

Министерство образования и науки
Донецкой Народной Республики
ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

На правах рукописи

Петряева Ирина Алексеевна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОКАРНОЙ ОБРАБОТКИ
ФАСОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫМ
ИНСТРУМЕНТОМ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ С
ФУНКЦИОНАЛЬНО-ОРИЕНТИРОВАННЫМИ СВОЙСТВАМИ**

05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Донецк – 2016

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк

Научный

руководитель:

доктор технических наук, профессор

Михайлов Александр Николаевич

Официальные

оппоненты:

Ведущая

организация:

Защита состоится «___» _____ 2016 года в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 01.014.02 при ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: ауд. 6.202,а, пр. Дзержинского, 1, г. Донецк, 283001.

Тел./факс: +380 62 3050104,

E-mail: tm@donntu.org

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет» по адресу: корпус 2, ул. Артёма, 58, г. Донецк, 283001

<http://donntu.org>

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Учёный секретарь

диссертационного совета Д 01.014.02

Грубка Р.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Фасонные детали, поверхности которых сформированы криволинейной образующей, достаточно широко используются в различных машинах и механизмах. Механическая обработка таких поверхностей довольно затруднительна и обеспечивается сложной кинематикой движения режущего инструмента относительно обрабатываемой заготовки, а также характеризуется переменными значениями технологических факторов, определяющих условия обработки.

Процесс обработки фасонной поверхности существенно отличается от обработки цилиндрической поверхности, т. к. имеет ярко выраженный переменный характер. Это обусловлено изменением ряда геометрических параметров процесса резания: траектория формообразующего движения, непрерывно изменяющееся направление подачи, изменение величины глубины резания, и как следствие изменение мгновенных значений ширины и толщины среза, изменение кинематических углов в плане, кинематических переднего и заднего углов. В зависимости от этого наблюдается изменение сил и температур резания, шероховатости вдоль образующей фасонной поверхности, что в свою очередь влияет на выбор режимов резания – скорости, подачи.

В качестве представителей рассматриваемой группы деталей выбраны ролики прокатного оборудования, направляющие и задающие движение заготовок и проката. Детали эксплуатируются в довольно тяжелых условиях и требуют регулярной замены по причине износа рабочих поверхностей. В связи с этим, актуальной является задача повышения производительности и снижения себестоимости их обработки на токарных операциях, как основных при обработке резанием.

Важным фактором повышения эффективности обработки фасонных поверхностей является обоснование рациональных условий ее выполнения. В связи с этим весьма актуальны исследования по оптимизации режимов резания, обеспечивающих для заданных условий обработки и требований к качеству обработанных поверхностей максимальную производительность и минимальную себестоимость, что определяет повышение рентабельности машиностроительного производства.

На основе анализа токарной обработки обоснована необходимость учета силовых и температурных ограничений, а так же ограничений по шероховатости обработанной поверхности, которые в случае токарной обработки фасонных поверхностей являются переменными и требуют специальных подходов для их определения.

Перспективным вариантом решения проблемы повышения эффективности обработки фасонных деталей является использование современного твердосплавного инструмента с функционально-ориентированными покрытиями особой структуры, что позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные свойства за счет местного увеличения характеристик отдельных элементов, поверхностей и/или зон изделия в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации.

Степень разработанности темы.

Вопросам высокоэффективной обработки резанием посвящено большое количество научных трудов отечественных и зарубежных ученых (среди стоит

отметить работы Базрова Б.М., Безъязычного В.Ф., Братана С.М., Бутенко В.И., Гильмана А.М., Гусева В.В., Гордиенко Б.И., Дальского А.М., Ермакова Ю.М., Макарова А.Д., Маталина А.А., Михайлова А.Н., Рыжова Э.В., Старкова В.К., Хандожко В.А.).

Выполненные исследования позволили установить, что в настоящее время практически отсутствует информация по обоснованию выбора рациональных параметров процесса резания с учетом особенностей обработки фасонных поверхностей. В настоящее время достаточно хорошо разработаны методы оптимизации процессов резания по критериям максимальной производительности или минимальной себестоимости, однако эти методики определения оптимальных режимов резания не учитывают переменности параметров обработки фасонных поверхностей, что требует дальнейшего их развития. Перспективным направлением оптимизации режимов резания является решение многокритериальных задач, обеспечивающих одновременное улучшение параметров обработки по различным критериям. Основную трудность при определении режимов резания для инструментов с износостойкими покрытиями представляет обоснование технических ограничений, информация о которых практически отсутствует, что требует проведения специальных как теоретических, так и экспериментальных исследований.

В настоящее время рациональность применения инструмента с функционально-ориентированными покрытиями, способными обеспечить его высокие эксплуатационные характеристики на местном уровне, подтверждена многочисленными исследованиями. Потому перспективным является повышение эффективности обработки фасонных поверхностей твердосплавным инструментом с покрытиями в условиях переменности параметров процесса резания.

Цель и задачи исследования. Целью работы является повышение производительности и снижение себестоимости токарной обработки фасонных деталей при заданном уровне качества поверхности в условиях переменности параметров процесса резания на основе комплексного обеспечения оптимальных режимов обработки и применения твердосплавного инструмента с функционально-ориентированными свойствами.

Для достижения поставленной цели, решались следующие задачи:

1. Выполнить анализ особенностей и способов технологического обеспечения эффективности и качества обработки фасонных поверхностей деталей машин.

2. Разработать принципы и методику повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей в условиях переменности параметров процесса резания.

3. Установить закономерности формирования и связи шероховатости поверхности, силовых и температурных характеристик процесса резания с учетом изменяющихся геометрических параметров и параметров среза в процессе обработки. Разработать методику многокритериальной оптимизации режимов токарной обработки фасонных поверхностей с учетом переменности параметров процесса резания и технических ограничений.

4. Исследовать особенности применения функционально-ориентированного подхода для обеспечения функциональных свойств твердосплавного инструмента и обосновать выбор материала и структуры износостойких покрытий.

5. Экспериментально установить влияние изнашивания лезвия инструмента на формирование шероховатости обработанной поверхности, оценить повышение стойкости инструмента и снижение температуры резания при точении твердосплавными резцами с износостойкими покрытиями.

6. Разработать рекомендации по повышению эффективности токарной обработки фасонных поверхностей за счет выбора оптимальных режимов резания и применения инструментов с функционально-ориентированными покрытиями. Внедрить результаты работы в производство.

Объект и предмет исследования. *Объектом исследования* является процесс токарной обработки фасонных поверхностей твердосплавным инструментом с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами, а *предметом* – технологические показатели токарной обработки фасонных поверхностей деталей.

Научная новизна полученных результатов.

1. Впервые теоретически установлены и экспериментально подтверждены зависимости температур резания и параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки, отличающиеся учетом переменности параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей инструментами с износостойкими покрытиями.

2. Получила дальнейшее развитие методика выбора оптимальных режимов резания и оценки эффективности точения фасонных поверхностей инструментами с износостойкими покрытиями на базе многокритериальной оптимизации в условиях переменности технических ограничений по температуре резания и шероховатости обработанной поверхности.

3. Предложены и обоснованы на основе функционально-ориентированного подхода рациональные структура и вид покрытий для твердосплавного инструмента, обеспечивающего возможность обработки с учетом переменности параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей.

Теоретическая значимость работы.

1. Разработана методика многокритериальной оптимизации режимов резания в условиях переменности технических ограничений при токарной обработке фасонных поверхностей твердосплавным инструментом с покрытиями.

2. Получены математические зависимости, позволяющие определять технические ограничения по температуре резания и шероховатости поверхности в зависимости от режимов в отдельных точках криволинейной образующей для заданных условий токарной обработки фасонных поверхностей.

3. Разработана методика расчета температур в зоне резания (на основе метода конечных элементов), позволяющая оценить возможность снижения температур в зоне обработки за счет применения твердосплавных инструментов с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

Практическая значимость работы.

1. Обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в условиях токарной обработки фасонных поверхностей позволяют повысить производительность обработки резцами с покрытием карбидом титана TiC в 1,5 раза, нитридом титана TiN в 2,3 раза и снизить себестоимость обработки в 1,2 раза и в 1,7 раза соответственно.

2. Применение твердосплавного инструмента с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами на основе карбида титана TiC и нитрида титана TiN позволяет снизить температуру в функциональных зонах твердосплавной пластины до 25% за счет обоснованного сочетания режимов обработки и инструментальных материалов с точки зрения тепловых процессов, происходящих в зоне резания.

3. Экспериментально установленные закономерности изменения температуры резания, шероховатости обработанной поверхности и стойкости инструмента с износостойкими покрытиями могут быть использованы в качестве ограничений при решении задач оптимизации. При точении фасонных поверхностей применение твердосплавных инструментов с покрытиями позволяет повысить оптимальные режимы обработки: подачу до 10% для резцов с покрытиями из карбида титана TiC, из нитрида титана TiN до 23% и скорость до 20% и 43% соответственно, по сравнению с инструментами без покрытий.

4. Результаты работы внедрены в производство на предприятии ООО «Научно-производственное объединение «Донвентилятор» с ожидаемым экономическим эффектом в размере 17500 рос.руб, Луганском ЧП «Депла» - 14500 рос.руб, а также в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета.

