резания на силовые параметры при обработке ТЦИ;
- выявлены зависимости изменения среднего значения силы резания для обычного и ультразвукового точения ТЦИ, результаты которых показали существенное снижение силы резания;
- установлена область допустимых решений, с помощью которой были определены оптимальные параметры режимов резания и коэффициент производительности ультразвукового точения по сравнению с обычным точением.

Можно отметить, что комбинированная обработка ТЦИ выполнена в соответствии с предлагаемой методикой. Технологический процесс обработки ТЦИ включал следующие основные виды операций:

- механическая обработка ТЦИ без ультразвука;
- механическая обработка ТЦИ с применением ультразвука;
- контрольные операции свойств изделия.

В ходе выполнения диссертационной работы разработана методика проектирования технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ. Данная методика внедрена в следующих организациях:

- ООО «Завод Прогресс 2000» (ЛНР);
- ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет».

Рассмотрим некоторые особенности внедрения этой методики.

На ООО «Завод Прогресс 2000» (ЛНР) ведутся работы по разработке рациональных технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ, а также по проектированию технологического обеспечения. Представленные рекомендации будут использоваться для проектирования технологических процессов и технологического обеспечения. Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 121500 рублей РФ (сто двадцать одна тысяча пятьсот рублей РФ).

Разработанная методика проектирования технологических процессов комбинированной обработки ТЦИ используется в учебном процессе при чтении курса лекций «Электрофизические и электрохимические методы обработки» на кафедре «Технология и организация машиностроительного производства» ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» (г. Алчевск).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, посвященной решению вопросов повышения производительности изготовления тонкостенных цилиндрических изделий на базе комбинированной технологии путем синтеза рациональной структуры технологического процесса и разработки технологического обеспечения. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем.

1. В данной работе выполнен анализ существующих методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий. В результате анализа рассмотрена область целесообразного применения комбинированной обработки.

2. В работе разработана структура технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий, базирующаяся на системном, морфологическом и функционально-ориентированном подходе, обеспечивающая возможность выполнять синтез рациональной структуры на основе универсальной структуры технологического процесса, включающего ультразвуковое резание. Предложена классификация тонкостенных цилиндрических изделий.

3. Для синтеза рациональной структуры технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий разработана укрупненная универсальная структура технологического процесса на базе модулей операций. Выполненные исследования позволили установить, что для формирования рациональной структуры необходима база данных технологических операций, которая может формироваться из модулей операций. Используя технологические модули операций и методы морфологического подхода, можно определять необходимую структуру рационального технологического процесса.

4. На базе токарного станка в работе разработана ультразвуковая установка для тангенциального и радиального направления колебаний резца.

5. Экспериментальными исследованиями установлено влияния режимов резания на силовые параметры при обработке ТЦИ.

6. Получены экспериментально зависимости изменения среднего значения силы резания для обычного и ультразвукового точения ТЦИ, в результате которых снижение тангенциальной составляющей силы резания составило более 50%, а радиальной – 22%.

7. Для определения оптимальных параметров режимов резания ($n = 200$ об/мин, $s = 0,46$ мм/об, скорость резания $V = 59,03$ м/мин) путем линейного математического программирования установлена область допустимых решений. Коэффициент производительности ультразвукового точения по сравнению с обычным точением равен 2,02.

8. Результаты работы внедрены в производство на ООО «Завод Прогресс 2000» (г. Алчевск, ЛНР) и в учебном процессе на кафедре технологии и организации машиностроительного производства ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» (дисциплина «Технология электрофизических и электрохимических методов обработки»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абразивная и алмазная обработка материалов: Справочник / А.Н. Резников [и др.]; под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1987. – 391 с.: ил.
2. Аверьянова, И.О. Технология машиностроения. Высокоэнергетические и комбинированные методы обработки: учеб. пособие / И.О. Аверьянова, В.В. Клепиков. – М.: ФОРУМ, 2008. – 304 с.: ил.
3. Агапов, С.И. Влияние ультразвуковых колебаний на геометрию режущего инструмента / С.И. Агапов, А.Ф. Толстяков, В.А. Маркин, Д.О. Титаренко // Высокие технологии в машиностроении. Материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции. – Самара: СГТУ. – 2017. – С. 6-8.
4. Андрианов, А.И. Прогрессивные методы технологии машиностроения / А.И. Андрианов. – М.: Машиностроение, 1975. – 240 с.: ил.
5. Астахов, С.А. Высокопроизводительное точение тонкостенных закаленных цилиндрических заготовок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08: защищена 21.05.2012 / Астахов Сергей Алексеевич; Тульский гос. ун-т. – Тула, 2012. – 16 с.
6. Асташев, В.К. Авторезонансная ультразвуковая технология резания / В.К. Асташев, Н.А. Андрианов, Л.В. Колик, В.Л. Крупенин // Вестник научно-технического развития. – 2010. – №1(29). – С. 3-10.
7. Асташев, В.К. Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1992. – № 3. – С. 81–86.
8. Асташев, В.К. К реализации авторезонансной ультразвуковой технологии / В.К. Асташев, Н.А. Андрианов, М.П. Козочкин, Л.В. Колик, В.Л. Крупенин, Н.В. Солис Пинарготе // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2009. – №06. – С. 52-59.
9. Асташев, В.К. Об авторезонансном ультразвуковом резании материалов / В.К. Асташев, Н.А. Андрианов, В.Л. Крупенин // Вестник научно-технического

развития. – М.: Национальная технологическая группа. – 2017. – Вып. 1(113). – С. 3-16.

10. Ахметшин, Н.И. Вибрационное резание металлов / Н.И. Ахметшин, Э.М. Гоц, Н.Ф. Родиков; под. ред. К.М. Рагульскиса. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1987. – 80 с.

11. Бабичев, А.П. Вибрационные технологии в машиностроении: опыт применения и перспективы развития / А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: «Инновационное машиностроение». – 2015. – Вып. 8(128). – С. 3-5.

12. Бабичев, А.П. Применение вибрационной технологии для повышения качества и эксплуатационных свойств деталей / А.П. Бабичев, Ю.П. Анкудимов, Ф.А. Пастухов, Н.В. Плеханов // Аспекты развития науки, образования и модернизации промышленности: материалы XII региональной научно-практической конференции учреждений высшего и среднего профессионального образования. – Ростов-на-Дону: ДГТУ. – 2014. – С. 47-49.

13. Бабичев, А.П. Основы вибрационной технологии. Изд. 2-е, перераб. и доп. / А.П. Бабичев, И.А. Бабичев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009. – 694 с.: ил.

14. Базров, Б.М. Модульная технология в машиностроении / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2001. – 368 с.: ил.

15. Базров, Б.М. Основы технологии машиностроения: Учебник для ВУЗов / Б.М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005. – 736 с.: ил.

16. Балакшин, Б.С. Основы технологии машиностроения / Б.С. Балакшин. – М.: Машиностроение, 1973. – 688 с.: ил.

17. Баласанян, Б.С. Развитие ультразвуковых машиностроительных технологий в национальном политехническом университете Армении / Б.С. Баласанян // Вестник Национального политехнического университета Армении. Механика, машиноведение, машиностроение. – Ереван: НПУА. – 2017. – №1. – С. 9-33.

18. Бекренев, Н.В. Аналитическое определение сил резания при ультразвуковой обработке высокопрочных материалов с учетом термического эффекта /

Н.В. Бекренев, Г.К. Мулдашева, А.П. Петровский, О.А. Цветкова // Вестник машиностроения. – М.: «Инновационное машиностроение». – 2015. – №7. – С. 81-82.

19. Беспалов, Б.Л. Технология машиностроения (специальная часть) / Б.Л. Беспалов, Л.А. Глейзер, И.М. Колесов. – М.: Машиностроение, 1973. – 448 с.: ил.

20. Бидерман, В.Л. Механика тонкостенных конструкций / В.Л. Бидерман. – М.: Машиностроение, 1987. – 488 с.

21. Бишутин, С.Г. Обеспечение требуемой совокупности параметров качества поверхностных слоев деталей при шлифовании: Монография / С.Г. Бишутин. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 144 с.: ил.

22. Бохонский, А.И. Некоторые особенности токарной обработки тонкостенных цилиндрических оболочек / А.И. Бохонский, Е.В. Пашков, Н.П. Рыжкова // Приборостроение. – К., 1984. – №36. – С. 11-16.

23. Бухаркин, Л.Н. Приспособления для обработки нежестких деталей типа тел вращения / Л.Н. Бухаркин, А.А. Шатилов. – М.: Машиностроение, 1970. – 41 с.