Методы и методология исследования.

Для решения поставленных задач исследования и получения результатов, обладающих новизной, использован следующий комплекс методов и научных положений: положения теории резания и теплофизики процесса резания; основные положения и методы технологии машиностроения и теории оптимизации; методы и принципы функционально-ориентированных технологий машиностроения; метод конечных элементов; методы математического моделирования и статистики - для выбора оптимальных параметров процесса резания, а также для проверки значимости полученных математических моделей. Экспериментальные исследования базировались на методах планирования эксперимента; обработку результатов экспериментов проводили с помощью статистических методов.

Положения, выносимые на защиту.

- научное положение о том, что высокопроизводительная токарная обработка фасонных поверхностей обеспечивается за счет выбора оптимальных режимов с учетом переменности параметров процесса резания, что дает возможность получить более полную оценку повышения производительности обработки с использованием твердосплавного инструмента с покрытиями;

- научное положение о том, что обработка фасонных поверхностей в условиях переменности параметров процесса резания сопровождается существенным (до двух раз) повышением сил и температур резания в отдельных точках поверхности. Это обуславливает необходимость применения твердосплавного инструмента с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами;

- аналитические зависимости, описывающие характер изменения параметров обработки вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности;

- теоретические зависимости, определяющие ограничения по шероховатости поверхности и температуре резания, при многокритериальной оптимизации режимов обработки с учетом переменности параметров процесса резания;

- методика многокритериальной оптимизации, позволяющая давать обоснованные рекомендации по выбору оптимальных режимов резания в условиях применения инструментов с покрытием с учетом переменности параметров процесса токарной обработки фасонных поверхностей;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований по оценке снижения температуры резания, шероховатости обработанной поверхности и повышения стойкости инструмента за счет применения твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждается корректностью применения математического аппарата и научных теорий, адекватностью разработанных моделей, применением современного оборудования; допустимой сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, эффективностью внедрения результатов исследования на промышленных предприятиях.

Основные положения и результаты исследования, которые представлены в диссертации, были представлены и обсуждены: на международных научно-технических конференциях: «Машиностроение и техносфера XXI века» (г. Севастополь, Россия, 2013 г., 2015 г.), на Международной научно-технической конференции «IMANE 2014 Conference» (г. Кишинев, Молдова), на международном научно-техническом семинаре «Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы» (г. Таганрог, Россия, 2014 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном семинаре кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из титульного листа, оглавления, введения, пяти разделов, заключения, списка литературы, содержащего 205 литературных источников, приложений с компьютерными программами выполненных расчетов и актами внедрения результатов работы. Диссертация содержит 73 рисунка и 14 таблиц. Общий объем работы – 169 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе «Анализ способов повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей деталей» выполнен анализ особенностей процесса токарной обработки фасонных деталей, поверхности которых сформированы криволинейной образующей. На основании выполненных исследований поставлены цели и основные задачи диссертационной работы.

Анализ литературных источников показал, что в настоящее время основное внимание при обработке фасонных поверхностей уделяется вопросам управления процессом обработки с целью обеспечения точности. Информация по обоснованию выбора оптимальных режимов резания с учетом характера обработки фасонных поверхностей достаточно ограничена. Постоянные режимы обработки при точении поверхности со сложной криволинейной образующей не могут обеспечить высокую эффективность процесса по следующим причинам: изменение кинематических параметров инструмента; изменение параметров среза – ширины и толщины; изменение траектории движения инструмента и непрерывно изменяющееся направление подачи; переменность тепловых процессов в зоне

обработки. Поэтому, представляет интерес анализ влияния переменных параметров обработки на оптимальные режимы резания.

Существующие исследования и разработки позволили определить методы решения задачи повышения эффективности обработки этих поверхностей: использование систем управления процессом на станках с ЧПУ, однако для их рационального использования недостаточно априорной информации по обоснованию и назначению оптимальных режимов обработки, учитывающих весь комплекс переменных параметров процесса и их взаимосвязь; перспективно применение прогрессивного инструмента, с особыми функциональными свойствами, позволяющими обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики для работы в постоянно изменяющихся условиях обработки фасонной поверхности.

Во **втором** разделе «Общий подход и методика повышения эффективности обработки фасонных поверхностей деталей», разработан общий подход и методика комплексных исследований по повышению эффективности токарной обработки фасонных поверхностей.

Разработан алгоритм комплексных исследований, обеспечивающий решение актуальной научной задачи повышения эффективности обработки резцами, оснащенными твердосплавными пластинами с износостойкими покрытиями с использованием основных принципов функционально-ориентированного подхода (рис.1).



Рис. 1. Блок-схема работы

Разработанная блок-схема позволяет оценить взаимосвязи между переменными параметрами обработки криволинейной поверхности и их влияние на процессы в зоне резания.

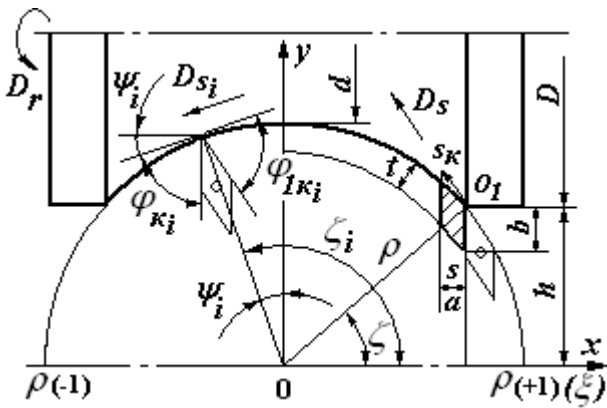


Рис. 2. Схема определения переменных параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей.

Установлены основные закономерности изменения параметров процесса резания при обработке фасонной поверхности. Схема (рис. 2) приведена для вогнутой поверхности с постоянным радиусом кривизны ρ . Положение вершины лезвия на криволинейной образующей фасонной поверхности определяется мгновенным углом поворота $\zeta_i = \arccos(\xi_i)$, где $\xi_i = x_i / \rho$ – безразмерная координата.

Результаты анализа переменности кинематических главных $\varphi_K(\zeta)$ и вспомогательных $\varphi_{KI}(\zeta)$ углов в плане в сравнении со статистическими φ_C и φ_{IC} ,

параметров среза – толщины $a(\zeta)$ и ширины $b(\zeta)$, скорости резания $V(\xi)$ в зависимости от безразмерной координаты ξ представлены в табл. 1. Максимальный возможный для обработки безразмерный размер $h/\rho = \cos(\varphi_{IC})$ (на графиках зона невозможной обработки заштрихована I – выпуклые поверхности, II – вогнутые).

Таблица 1. Результаты анализа переменности параметров процесса резания.

Переменные параметры процесса резания	Коэффициенты изменения параметров вдоль криволинейной образующей	Графики изменения параметров вдоль криволинейной образующей
Главный угол в плане $\varphi_K(\xi) = \varphi_C - \arcsin \xi$	$k_\varphi(\xi) = 1 - (\arcsin \xi) / \varphi_C$	
Вспомогательный угол в плане $\varphi_K(\xi) = \varphi_{IC} + \arcsin \xi$	$k_{\varphi I}(\xi) = 1 + (\arcsin \xi) / \varphi_{IC}$	
Толщина среза $a(\xi) = S \cdot \sin(\varphi_C - \arcsin \xi)$	$k_a(\xi) = (\sin(\varphi_C - \arcsin \xi)) / \sin \varphi_C$	
Ширина среза $b(\xi) = t / \sin(\varphi_C - \arcsin \xi)$	$k_b(\xi) = \sin \varphi_C / \sin(\varphi_C - \arcsin \xi)$	
Скорость резания $V(\xi) = V_d \delta^{-1} (\delta \pm \cos(\arcsin \xi))$ ($\delta = d/\rho$ – безразмерный диаметр)	$k_V(\xi) = 1 \pm \delta^{-1} \cos(\arcsin(\xi))$ ($(+)$ относится к выпуклой поверхности, $(-)$ – к вогнутой)	

В третьем разделе «Многокритериальная оптимизация режимов резания в условиях переменности действующих ограничений» разработана методика определения оптимальных режимов резания при точении фасонных поверхностей.

При решении задач многокритериальной оптимизации в качестве основных критериев оптимизации принимаются переменные части производительности P , себестоимости C и мультипликативная свертка этих критериев, определяемая их отношением $C_M = C/P$, зависящие от режимов резания.

Целевые функции, выражающая зависимость критериев оптимизации от скорости резания V и подачи S , представляются в виде:

$$\begin{aligned} P(V, S) &= VS \rightarrow \max ; \\ C(V, S) &= V^{-1}S^{-1} + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V^{k_V} S^{k_S} ; \\ C_M(V, S) &= V^{-2}S^{-2} + MK_{\Theta}^{-1/mn_t} V^{k_V-1} S^{k_S-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $M = (t_c + A_u/A)t^{x_v/m} / C_V^{1/m} K_V^{1/m}$; $k_V = 1/m - 1$; $k_S = y_v/m - 1$ – постоянные коэффициенты; A – стоимость станка - минуты, A_u – стоимость одного периода стойкости инструмента; t_c – время смены инструмента; t – глубина резания; C_V, K_V – коэффициенты и x_v, y_v, m – показатели, характеризующие степень влияния глубины, подачи и стойкости на скорость резания; $K_{\Theta} = \Theta / \Theta_p$ – коэффициент необходимого снижения температуры резания Θ_p при превышении ею допустимого уровня Θ .