24. Вибрационное резание металлов / Н.И. Ахметшин, Э.М. Гоц, Н.Ф. Родинов. – Л.: Машиностроение, 1987. – 80 с.

25. Вибрационное точение конструкционных сталей / С.С. Данильчик [и др.]. – Минск: БНТУ, 2018. – 244 с.

26. Вожжов, А.А. Анализ особенностей расчета сил резания при точении с пилообразными колебаниями резца в радиальном направлении // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 139/2013. Серія: Машиноприладобудування та транспорт. – Севастополь, 2013. – С. 45-51.

27. Вожжов, А.А. Особенности расчета сил резания при вибрационном точении с учетом влияния параметров колебаний накладываемых в радиальном направлении / А.А. Вожжов // Вісник СевНТУ. – Севастополь: СевНТУ. – 2014. – №151. – С. 41-46.

28. Волков, Р.Е. Интенсификация механической обработки при производстве деталей автомобилей за счет использования энергии ультразвуковых колебаний / Р.Е. Волков, В.В. Головкин // Актуальные проблемы автотранспортного

комплекса. Межвузовский сборник научных статей (с международным участием). – Самара: СГТУ. – 2015. – С. 15-18.

29. Волосатов, В.А. Ультразвуковая обработка / В.А. Волосатов. – Л.: Лен-издат, 1983. – 248 с.: ил.

30. Гершгал, Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура / Д.А. Гершгал, В.М. Фридман. – М.: Энергия, 1976. – 320 с.

31. Григорюк, Э.И. Устойчивость оболочек / Э.И. Григорюк, В.В. Кабанов. – М.: Наука, 1978. – 359 с.

32. Дальский, А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин / А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 1975. – 223 с.: ил.

33. Денежный, П.М. Токарное дело / П.М. Денежный, Г.М. Стискин, И.Е. Тхор. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1976. – 240 с.: ил.

34. Денисова, Е.Ю. Технологическое обеспечение точности механической обработки тонкостенных деталей авиационных двигателей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08: защищена 31.05.2012 / Денисова Екатерина Юлоновна; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2012. – 21 с.

35. Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнические установки / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 208 с.

36. Дунин-Барковский, И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1975. – 230 с.: ил.

37. Егоров, М.Е. Технология машиностроения: Учебник / М.Е. Егоров, В.И. Дементьев, В.Л. Дмитриев. – М.: Высшая школа, 1976. – 534 с.: ил.

38. Елизаветин, М.А. Технологические способы повышения долговечности машин / М.А. Елизаветин, Э.А. Сатель. – М.: Машиностроение, 1969. – 400 с.: ил.

39. Жарков, И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом / И.Г. Жарков. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 184 с.

40. Инженерия поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2009. – 320 с.: ил.

41. Казанцев В.Ф. Расчет ультразвуковых преобразователей для технологических установок / В.Ф. Казанцев. – М.: Машиностроение, 1980. – 44 с.
42. Калиев, Р.Д. Результаты токарной обработки высокопрочных легированных сталей при наложении на воздействие режущего инструмента ультразвуковых колебаний / Р.Д. Калиев // Фундаментальные и прикладные разработки в области технических и физико-математических наук. Сборник научных статей по итогам работы третьего международного круглого стола. – М.: ООО «Конверт». – 2018. – С. 14-18.
43. Калмиков, М.О. Вібраційна обробка. Теорія й практика застосування: монографія / М.О. Калмиков; Нац. техн. ун-т України "Київ. політехн. ін-т". – К., 2010. – 426 с.
44. Киселев, Е.С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учеб. пособие / Е.С. Киселев. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – 186 с.: ил.
45. Козочкин, М.П. Исследование связи вибраций при резании с качеством получаемой поверхности / М.П. Козочкин, Н.В. Солис // Вестник РУДН, Сер. Инженерные исследования. – М.: №2. – 2009. – С. 16-23.
46. Козочкин, М.П. Исследование эффектов вибрационного течения с применением СОТС / М.П. Козочкин, Н.В. Солис Пинарготе // Вестник МГТУ СТАНКИН. – М.: МГТУ «СТАНКИН». – 2014. – Вып. 4(31). – С. 67-73.
47. Колесов, И.М. Основы технологии машиностроения: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / И.М. Колесов. – М.: Высш. шк., 2001. – 591 с.: ил.
48. Колоскова, А.В. Моделирование динамики токарной обработки тонкостенной цилиндрической оболочки / А.В. Колоскова, И.А. Киселев, С.А. Воронов // Механика и математическое моделирование в технике. II Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная юбилеям основателей кафедры "Прикладная механика" МГТУ им. Н.Э. Баумана профессором С.Д. Пономарева, В.Л. Бидермана, К.К. Лихарева, Н.Н. Малинина, В.А. Светлицкого. Сборник трудов. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2017. – С. 134-139.

49. Комбинированные методы обработки / В.П. Смоленцев [и др.]; под ред. В.П. Смоленцева. – Воронеж: ВГТУ, 1997. – 168 с.
50. Корягин, С.И. Способы обработки материалов: учеб. пособие / С.И. Корягин, И.В. Пименов, В.К. Худяков; Калининградский гос. ун-т. – Калининград: КГУ, 2000. – 448 с.: ил.
51. Кривоухов, В.А. Высокочастотные вибрации резца при точении / В.А. Кривоухов, А.А. Воронов. – М.: Оборонгиз, 1956. – 267 с.
52. Ластовский, П.Н. Обеспечение заданных требований точности при автоматизированной токарной обработке тонкостенных деталей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08: защищена 03.07.2010 / Ластовский Павел Николаевич; Омский гос. техн. ун-т. – Омск, 2010. – 25 с.
53. Лизин, В.Т. Проектирование тонкостенных конструкций / В.Т. Лизин, В.А. Пяткин. – М.: Машиностроение, 1985. – 344 с.
54. Лубенська, Л.М. Основи вібраційної технології: навч. посіб. / Л.М. Лубенська, М.О. Калмиков, С.М. Ясунік; Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. – Луганськ, 2009. – 284 с.
55. Любимов, В.В. Комбинированные методы алмазного шлифования: учеб. пособие / В.В. Любимов, В.А. Могильников, М.Я. Чмир. – 2-е изд., перераб. и доп. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2007. – 100 с.: ил.
56. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания [Текст] / А.Д. Макаров. М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
57. Мальцев, А.Ю. Повышение эффективности изготовления оболочек технологическими методами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08: защищена 17.12.2010 / Мальцев Анатолий Юрьевич; Орловский гос. техн. ун-т. – Орел, 2010. – 16 с.
58. Марков, А.И. Кинематика процесса резания при возбуждении ультразвуковых колебаний инструмента // Ультразвуковая техника. – 1964. – № 3. – С. 22-23.
59. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

60. Марков, А.И. Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
61. Маталин, А.А. Технология машиностроения / А.А. Маталин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985. – 496 с.: ил.
62. Маталин, А.А. Тонкое и алмазное растачивание / А.А. Маталин, П.А. Линчевский, К.В. Ломакин. – К.: Техника, 1973. – 80 с.: ил.
63. Михайлов, А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий машиностроения / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с.
64. Михайлов, А.Н. Снижение силы резания при обработке тонкостенных цилиндрических изделий с применением ультразвуковых колебаний инструмента / А.Н. Михайлов, А.Б. Таровик // Научно-технический и производственный журнал. – Брянск: БГТУ, 2014. – Вып. 8 (38). – С. 14-17.
65. Михайлов, А.Н. Снижение силы резания при точении тонкостенных цилиндрических изделий с применением ультразвуковых колебаний инструмента / А.Н. Михайлов, А.Б. Таровик // Сборник научных трудов ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ». – 2016. – Вып. 4 (47). – С. 143-148.
66. Мосталыгин, Г.П. Технология машиностроения / Г.П. Мосталыгин, Н.Н. Толмачевский. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.: ил.
67. Научно-технические технологии в машиностроении / А.Г. Суслов, Б.М. Базров, В.Ф. Безъязычный [и др.]; под ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2012. – 528 с.: ил.
68. Нгуен, Ван Кыонг. Методология оптимизации режимов резания / Нгуен Ван Кыонг, А.С. Ямников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2012. – №1. – С. 56-63.
69. Немилов, Е.Ф. Электроэрозионная обработка материалов / Е.Ф. Немилов. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1983. – 160 с.: ил.
70. Носко, П.Л. Застосування вібраційної обробки для підвищення якості виробів: монографія / П.Л. Носко, М.О. Калмиков, А.П. Ніколаєнко, Л.М. Лубенська; Східноукр. нац. ун-т ім. В.Даля. – Луганськ: Ноулідж, 2009. – 292 с.