При чистовой токарной обработке фасонных поверхностей инструментами с покрытиями наиболее существенными являются следующие ограничения: по температуре резания Θ и шероховатости обработанной поверхности R_a , которые вследствие переменности параметров процесса резания также являются переменными.

Для расчета технических ограничений установлена следующая аналитическая зависимость температуры резания $\Theta(\xi)$ от переменных параметров обработки:

$$\Theta(\xi) = \frac{q_1(\xi)l(\xi)(M_1(\xi)l(\xi) + N_1(\xi)h) + q_2(\xi)h(M_2(\xi)h + N_1(\xi)l(\xi))}{\lambda_{\xi}(l(\xi) + h)}, \quad (2)$$

где $l(\xi) = 2S \cdot \sin \xi [k(\xi)(1 - \operatorname{tg} \gamma) + \sec \gamma]$ – длина контакта передней поверхности лезвия со стружкой; h – износ по задней поверхности лезвия инструмента; $M_{1,2}(\xi) = (4,88 + 2,64\eta_{1,2}(\xi)^{0,5} \lg \eta_{1,2}(\xi)) \beta^{0,85}$, $N_{1,2}(\xi) = (0,04 + 0,02\eta_{1,2}(\xi)^{0,6} \lg \eta_{1,2}(\xi)) B_{1,2}(h/l(\xi))$ – безразмерные функции, определяющие нагрев площадок на передней и задней поверхностях лезвия инструмента; η – безразмерный параметр: $\eta_1(\xi) = b/l(\xi)$, $\eta_2 = b/h$; β – угол заострения; $B(h/l(\xi))$, $B(l(\xi)/h)$ – специальные функции; $q_1(\xi)$, $q_2(\xi)$ – плотности тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия инструмента:

$$\begin{aligned} q_1(\xi) &= \frac{K_1(\xi)K_3(\xi)\lambda_u - K_2(\xi)N_2(\xi)h + K_1(\xi)M_2(\xi)h}{K_3(\xi)K_4(\xi)\lambda_u + M_2(\xi)K_4(\xi)h - N_1(\xi)N_2(\xi)l(\xi)h/\lambda_u}; \\ q_2(\xi) &= \frac{(K_1(\xi) - K_4(\xi)q_1(\xi))\lambda_u}{N_2(\xi)h}. \end{aligned} \quad (3)$$

где $K_1(\xi) = \frac{(1+c)\omega_{\dot{a}}kb'q_{\dot{a}}(\xi)}{\lambda_{\dot{a}}V(\xi)} + \frac{K_{c1}q_{1T}(\xi)}{\lambda_{\dot{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\dot{a}}kl(\xi)}{V(\xi)}}$; $K_3(\xi) = \frac{1,82K_{c2}}{\lambda_{\dot{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\dot{a}}h}{V(\xi)}}$;

$$K_2 = \frac{(1+c)\omega_{\dot{a}}kb'q_{\dot{a}}T_{\dot{a}}}{\lambda_{\dot{a}}V(\xi)} + \frac{K_{c2}q_{2T}}{\lambda_{\dot{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\dot{a}}h}{V(\xi)}}; \quad K_4(\xi) = \frac{1,3K_{c1}}{\lambda_{\dot{a}}} \sqrt{\frac{\omega_{\dot{a}}kl(\xi)}{V(\xi)}} + \frac{M_1(\xi)l(\xi)}{\lambda_u};$$

$\lambda_{\dot{a}}$, λ_u , $\omega_{\dot{a}}$, ω_u – коэффициенты теплопроводности и температуропроводности материалов детали и инструмента; k – коэффициент усадки стружки; c – коэффициент, учитывающий подогрев слоев детали за один оборот; $T_{\dot{a}}$ – безразмерная функция распределения температур в детали, вызванных теплотой деформации; b' –

коэффициент относительного количества теплоты, уходящего в стружку, K_{c1} , K_{c2} – коэффициенты, учитывающие законы распределения плотности тепловых потоков на передней и задней поверхностях лезвия соответственно. $q_{1T}(\xi)$, $q_{2T}(\xi)$, $q_{\theta}(\xi)$ – плотности тепловых потоков в зоне трения на передней и задней поверхностях, а так же в зоне деформации.

Для расчета ограничения по шероховатости установлена следующая зависимость среднего арифметического отклонения профиля от переменных параметров обработки:

$$R_a(\xi) = 200 \left(r / \cos \gamma - \left(\sqrt{4r^2 - S(\xi)^2} \right) / 2 \cos \gamma + b_c (2S(\xi) + b_c) / 32r + R_u \right), \quad (4)$$

где r – радиус при вершине лезвия инструмента; γ – передний угол; R_u – высота неровностей профиля на вершине резца; $b_c = 0,5\rho_u(1-2\tau_0/\sigma_T)$ – величина пластического оттеснения; ρ_u – радиус округления режущей кромки инструмента; σ_T , τ_0 – предел текучести и прочность на сдвиг обрабатываемого материала.

Результаты анализа переменности ограничений представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты анализа переменности технических ограничений.

Переменные технические ограничения (K_R , K_{θ} - коэффициенты, учитывающие влияние покрытий на шероховатость поверхности R_a и температуру резания Θ)		Коэффициенты и графики изменения параметров вдоль криволинейной образующей $k_R(\xi)$, $k_{\theta}(\xi)$
По температуре резания Θ $\tilde{N}_{\Theta} K_{\Theta} k_{\Theta}(\xi) V^{n_t} S^{y_t} t^{x_t} \leq \Theta$	C_R , C_{θ} - коэффициенты и n_r , y_r , x_r , n_b , y_b , x_b - показатели степени, характеризующие влияние скорости резания, подачи и глубины на шероховатость поверхности и температуру резания соответственно	$k_{\theta}(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{y_t/n_t}$
По шероховатости обработанной поверхности R_a $C_R K_R k_R(\xi) V^{n_r} S^{y_r} t^{x_r} \leq R_a$		$k_R(\xi) = \sin(\arccos(\xi))^{-y_r}$

Численные значения указанных в табл. 2 коэффициентов и показателей степеней в формулах технических ограничений по температуре резания Θ шероховатости обработанной поверхности R_a устанавливаются экспериментально, либо расчетным путем. На основании теоретических расчетов температуры резания $\Theta(\xi)$ (2) и шероховатости обработанной поверхности $R_a(\xi)$ (4) при различных сочетаниях скоростей резания, подач и глубин резания с использованием множественного регрессионного анализа могут устанавливаться значения указанных в табл. 2 коэффициентов и показателей степеней для любых условий обработки.

При чистовом точении сталей установлены следующие степенные зависимости температуры резания $\Theta(\xi)$ и шероховатости обработанной поверхности $R_a(\xi)$ от параметров обработки с учетом изменений вдоль безразмерной координаты ξ :

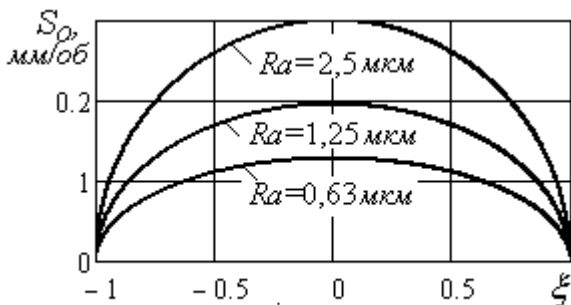
$$\Theta(\xi) = C_{\Theta} k_{\Theta}(\xi) V^{0,55} S^{0,4} t^{0,2}; R_{aP}(\xi) = 1,4 k_R(\xi) S^{1,75} r^{-0,42}, \quad (5)$$

где коэффициент $C_{\Theta} = 54$ для стали 45, $C_{\Theta} = 90$ для стали 95X18.

Аналитический расчет режимов резания (при установленных технических ограничениях) по критерию максимальной производительности осуществлялся с использованием метода линейного программирования, по критериям минимальной себестоимости и свертке критериев – методом геометрического программирования. Результаты расчетов представлены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты расчетов оптимальных режимов резания.

Оптимальные режимы резания	Аналитические зависимости оптимальных режимов резания от условий обработки
Оптимальная подача	$S_o(\xi) = (R_a / C_R K_R k_R(\xi))^{1/y_r}$
Оптимальная скорость резания (при наличии температурных ограничений)	$V_{ot}(\xi) = (\Theta / C_{\Theta} K_{\Theta} k_{\Theta}(\xi) t^{x_t} S_o^{y_t}(\xi))^{1/n_t}$
Оптимальная скорость резания по критерию производительности	$V_{oP}(\xi) = C_V K_V K_T / T^m t^{x_v} S_o^{y_v}(\xi)$
Оптимальная скорость резания по критерию себестоимости	$V_{oC}(\xi) = \left(\frac{m}{(1-m)(t_c + A_u/A)} \right)^m \frac{C_V K_V K_T}{t^{x_v} S_o^{y_v}(\xi)}$
Оптимальная скорость резания по свертке критериев себестоимости и производительности	$V_{oM}(\xi) = \left(\frac{2m}{(1-2m)(t_c + A_u/A)} \right)^m \frac{C_V K_V K_T}{t^{x_v} S_o^{y_v}(\xi)}$



Результаты расчетов оптимальных режимов резания и температур (чистовая обработка стали 45 и стали 95X18 резцами T15K6; глубина резания $t=1$ мм; шероховатость обработанной поверхности $R_a=2,5$ мкм) представлены на рис. 3 и рис. 4.

Для стали 45 оптимальные режимы

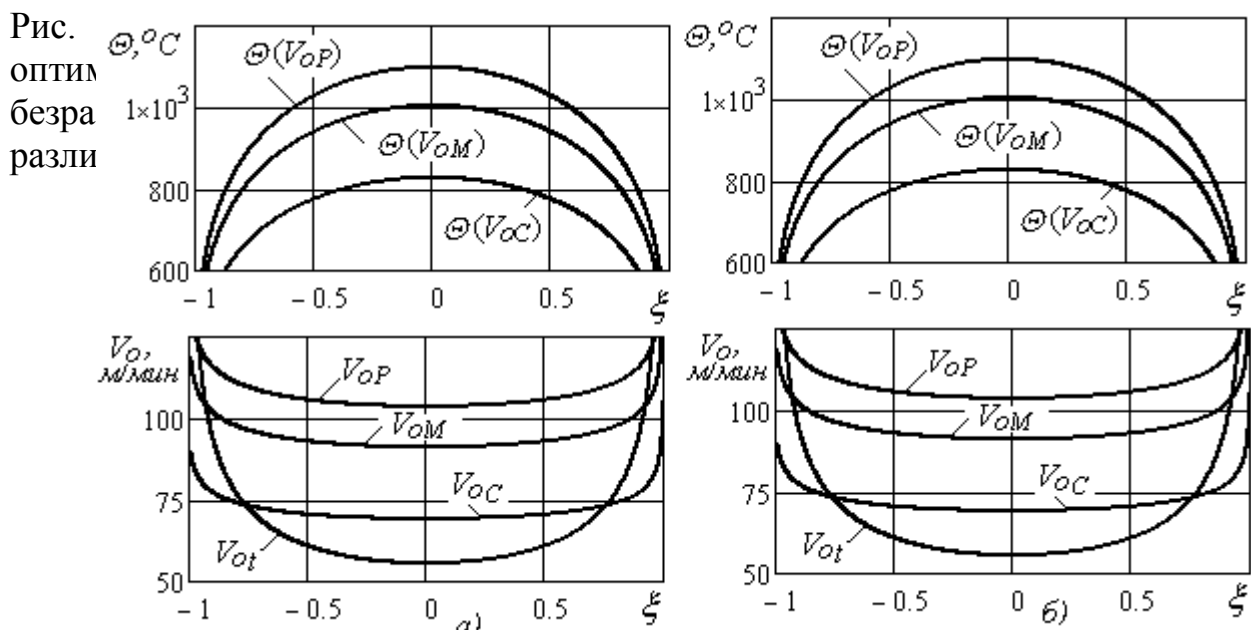


Рис. 4. Графики изменения температур резания и оптимальных по различным критериям скоростей резания вдоль безразмерной координаты ξ при обработке стали 45 – а) и стали 95X18 – б)

резания определяются без учета температурных ограничений (во всем диапазоне изменения температура резания не превышает допустимого уровня 800°C): $S_o=0,3\text{мм/об}$; $V_{oP}=293\text{м/мин}$; $V_{oC}=212\text{м/мин}$, $V_{oM}=258\text{м/мин}$.

Для стали 95X18 в отдельных точках фасонной поверхности температура резания превышает допустимый уровень: с учетом температурных ограничений $V_{oI}=58\text{м/мин}$. Учет температурных ограничений значительно снижает оптимальные скорости резания. Снятие температурных ограничений позволит существенно их повысить: $V_{oP}=100\text{м/мин}$; $V_{oC}=67\text{м/мин}$, $V_{oM}=88\text{м/мин}$.

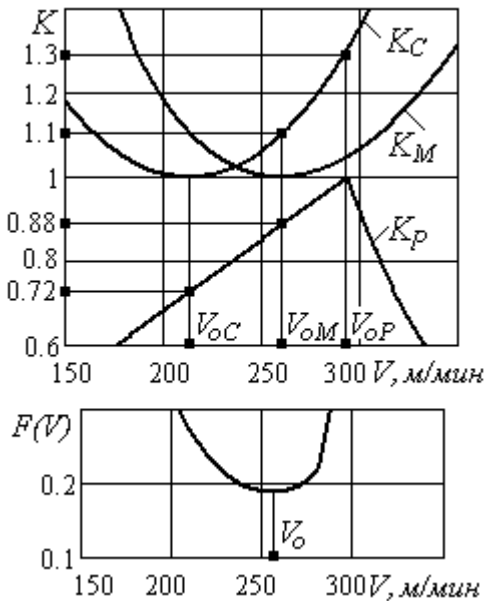


Рис. 5. Зависимость относительных целевых функций производительности, себестоимости и их свертки

Сравнение различных критериев оптимизации выполнено на основе относительных целевых функций $K_P = P(V,S)/P(V_o,S_o)$; $K_C = C(V,S)/C(V_o,S_o)$; $K_M = C_M(V,S)/C_M(V_o,S_o)$, представленных на рис. 5.

Графики свидетельствуют о наличии экстремумов: максимума у функции производительности K_P и минимума у функций себестоимости K_C и их мультипликативной свертки K_M . Обеспечивая за счет выбора оптимальной по себестоимости скорости резания V_{oC} минимум себестоимости, получаем снижение производительности в 1,4 раза ($K_P(V_{oC}) = 0,72$). Выбирая скорость резания V_{oP} , оптимальную по производительности, обеспечиваем максимум производительности, но получаем повышение себестоимости в 1,3 раза ($K_C(V_{oP}) = 1,3$). Минимальные потери каждой из целевых функций - производительности ($K_P(V_{oM}) = 0,88$) и себестоимости ($K_C(V_{oM}) = 1,1$) достигаются при выборе оптимальной по свертке критериев себестоимости и производительности скорости

резания V_{oM} . (Функция потерь $F(V) = (K_C - K_P) / K_P$ в этой точке минимальна)

В четвертом разделе «Обеспечение требуемых эксплуатационных параметров твердосплавной пластины за счет применения износостойких покрытий с функционально-ориентированными свойствами» выполнен анализ обеспечения свойств твердосплавного инструмента с учетом особенностей его работы при точении фасонных поверхностей, при этом заданные, требуемые или предельные свойства которого реализуются на местном уровне. Применение твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами позволяет максимально повысить их общие эксплуатационные параметры за счет местного увеличения технических возможностей и свойств отдельных элементов, поверхностей и/или зон изделия в зависимости от функциональных местных особенностей их эксплуатации. Здесь на начальном этапе предусмотрено деление инструмента на функциональные элементы по следующим уровням: уровень изделия, уровень частей, уровень составляющих, уровень зон.

После деления инструмента на функциональные элементы выполняется определение характера воздействия на каждый из них. Далее на основании основных принципов функционально-ориентированного подхода (структурного,

функционального, топологического, количественного, адекватного структурно-функционального) определяется вид, вид, физико-механические характеристики и структура покрытия режущей части инструмента с целью обеспечения необходимых свойств в функциональных элементах изделия.

Аналитически определены температурные поля лезвия инструмента и значения температуры резания. Расчеты выполнены для следующих условий обработки: обрабатываемый материал – сталь 45, инструментальный материал – твердый сплав T15K6; износостойкие покрытия - карбид титана TiC, нитрид титана TiN. Геометрические параметры инструмента: главный угол в плане $\varphi = 93^\circ$, вспомогательный $\varphi_1 = 8^\circ$, задний $\alpha = 5^\circ$, передний $\gamma = 15^\circ$. Режимы резания: глубина резания $t = 1$ мм, подача $s = 0.2$ мм/об, скорость резания $V = 3$ м/с. Расчет величин плотности тепловых потоков осуществлен с помощью математического пакета Mathcad Professional. Так, для инструмента без покрытия плотность равномерно распределенного теплового потока составила: по передней поверхности - $q_1 = 2,421 \times 10^8$ Вт / м², на задней поверхности - $q_2 = -6,481 \times 10^8$ Вт / м², при длине контактной площадки в направлении схода стружки $l_1 = 0,173$ мм, ширина среза $b = 1,155$ мм, высота площадки контакта по задней поверхности $l_2 = 0,1$ мм.

Исследования температурного состояния инструмента выполнялись при помощи программного пакета SolidWorks, в котором получена конечно-элементная модель резца с ромбической пластиной из твердого сплава без покрытия (рис. 6) и с покрытиями карбида титана TiC; нитрида титана TiN; тепловые расчеты выполнены с применением расчетного модуля Simulation, входящего в этот программный пакет. По результатам расчетов получены картины распределения температуры по поверхности резца (рис. 7), которые отображают особенности нагружения функциональных зон пластины - передней и задней поверхностей в целом и участков этих поверхностей.