71. Одинцов, Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник / Л.Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.: ил.

72. Определение оптимальных режимов обработки с использованием ЭВМ. Токарная обработка: Метод. указ. к лаб. работе / Самар. гос. техн. ун-т; Сост. В.А. Дмитриев. Самара, 2003. – 18 с.

72. Орлов, П.Н. Технологическое обеспечение качества деталей методами доводки / П.Н. Орлов. – М.: Машиностроение, 1988. – 384 с.: ил.

73. Папшев, Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев. – М.: Машиностроение, 1978. – 151 с.

74. Пат. 81948 U Україна, МПК В23F 19/00. Спосіб обробки бічних кромки зубів зубчастого колеса / Михайлов О. М., Лахін О. М., Таровик А. Б.; заявник і патентовласник ДВНЗ «ДонНТУ». – № 201302295; заявл. 25.02.13, Бюл. № 13. – 4 с.

75. Пашков, Е.В. Некоторые вопросы технологии обработки тонкостенных цилиндрических деталей точных приборов / Е.В. Пашков // Тр. 1-ой респ. науч.-техн. конф. «Прогрессивные технологические процессы в приборостроении». – К., 1971. – С. 12-15.

76. Пашков, Е.В. О повышении точности обработки тонкостенных цилиндрических деталей на металлорежущем оборудовании / Е.В. Пашков // Технология и автоматизация машиностроения. – К., 1974. – №14. – С. 23-25.

77. Пашков, Е.В. Технологические основы обработки точением тонкостенных цилиндрических деталей: учеб. пособие для студ. машиноприборостроит. спец. / Е.В. Пашков; Севастоп. гос. техн. ун-т. – Севастополь: СевГТУ, 2000. – 425 с.: ил.

78. Подпоркин, В.Г. Обработка нежестких деталей / В.Г. Подпоркин. – М.: Машгиз, 1959. – 208 с.: ил.

79. Подураев, В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1977. – 304 с.

80. Подураев, В.Н. Технология физико-химических методов обработки / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.: ил.

81. Попилов, Д.Я. Электрофизическая и электрохимическая обработка материалов: Справочник / Д.Я. Попилов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1982. – 400 с.: ил.

82. Попов, Л.М. Физико-химические методы обработки / Л.М. Попов. – 2-е изд., перераб. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. – 97 с.: ил.

83. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков [и др.] – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203с.: ил.

84. Приходько, В.М. Технологическое применение ультразвука в транспортном машиностроении. – М.: Издательство «Техполиграфцентр», 2007. – 112 с.

85. Приходько, В.М. Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте техники / В.М. Приходько. – М.: Изд-во «Техполиграфцентр», 2003. – 253 с.

86. Пузырь, Р.Г. Анализ напряженного состояния цилиндрической оболочки при наложении кольцевой нагрузки / Р.Г. Пузырь, О.В. Троцко // Вісник національного технічного університету «ХПІ». – Харків: ХПІ, 2011. – Вип. 58. – С. 8-12.

87. Румянцев, Е.М. Технология электрохимической обработки металлов / Е.М. Румянцев, А.Д. Давыдов. – М.: Высшая школа, 1984. – 159 с.

88. Рыжов, Э.В. Оптимизация технологических процессов механической обработки / Э.В. Рыжов, В.И. Аверченков. – К.: Наук. думка, 1989. – 192 с.: ил.

89. Рыжов, Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов. – К.: Наукова думка, 1984. – 272 с.: ил.

90. Свирщев, В.И. Оптимизация технологических процессов механической обработки: учеб. пособие / В.И. Свирщев. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 116 с.

91. Селиванов, А.С. Автоматизированное технологическое оснащение комбинированных ультразвуковых технологий механической обработки материалов /

А.С. Селиванов, В.И. Малышев, В.В. Валентиев, К.О. Семенов // SCIENTIFIC RESEARCHES AND THEIR PRACTICAL APPLICATION. MODERN STATE AND WAYS OF DEVELOPMENT. – Togliatti: TSU, 2012. – С. 297-310.

92. Скворцов, А.И. Основы механической обработки заготовок и инструментальные материалы / А.И. Скворцов. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2010. – 99 с.: ил.

93. Смелянский, В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием / В.М. Смелянский. – М.: Машиностроение, 2002. – 300 с.: ил.

94. Смоленцев, Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки / Е.В. Смоленцев. – М.: Машиностроение, 2005. – 511 с.: ил.