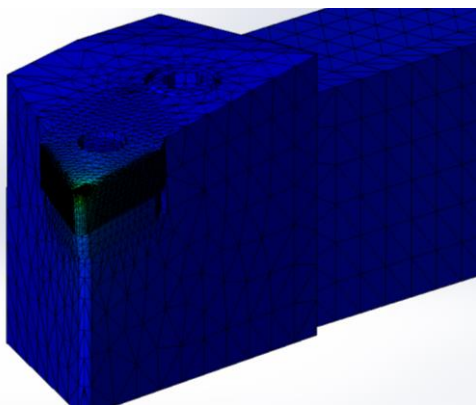


Рис. 6. Конечно-элементная модель резца без покрытия

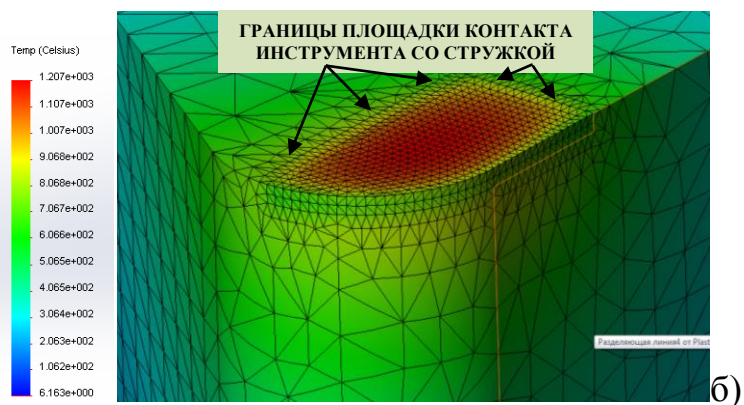


Рис. 7. Распределение температур по поверхностям инструмента без покрытия

Аналогично определены распределения температур для инструмента с покрытиями карбида титана TiC; нитрида титана TiN (рис. 8). Анализ теплового состояния режущей части инструмента с различными покрытиями показал снижение температуры на передней поверхности резца: для покрытий карбида титана TiC до 14%; нитрида титана TiN до 24% по сравнению с инструментом без покрытий.

Установлено, что при обработке фасонной поверхности наблюдается изменение тепловых потоков и температуры резания в зоне обработки вдоль образующей. Выявлены зоны превышения предельно допустимой температуры для заданных условий обработки. Для уменьшения термомеханической напряженности в этих зонах, на основании вышеуказанных принципов функционально-ориентированного подхода, предложено нанесение износостойких покрытий особой структуры. При этом на передней поверхности твердосплавную пластину с износостойким покрытием из карбида титана TiC зонально (область при вершине) целесообразно нанесение покрытия из нитрида титана TiN (рис.9).

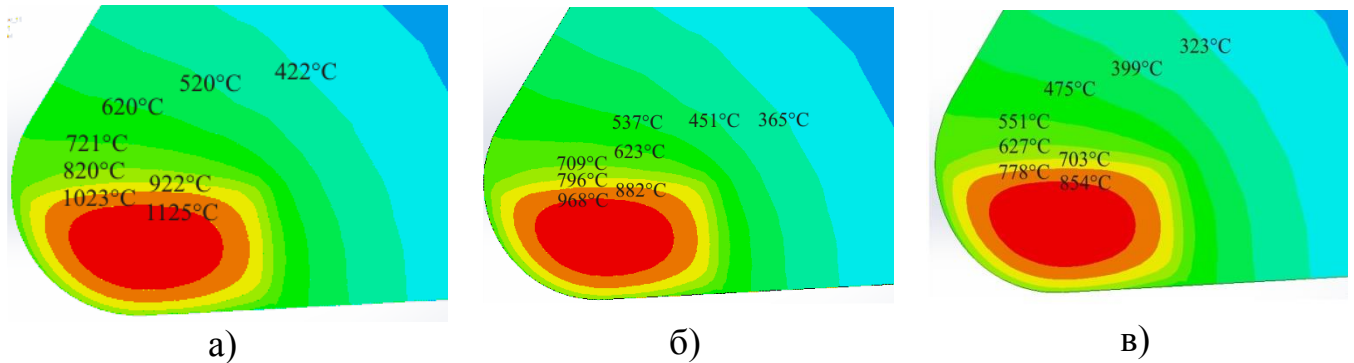


Рис. 8. Распределение температур по передней поверхности твердосплавной пластины: а) – без покрытия; б) – с покрытием карбида титана TiC; в) – с покрытием нитрида титана - TiN

Для инструмента с покрытием такой структуры выполнен расчет тепловых потоков и температур в зоне резания. Анализ теплового состояния режущей части инструмента с функционально-ориентированными свойствами показал снижение температуры на передней поверхности до 27% по сравнению с инструментом без покрытий (рис. 10).

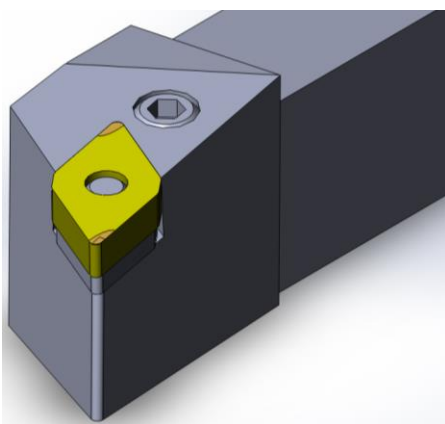


Рис. 9. Модель резца с функционально-ориентированными свойствами

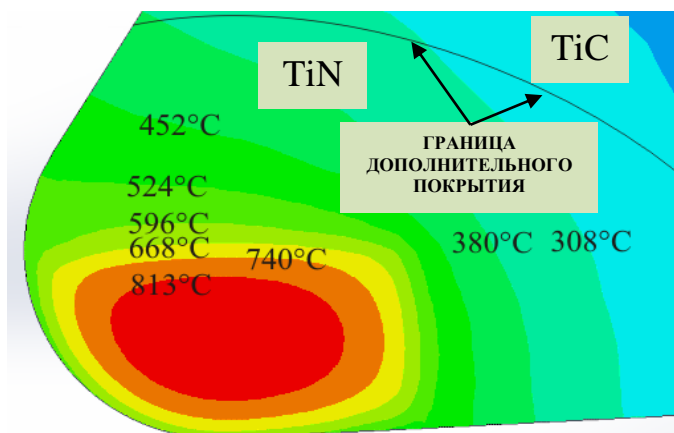


Рис. 10. Распределение температур по передней поверхности инструмента функционально-ориентированными свойствами

Аналогичные расчеты выполнены для резцов с твердосплавными пластинами трехгранной формы.

Для инструментов с покрытиями карбида титана TiC и нитрида титана TiN выполнена оценка соответствия результатов расчетов, полученных на основе метода конечных элементов с экспериментальным данным. Для этого определены значения температуры вблизи площадки контакта инструмента со стружкой (за ее пределами). Для заданных условий обработки расхождение результатов в пределах 7-12%, что позволяет считать результаты расчета температур для реза с функционально-ориентированными свойствами достоверными, а также использовать представленную методику с целью оценки и прогнозирования теплового состояния инструмента для различных видов и вариантов структуры износостойких покрытий.

В пятом разделе «Экспериментальные исследования. Основные рекомендации работы и внедрение результатов в производство» выполнено комплексное изучение основные эксплуатационные характеристики твердосплавных резцов с износостойкими покрытиями, получение исходные данных для выработки рекомендаций по рациональному использованию твердых сплавов с покрытиями и решения задач оптимизации процесса точения.

Общей методикой экспериментальных исследований предусматривалось комплексное проведение стойкостных экспериментов, при этом исследовалось влияние режимов резания - скорости, глубины и подачи по схеме классических экспериментов и взаимного влияния режимов резания – по схеме полного факторного эксперимента. В ходе стойкостных экспериментов осуществлялся контроль шероховатости обработанной поверхности, производившийся на 2-3 участках обработанной между двумя фиксациями износа пластины поверхности заготовки. Выборочно исследовалось влияние затупления твердосплавных пластин на изменение составляющих силы резания.

В качестве базовых марок твердых сплавов для экспериментальных исследований выбран ряд традиционных твердых сплавов групп ТК. Карбидтитановые покрытия на твердые сплавы нанесены методом осаждения покрытий из газовой среды (КВТК – «карбидизация – вакуумтитанирование - вторичная карбидизация). Покрытия на основе нитрида титана наносились методом КИБ (конденсация в условиях ионной бомбардировки).

Точение производилось резцами токарными сборными, проходными с механическим креплением сменных многогранных пластин по ГОСТ 24256-80 и ГОСТ 19046-80.

В качестве обрабатываемого материала выбрана сталь 45. Выбор обусловлен широким распространением и применением этой марки в качестве базовой для определения режущих свойств инструментальных материалов. В качестве заготовок использован прокат диаметром 230 мм, длиной 800-1000 мм. С целью уменьшения влияния неоднородности механических свойств образца на результаты стойкостных испытаний точение прекращалось при достижении диаметра 100-105 мм.

Эксперименты, связанные с точением стальных образцов проведены на экспериментальной установке на базе модернизированного токарно-револьверного станка с числовым программным управлением Hei nemann DN-300; исследования контактных поверхностей пластин производились на электронном сканирующем микроскопе «Стереоскан S-180» до $\times 10000$; контроль шероховатости обработанной поверхности осуществлялись на модернизированном профилографе-профилометре мод. 201; для определения величин составляющих силы резания использовался

универсальный динамометр УДМ-600; температура передней поверхности инструмента при точении определялась бесконтактным способом с помощью инфракрасного термометра (пирометра) Fluke 572 с диапазоном измеряемых температур от -30 до 900°C , предназначенного для измерения температуры по инфракрасному (ИК) излучению в спектральном диапазоне 8-14 мкм.

В ходе стойкостных испытаний следовался сплав Т15К6 с карбидо- и нитридотитановым покрытием, а также сплав Т15К6 без покрытия. Для определения стойкостных зависимостей исследуемых твердых сплавов в соответствии с методикой проведены эксперименты с использованием статистического метода планирования. В качестве математической модели, описывающей зависимость стойкости от режимов обработки, была принята степенная зависимость

$$T = \frac{C}{v^n t^p S^q} = \left(\frac{C_v}{v t^x S^y} \right)^{1/m}, \quad (6)$$

где $C = C_v^{1/m}$ - коэффициент постоянный для данного сплава с покрытием; V , t , S - скорость, м/с; глубина, мм; подача, мм/об, соответственно; $1/m = n$, $x/m = p$, $y/m = q$ - показатели степеней при варьируемом параметре.

Уравнение регрессии имеет вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3,$$

где y - логарифм значения стойкости; b_i - коэффициенты, определяющие показатели степени в зависимостях стойкости от режимов обработки; b_0 - коэффициент, определяющий коэффициенты C , C_v в зависимостях стойкости от режимов обработки; x_i - безразмерные варьируемые параметры, представляющие собой значения V , S , t в кодированном виде.

Получены стойкостные зависимости, представленные в кодированном виде:

$$\text{Т15К6: } \tilde{y} = 1,86 - 0,75x_1 - 0,96x_2 - 0,45x_3;$$

$$\text{Т15К6+TiC: } \tilde{y} = 2,60 - 0,68x_1 - 0,83x_2 - 0,65x_3 - 0,4x_2x_3;$$

$$\text{Т15К6+TiN: } \tilde{y} = 3,31 - 0,16x_1 - 0,04x_2 - 0,29x_3 + 0,07x_1x_2;$$

Обработка результатов стойкостных экспериментов выполнена для сплава Т15К6+TiN. В табл. 4 представлена матрица планирования основных экспериментов, приведены значения фактической (T) и расчетной (\tilde{T}) стойкости. Опыты 9-12 проведены в центральной точке плана при нулевых уровнях варьируемых факторов $X1$, $X2$ и $X3$.

Таблица 4. Матрица планирования экспериментов

№ опыта	Матрица планирования				Стойкость T (мин) при точении			
	Кодовые обозначения				Фактическое значение		Расчетное значение	
	X_0	X_1	X_2	X_3	T	$y = \ln T$	\tilde{T}	$\tilde{y} = \ln \tilde{T}$
1	+1	-1	-1	-1	42,0	3,74	43,6	3,78
2	+1	+1	-1	-1	17,2	2,84	16,9	2,83
3	+1	-1	+1	-1	23,8	3,17	24,2	3,19
4	+1	+1	+1	-1	9,8	2,28	9,4	2,24
5	+1	-1	-1	+1	23,0	3,14	22,2	3,10
6	+1	+1	-1	+1	8,5	2,14	8,6	2,15
7	+1	-1	+1	+1	12,6	2,53	12,4	2,52

8	+1	+1	+1	+1	4,6	1,53	4,8	1,57
9	+1	0	0	0	15,1	2,71	14,4	2,67
10	+1	0	0	0	14,2	2,65	14,4	2,67
11	+1	0	0	0	14,8	2,69	14,4	2,67
12	+1	0	0	0	14,9	2,70	14,4	2,67

Для расчета значений стойкости в зависимости от режимов резания, выраженных в реальных значениях подсчитаны коэффициенты и показатели степени, приведенные в таблице 5.

Таблица 5. Исходные данные для расчета стойкости T (мин)

Обозначение сплава											
T15K6				T15K6+TiC				T15K6+TiN			
Коэффициенты и показатели степеней											
C	n	q	p	C	n	q	p	C	n	q	p
98,6	4,58	2,77	0,819	1010	4,15	1,24+2,1Л*	3,83	15,2	-0,6-1,24М*	1,68	0,53
* Обозначено: Л= $\ln t$; М= $\ln S$											

Дисперсия эксперимента с нулевой точкой:

$$S_{y_0}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y - \bar{y})^2}{n - 1} = 11 \cdot 10^{-4},$$

где

$$\bar{y} = \frac{2,71 + 2,65 + 2,69 + 2,7}{4} = 2,69,$$

\bar{y} - среднее значение по результатам $n = 4$ экспериментов в нулевой точке.

Проверка адекватности уравнения регрессии осуществилась по F - критерию Фишера $F_{\text{э}} = S_{\text{ад}}^2 / S_{y_0}^2$, где $S_{\text{ад}}^2$ - остаточная дисперсия (дисперсия адекватности),

$$S_{\text{ад}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta y_i^2}{f},$$

$f = N - (k + 1) = 8 - (3 + 1)$ - число степеней свободы, $k = 3$ - число варьируемых параметров.

$$S_{\text{ад}}^2 = 17,8 \cdot 10^{-4},$$

$$F_{\text{э}} = \frac{17,8 \cdot 10^{-4}}{11 \cdot 10^{-4}} = 1,61.$$

Табличное значение критерия при 5% уровне значимости и соответствующих степенях свободы $F_T = 6,60$. $F_{\text{э}} < F_T$, таким образом модель адекватна.

В результате статистического анализа экспериментальных данных по определению стойкости оценена точность полученных уравнений регрессии и адекватность постулируемой математической модели. На основании полученных результатов можно заключить, что при доверительной вероятности 0,95 относительная погрешность расчета величины \tilde{T} не превышает 15%. Экспериментальные значения $y_i = \ln T$ перекрываются границами доверительного интервала расчетного параметра \tilde{y} . Все это позволяет считать, что зависимость стойкости от режимов точения при обработке исследуемыми твердыми сплавами с достаточной точностью может быть описана вышеуказанной формулой.

Коэффициент стойкости представлен произведением двух коэффициентов:

$$K_{ст} = K_{ст1} K_{ст2},$$

где $K_{ст1}$ – коэффициент стойкости, учитывающий влияние глубины резания и подачи при фиксированном значении скорости; $K_{ст2}$ – коэффициент стойкости, учитывающий влияние скорости резания при фиксированных значениях глубины резания и подачи.

Анализ влияния износостойких покрытий на стойкость твердосплавных резцов (рис. 11) показал, что на соотношение стойкостей различных сочетаний твердых сплавов и покрытий влияет каждый из параметров, определяющих режимы резания: глубина резания, подача, скорость; выбор оптимального сочетания сплав-покрытие, обеспечивающего повышение стойкости, необходимо решать с учетом конкретных сочетаний режимов резания.

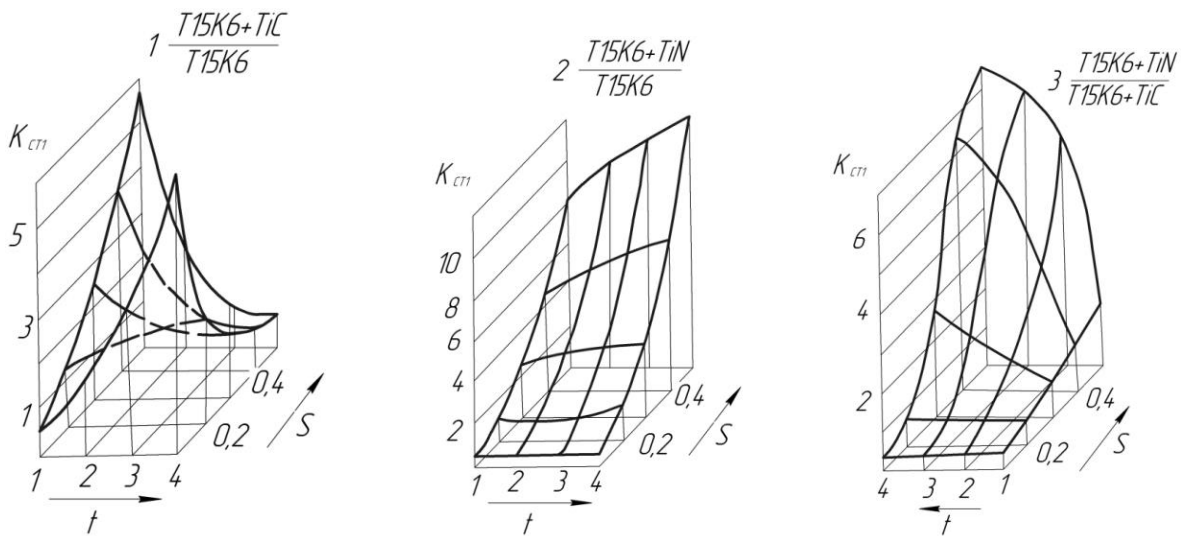
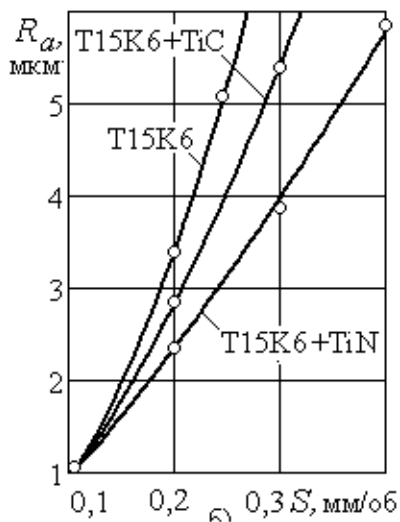


Рис. 11. Сопоставление стойкости сплавов при точении стали 45 ($V=3$ м/с)

Аналогичным образом в ходе экспериментальных исследований установлены зависимости шероховатости обработанной поверхности (рис. 13) и температуры резания от режимов обработки. Значения R_a при точении исследованными сплавами снижаются по мере износа пластин; влияние износостойких покрытий на снижение шероховатости объясняется характером адгезионных процессов в зоне контакта с обрабатываемым материалом, сдерживанием износа задней вспомогательной поверхности.