95. Солис Пинарготе, Н.В. Разработка направлений повышения качества токарной обработки с применением тангенциального вибрационного резания: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.07: защищена 31.05.2011 / Солис Пинарготе Нестор Вашингтон; Инженерный факультет Российского ун-та дружбы народов. – М., 2011. – 20 с.

96. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – М.: Машиностроение, 1981. – 184с.

97. Способ вибрационной обработки тел вращения: пат. 2245763 РФ, МПК В 23 В 1/00 / Д.А. Расторгуев, О.И. Драчев, Д.Е. Салабаев; заявитель Тольяттинский государственный университет. - №113841/02; заявл. 12.05.2003; опубл. 10.02.05 // Изобретения. Полезные модели / Федеральный институт промышленной собственности. – 2005. - №4. – С. 658.

98. Способ вибротангенциального точения: пат. 2355514 РФ, МПК В 23 В 1/00 / А.В. Лобусов; заявитель Кубанский государственный технологический университет. - №144800/02; заявл. 03.12.2007; опубл. 20.05.09 // Изобретения. Полезные модели / Федеральный институт промышленной собственности. – 2009. - №14. – С. 757.

99. Справочник по электрофизическим и электрохимическим методам обработки / Г.Л. Амитан [и др.]; под общ. ред. В.А. Волосатова. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1988. – 719 с.: ил.

100. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т.1 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 912 с.: ил.

101. Справочник технолога-машиностроителя: В 2-х т. Т.2 / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Сулова. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 944 с.: ил.

102. Сулов, А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин / А.Г. Сулов. – М.: Машиностроение, 2000. – 320 с.: ил.

103. Сулов, А.Г. Совершенствование и разработка конкурентоспособных технологий, обеспечивающих повышение качества изделий машиностроения / А.Г. Сулов // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – №2. – С. 24-29.

104. Тараненко, В.А. Моделирование технологических систем формообразования нежестких деталей: Обзор. информ. / ВНИИТЭМР. – М., 1988. – 70 с.

105. Таровик, А.Б. Зниження радіальної і тангенціальної сили різання при комбінованій обробці тонкостінних циліндричних виробів / А.Б. Таровик, О.М. Михайлов // Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві. – 2014. – Вип. 2(7). – С. 137-142.

106. Таровик, А.Б. Классификация и особенности эксплуатации изделий с тонкостенными цилиндрическими поверхностями / А.Б. Таровик, А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 17-22 сентября 2012 г. В 3-х томах. – Донецк: ДонНТУ, 2012. – Т.3. – С. 3-6.

107. Таровик, А.Б. Классификация комбинированных методов обработки тонкостенных цилиндрических изделий / А.Б. Таровик, А.Н. Михайлов // Инженер. Студентський науково-технічний журнал. – Донецьк: ДонНТУ. – 2012. – №13. – С. 62-66.

108. Таровик А.Б. Классификация тонкостенных цилиндрических изделий / А.Б. Таровик // Сборник тезисов докладов III Международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов

и оборудования промышленного производства». – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2018. – С. 52-54.

109. Таровик, А.Б. Оптимизация режимов резания при обработке тонкостенных цилиндрических изделий / А.Б. Таровик, А. Н. Михайлов // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ. – 2014. – Вып. 3 (49). – С.183-187.

110. Таровик, А.Б. Особенности токарной обработки с применением ультразвуковых колебаний инструмента / А.Б. Таровик, А.Н. Михайлов, А. Гитуни, Д. Исаев // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 16-21 сентября 2013 г. В 3-х томах. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Т.3. – С. 71-75.

111. Таровик, А.Б. Синтез структуры технологического процесса комбинированной обработки тонкостенных цилиндрических изделий / А.Б. Таровик, А.Ю. Сытник, С.С. Остапенко // Сборник тезисов докладов Юбилейной международной научно-технической конференции «60 лет ДонГТУ. Наука и практика» 11 октября 2017 г. – Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2017. – С. 211-212.

112. Таровик, А.Б. Снижение тангенциальной силы резания при обработке тонкостенных цилиндрических изделий с применением ультразвуковых колебаний инструмента / А.Б. Таровик // Прогресивні технології і системи машинобудування. – Донецьк: ДонНТУ. – 2014. – Вып. 2 (48). – С. 131-136.

113. Технологические основы обеспечения качества / К.С. Колесников [и др.]; под общ. ред. К.С. Колесникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.: ил.

114. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для вузов / С.И. Богодухов, Е.В. Бондаренко, А.Г. Схиртладзе [и др.] – М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.

115. Ультразвуковое резание / Л.Д. Розенберг, В.Ф. Казанцев, Л.О. Макаров [и др.]. – М.: Машиностроение, 1962. – 364 с.

116. Унянин, А.Н. Исследование влияния режима точения на силу и контактные температуры / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Инновационные технологии в металлообработке. Всероссийская научно-практическая заочная конференция с

международным участием: сборник научных трудов (посвящается 90-летию Заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, д.т.н., профессора Л.В. Худобина). – Ульяновск: УГТУ. – 2019. – С. 142-147.

117. Унянин, А.Н. Исследование температурного поля при точении с наложением вибраций / А.Н. Унянин, П.Р. Финагеев // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. – Тольятти: ТГУ. – 2018. – Вып. 3(45). – С. 63-69.

118. Физико-технологические основы методов обработки / А.П. Бабичев [и др.]; под ред. А.П. Бабичева. – Ростов н/Д: Феникс, 2006. – 409 с.: ил.

119. Хейфец, М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки / М.Л. Хейфец. – М.: Машиностроение, 2005. – 272 с.: ил.

120. Хейфец, М.Л. Пути повышения эффективности процессов формирования поверхностей с позиций синергетики / М.Л. Хейфец // Вестник машиностроения. – 1994. – №2. – С. 22-25.

121. Черепашков, А.А. Компьютерные технологии, моделирование и автоматизированные системы в машиностроении: учеб. для студ. высш. учеб. заведений / А.А. Черепашков, Н.В. Носов. – Волгоград: Издательский Дом «Ин-Фолио», 2009. – 640 с: ил.

122. Чикишев, Е.В. Математическая модель процесса резания с применением ультразвуковых колебаний и анализ устойчивости процесса / Е.В. Чикишев, Г.Д. Гаспарян // Современные наукоемкие технологии. – Пенза: «Академия Естествознания». – 2018. – №7. – С. 142-149.

123. Шевченко, О.В. Використання різцетримача з пружними елементами для ультразвукового точіння / О.В. Шевченко, М.Ю. Бальченко // Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. – Житомир: ЖГТУ. – 2015. – №2. – С. 111-116.

124. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов: учеб. пособие / Б.А. Артамонов и др.; под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высш. шк., 1983. – 247 с.: ил.

125. Ящерицын, П.И. Основы технологии механической обработки и сборки в машиностроении / П.И. Ящерицын. – Минск: Высшейш. шк., 1974. – 608 с.: ил.

126. Ящерицын, П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / П.И. Ящерицын, А.Г. Зайцев, А.И. Барботько. – Минск: Наука и техника, 1976. – 328 с.: ил.
127. Abramov, O.V. Ultrasound in Liquid and Solid Metal Is / O.V. Abramov. – CRC: Boca Raton, 1994. – 482 p.
128. Astashev, V.K. On the implementation of Ultrasonic Technology / V.K. Astashev, N.A. Andrianov, M.P. Kozochkin, L.V. Kolik, V.L. Krupenin, N.W. Solis // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. – 2009. – Vol.38, № 6. – P. 566-571.
129. Black, R. Design and manufacture / R. Black. – Portsmouth: University of Portsmouth, 2009. – 328 p.
130. Cordebois, J.-P. Fabrication par usinage / J.-P. Cordebois, M. Colombié. – Dunod, 2009. – 592 p.
131. DeGarmo, E.P. Materials and Processes in Manufacturing / E.P. DeGarmo, J.T. Black, R.A. Kohser. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2009. – 1259 p.
132. Dobrota, D. Technologia constructiei de masini / D. Dobrota, G. Girniceanu, G. Pecingina. – Editura MJM, Craiova, 2010. – 362 p.
133. Ekinovic, S. Obrada rezanjem / S. Ekinovic. – Zenica, 2009. – 478 p.
134. Gosselin, F. Stability of a Rotating Cylindrical Shell Containing Axial Viscous Flow: thesis submitted to McGill University in partial fulfillment of the requirements of the degree of Master of Engineering / Frederick Gosselin; Department of Mechanical Engineering McGill University Montreal. – Submitted in September 2009. – Montreal, 2009. – 152 p.
135. Groover, Mikell P. Fundamentals of modern manufacturing / Mikell P. Groover. – New York: John Wiley & Sons, Inc., 2010. – 1008 p.
136. Maurotto, A. Recent developments in ultrasonically assisted machining of advanced alloys / A. Maurotto, A. Roy, V.I. Babitsky, V.V. Silberschmidt // Proceedings of 4th CIRP International Conference on High Performance Cutting. – 2010. – P. 79-82.