Температура в процессе выполнения эксперимента определялась бесконтактным способом на передней поверхности лезвия инструмента. Установлены коэффициенты снижения температуры в зоне резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC - 0,86; с покрытиями из нитрида титана TiN - 0,74. Результаты экспериментальных исследований, как по уровню температур, так и по соотношениям между температурами для инструментов с различными покрытиями, достаточно хорошо подтверждают теоретические расчеты.

В результате статистической обработки данных экспериментальных исследований с погрешностью, не превышающей 5%, установлены регрессионные зависимости температуры резания, шероховатости обработанной поверхности и скорости резания от параметров обработки, представленные в табл. 6. Установлено,



что при использовании различных износостойких покрытий изменяются не только коэффициенты в регрессионных зависимостях, но и показатели степени, характеризующие влияние режимов обработки на температуру резания, шероховатость обработанной поверхности и стойкость инструмента.

Таблица 6. Результаты экспериментальных исследований

Рис. 13. Графики зависимости шероховатости поверхности R_a от подачи для инструментов с различными покрытиями

Инструментальный материал	Температура резания, °C	Шероховатость поверхности, мкм	Скорость резания, м/с
T15K6	$\Theta_1 = 795V^{0,55}S^{0,4}t^{0,2}$	$R_{a1} = 72S^{1,9}$	$V_1 = 2,73/T^{0,22}S^{0,61}t^{0,18}$
T15K6+TiC	$\Theta_2 = 745V^{0,45}S^{0,4}t^{0,2}$	$R_{a2} = 37S^{1,6}$	$V_2 = 3,35/T^{0,24}S^{0,65}t^{0,22}$
T15K6+TiN	$\Theta_3 = 680V^{0,4}S^{0,4}t^{0,2}$	$R_{a3} = 19S^{1,3}$	$V_3 = 7,34/T^{0,40}S^{0,66}t^{0,21}$

Результаты расчетов оптимальных режимов резания и коэффициентов повышения эффективности (повышения производительности K_P , снижения себестоимости K_C и критерия свертки производительности и себестоимости K_M) даны в табл. 7.

Таблица 7. Результаты оптимизации режимов точения резцами с покрытиями

Инструментальный материал	Оптимальные режимы резания				Коэффициенты повышения эффективности		
	Подача, мм/об	Скорости резания по различным критериям, м/с			K_P	K_C	K_M
		S_o	V_{oP}	V_{oC}			
T15K6	0,17	3,7	3,3	3,7	1	1	1
T15K6+TiC	0,19	7,2	4,0	6,1	1,5	0,8	0,8
T15K6+TiN	0,21	6,9	5,9	6,8	2,3	0,6	0,77

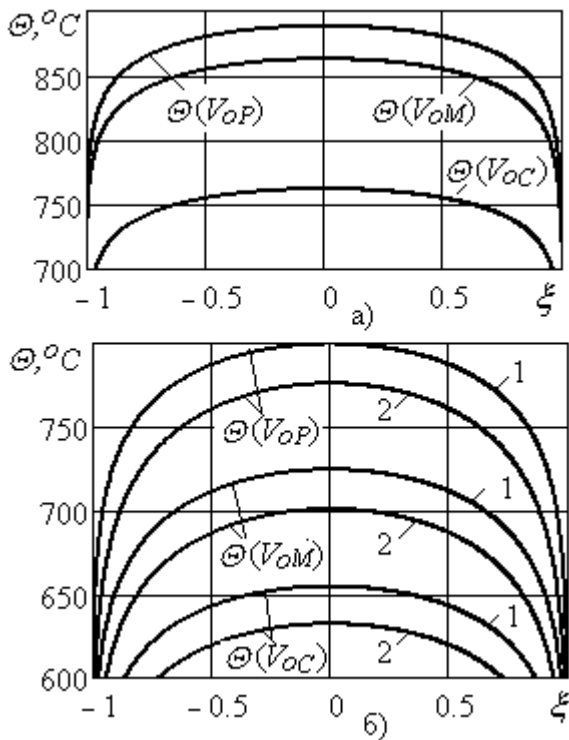


Рис. 14. Распределение температур вдоль криволинейной образующей при точении инструментами без покрытия – а) и с покрытиями: 1 - TiC, 2 - TiN – б)

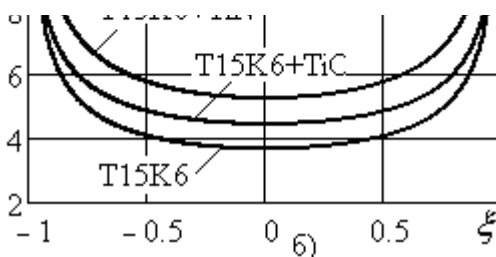


Рис. 15. Распределение подач – а) и скоростей резания – б) вдоль криволинейной образующей при точении инструментами без покрытия и с покрытиями

Закономерности изменения температур резания вдоль безразмерной координаты ξ , рассчитанных для оптимальных по различным критериям значениям подач и скоростей резания, приведены на рис. 5.

При обработке инструментами без покрытий (рис. 14а) температуры резания для режимов, рассчитанных по критериям производительности и свертке критериев, превышают допустимый уровень $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$. В этом случае скорость резания $V_{o\Theta}$ определяется с учетом температурного ограничения. При нанесении износостойких покрытий (рис. 14б) во всем диапазоне изменения температуры резания не превышают допустимого уровня $\Theta_o = 800^\circ\text{C}$. Температуры резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 15%, а из нитрида титана TiN до 25% ниже, чем для инструментов без покрытий.

Закономерности изменения оптимальных подач S_o и оптимальных по производительности скоростей резания V_{oP} вдоль безразмерной координаты ξ представлены на рис. 15.

Оптимальная подача (рис. 15а) для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 10%, а из нитрида титана TiN до 23% выше, чем для инструментов без покрытий.

Оптимальные по производительности скорости резания для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC до 20%, а из нитрида титана TiN до 43% выше, чем для инструментов без покрытий.

Оценку оптимальных режимов резания для различных вариантов инструментов с покрытиями целесообразно выполнять путем сравнения с инструментом без покрытия на основании следующих коэффициентов:

$$K_S = S_{oT15K6+TiC, TiN} / S_{oT15K6};$$

$$K_V = V_{oT15K6+TiC, TiN} / V_{oT15K6}.$$

Результаты анализа оптимальных режимов резания в зависимости от шероховатости поверхности (для инструментов с различными покрытиями) приведены на рис. 16.

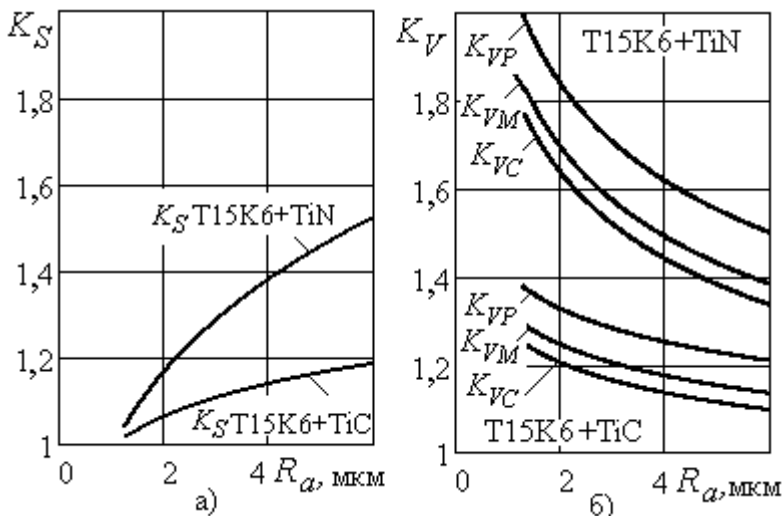


Рис. 16. Зависимость коэффициентов изменения подач – а), скоростей резания – б) от шероховатости поверхности R_a для инструментов с покрытиями

Инструменты с покрытиями обеспечивают более высокий уровень оптимальных подач (рис. 16а) и скоростей резания (рис. 16б), причем резцы с покрытием карбидом титана TiC существенно уступают резцам с покрытием нитридом титана TiN.