137. Pruteanu, O.V. Tehnologia constructiei de masini. Partea 1. Iasi: Junimea, 2005. – 436 p.

138. Radovanovic, M. Tehnologija masinogradnje. – Nis: Masinski fakultet Univerziteta u Nisu, 2002. – 328 p.

139. Schey, John A. Introduction to manufacturing processes. International Edition, 2000. – 962 p.

140. Taranenko, W., Swic A. Technologia ksztaltowania czesci maszyn o malej sztywnosci. – Lublin: Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2005. – 282 p.

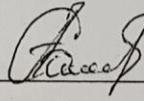
141. Xiao, M. The effect of tool nose radius in ultrasonic vibration cutting of hard metal Original Research Article / M. Xiao, K. Sato, S. Karube, T. Soutome // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2009. – Vol. 49, № 13. – P. 1375-1382.

**Приложение А. Документы, подтверждающие внедрение результатов
диссертационной работы**

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«ЗАВОД ПРОГРЕСС 2000»**
Луганская Народная Республика, 94200, г. Алчевск, ул. Горького,
99а

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Завод Прогресс
2000»


« » 201 т.



АКТ

внедрения результатов диссертационной работы

Таровика Артема Борисовича

на тему «Совершенствование технологического обеспечения комбинированной
обработки тонкостенных цилиндрических изделий машиностроения»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по
специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

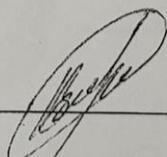
Разработанная методика повышения производительности изготовления тонкостенных цилиндрических изделий на базе комбинированной технологии, представленная в диссертационной работе Таровика Артема Борисовича, применяется на ООО «Завод Прогресс 2000» при разработке технологических процессов и проектировании технологического обеспечения.

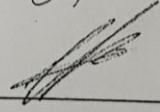
Ожидаемый экономический эффект от использования представленной методики составит 121500 рублей РФ (сто двадцать одну тысячу пятьсот рублей РФ).

Настоящий акт не является основанием для проведения взаимных экономических расчетов.

Главный инженер
ООО «Завод Прогресс 2000»
Хлебников А.С.

Начальник механического
цеха
ООО «Завод Прогресс 2000»
Монин И.Л.







Соответствует оригиналу
Ученый секретарь Д 01.014.02
Р.М. Грубка

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
 ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
 ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
 ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
 "ДОНБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ"
 (ГОУ ВПО ЛНР "ДонГТУ")

пр. Ленина, 16, г. Алчевск, 94204, тел.(06442) 2-60-43, факс (06442) 2-68-87, E-mail: info@dstu.education

От 16.10.2019 № 1499-011.6/31

На № _____ от _____

СПРАВКА

о внедрении результатов исследований диссертационной работы
 Таровика Артема Борисовича
 на тему «Совершенствование технологического обеспечения комбинированной
 обработки тонкостенных цилиндрических изделий машиностроения»,
 представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по
 специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Результатом исследований стала разработанная методика повышения
 производительности изготовления тонкостенных цилиндрических изделий на
 базе комбинированной технологии обработки путем синтеза рациональной
 структуры технологического процесса.

Отдельные положения диссертации используются в рамках преподавания
 предмета профессионального цикла при подготовке студентов направления
 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных
 производств» (дисциплина «Технология электрофизических и -химических
 методов обработки»).

Теоретические разработки диссертации Таровика А.Б. используются
 студентами при выполнении научно-исследовательских и выпускных
 квалификационных работ на кафедре технологии и организации
 машиностроительного производства факультета металлургического и
 машиностроительного производства ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ».

И.о. первого проректора по учебной работе,
 канд. техн. наук, доц. Бондарчук В.В.

Декан факультета ММП,
 канд. техн. наук, доц. Изюмов Ю.В.

Зав. каф. ТОМП,
 канд. экон. наук, доц. Зинченко А.М.

0097



[Handwritten signatures]



Соответствует оригиналу

Ученый секретарь Д 01.014.02

Р.М. Грубка