Расчет коэффициентов повышения эффективности (повышения производительности K_P , снижения себестоимости K_C и критерия свертки производительности и себестоимости K_M) осуществляется на основании следующих аналитических

зависимостей:

$$K_P = K_{\ominus}^{-1/n_t}; K_C = \frac{1 + MV_o^{k_V} S_o^{k_S}}{1 + MK_{\ominus}^{-1/mn_t} V_o^{k_V} S_o^{k_S}}; K_M = \frac{1 + MV_o^{k_V-1} S_o^{k_S-1}}{1 + MK_{\ominus}^{-1/mn_t} V_o^{k_V-1} S_o^{k_S-1}}. (7)$$

Производительность обработки для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC повышается в 1,5 раза, из нитрида титана TiN - в 2,3 раза. Себестоимость снижается в 1,2 раза для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC и в 1,7 раза из для инструментов с покрытиями нитрида титана TiN.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлено решение актуальной научно-практической задачи повышения эффективности токарной обработки фасонных поверхностей деталей машин на основе комплексного обеспечения оптимальных режимов обработки и применения твердосплавного инструмента с износостойкими покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

1. Выполнен анализ основных особенностей и способов технологического обеспечения обработки фасонных поверхностей. Установлена актуальность решения

комплексной задачи повышения производительности и снижения себестоимости за счет определения оптимальных режимов резания в условиях переменности параметров процесса токарной обработки и применения твердосплавного инструмента с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами.

2. Разработана методика повышения эффективности обработки фасонных поверхностей за счет обоснованного сочетания оптимальных режимов обработки и специального инструмента, обеспечивающего требуемые эксплуатационные функции в условиях переменности параметров процесса резания. Установлены коэффициенты, характеризующие изменения геометрических параметров лезвия инструмента – углов в плане (до 4-х раз), параметров срезаемого слоя (до 4-х раз) и скорости резания (до 2-х раз) вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности.

3. Разработана методика многокритериальной оптимизации режимов резания в условиях переменности действующих технических ограничений при токарной обработке фасонных поверхностей. Обоснована целесообразность использования мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости, обеспечивающей их наилучшее сочетание (потери производительности и себестоимости снижаются до 10%). По критериям производительности, себестоимости и их свертке определены аналитические зависимости оптимальных подач и скоростей резания от параметров обработки, учитывающие переменность технических ограничений.

4. Установлены зависимости температур резания и параметров шероховатости обработанной поверхности от режимов обработки с учетом переменности параметров процесса резания при точении фасонных поверхностей. Установлено, что в различных точках криволинейной образующей фасонной поверхности температура резания может изменяться до 2 раз и существенно превышать допустимый уровень, что требует учета температурных ограничений при определении оптимальных режимов точения.

5. На основе функционально-ориентированного подхода при анализе теплового состояния режущей части инструмента обоснован выбор рациональной структуры и вида специального покрытия с требуемыми функциональными свойствами зон твердосплавной пластины. На основе метода конечных элементов разработана методика расчета температур в зоне резания, позволяющая оценить возможность снижения температур в зоне обработки за счет применения инструментов с покрытиями с функционально-ориентированными свойствами. Установлено, что применение инструмента с функционально-ориентированными свойствами на основе карбида титана TiC и нитрида титана TiN обеспечивает снижение температуры в функциональных зонах пластины до 27%.

6. В результате экспериментальных исследований установлено влияние износа твердосплавной пластины и режимов обработки на шероховатость обработанной поверхности (при чистовом точении инструментом с покрытием высота микронеровностей может снижаться до 80% в сравнении с точением инструментом без покрытия). Выполнен сравнительный анализ температур в зоне резания при точении инструментами с износостойкими покрытиями. Теоретически рассчитаны и экспериментально подтверждены коэффициенты снижения температуры резания для инструментов с различными покрытиями: из карбида титана TiC – на 14%, из нитрида титана TiN – на 25%.

7. На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны и даны рекомендации по назначению оптимальных режимов резания, а также выполнена оценка повышения эффективности - повышения производительности K_p , снижения себестоимости K_c при чистовом точении фасонных поверхностей инструментами с износостойкими покрытиями. В результате повышения оптимальных подач и скоростей резания за счет использования инструментов с покрытиями производительность обработки для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC повышается в 1,5 раза, из нитрида титана TiN - в 2,3 раза. Себестоимость снижается в 1,2 раза для инструментов с покрытиями из карбида титана TiC и в 1,7 раза для инструментов с покрытиями нитрида титана TiN.

8. Результаты работы внедрены в производство на предприятии ООО «Научно-производственное объединение «Донвентиллятор» с ожидаемым экономическим эффектом в размере 17500 рос.руб, Луганском ЧП «Депла» - 14500 рос.руб, а также в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» Донецкого национального технического университета.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Научные работы, опубликованные в рецензируемых журналах и изданиях

1. Учет переменности параметров процесса точения фасонных поверхностей при определении оптимальных режимов резания / **И.А. Петряева**, А.Н. Михайлов, Т.Г. Ивченко // Научно-технический и производственный журнал. – М: Машиностроение. - 2014. - №. 9 – С.11-17. *(Разработка методики определения оптимальных режимов резания с учетом переменности параметров процесса обработки фасонных поверхностей).*

2. **Петряева, І.О.** Дослідження параметрів шорсткості під час обробки фасонної поверхні // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. наукових праць. – Донецьк: ДонНТУ, - 2014. - Вып. 2 (48). - С.50-56.

3. Исследование тепловых потоков и температур резания при обработке инструментами с износостойкими покрытиями / Т.Г. Ивченко, **И.А. Петряева** // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, - 2015. - Вып. 1 (51). - С.84-89. *(Разработка теоретической модели определения тепловых потоков и температуры резания в условиях переменности параметров обработки фасонной поверхности точением).*

4. Оптимизация режимов чистового точения на основании мультипликативной свертки критериев производительности и себестоимости / **И. А. Петряева**, Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сборник научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2016. Вып. 1 (52). – С.146-150. *(Разработка методики многокритериальной оптимизации режимов резания в условиях переменности действующих технических ограничений при токарной обработке фасонных поверхностей).*

5. Оценка эффективности использования инструментов с покрытиями при чистовом точении фасонных поверхностей / **И. А. Петряева**, Т. Г. Ивченко // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, - 2016. - Вып. 4 (55). - С.62-69. *(Определение технических ограничений при токарной обработке основе экспериментальных исследований).*

Научные работы с иностранными индексами цитирования

6. Research of Changeability of Cutting Process Parameters at turning of the Shaped Surfaces / T. Ivchenko, **I. Petryaeva**, R. Grubka // Advanced Materials Research. – 2014. Vol.1036. - P. 361-364. (*Анализ переменности параметров процесса обработки фасонной поверхности*).

7. Ivchenko, T. Estimation of Possibilities of the Productivity Rise at Turning of Hard-Processing Materials / T. Ivchenko, V. Boguslavskiy, **I. Petryaeva**, D. Mikhaylov // Applied Mechanics and Materials. – 2014. Vol.657. - P. 63-67. (*Оценка повышения производительности обработки*).

8. Multicriterion optimization of the cutting regimes in the conditions of changeability of the operating limitations / **I. Petryaeva**, T Ivchenko, A. Mikhailov // International Journal of Modern Manufacturing Technologies. – 2016. No. 1 Vol. VIII. – P. 75-79. (*Обоснование критериев производительности и себестоимости и их свертки различными методами и определение оптимальных режимов обработки*).

Научные работы в материалах конференций

9. Івченко, Т.Г. Визначення теплових потоків та температури різання під час точіння фасонних поверхонь / Т.Г. Івченко, **І.О. Петряєва**, К.О. Король // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XXI международной научно-технической конференции, 15-19 сентября 2013. – Т1.– С. 253-256. (*Анализ изменения тепловых потоков и температуры резания вдоль криволинейной образующей фасонной поверхности*).

10. Михайлов, А.Н. К вопросу о влиянии переменных параметров процесса точения на формирование шероховатости фасонной поверхности / А.Н. Михайлов, **И.А. Петряева** // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XX международной научно-технической конференции, 16-21 сентября 2013. – Т3.– С. 178-180. (*Установление взаимосвязей параметров шероховатости обрабатываемой фасонной от геометрических параметров инструмента*).

11. **Петряева, И.А.** Применение функционально-ориентированного подхода при управлении процессом обработки фасонных поверхностей деталей прокатного оборудования / И.А.Петряева, А.Н.Михайлов // Практика и перспективы развития партнерства в сфере высшей школы: сб. трудов XV международного научно-практического семинара, 2014 . – Т3.– С. 197-201. (*Анализ особенностей применения функционально-ориентированного подхода для обеспечения функциональных свойств режущего инструмента при обработке фасонных поверхностей*).

12. **Петряева, И.А.** Выявление взаимного влияния составляющих процесса обработки фасонной поверхности на этапе технологической подготовки на примере деталей прокатного оборудования / И.А. Петряева, А.Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XX международной научно-технической конференции, 16-21 сентября 2014. – Т1.– С. 208-211. (*Постановка цели и задач исследований, обоснование общей методики теоретических исследований*).

