

На правах рукописи



ТОЛМАЧЕВА Татьяна Александровна

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЧИСТОВОГО
ВИХРЕВОГО РАСТАЧИВАНИЯ КРУПНОРАЗМЕРНЫХ
ОТВЕРСТИЙ**

Специальность 2.5.5. – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Курск – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Юго-Западный государственный университет»

Научный руководитель: **Куц Вадим Васильевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Тотай Анатолий Васильевич**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (г. Брянск),
профессор кафедры техносферной безопасности

Коденцев Сергей Николаевич
кандидат технических наук
Филиал ПАО Яковлев (г. Воронеж)
руководитель проектов по наращиванию
производственных мощностей

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула)

Защита состоится 17 апреля 2024 г. в 14.00 часов в конференц-зале на заседании диссертационного совета диссертационного совета 24.2.286.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» (ВГТУ), по адресу: 394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке и на сайте <http://www.cchgeu.ru/> ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Автореферат разослан « ____ » _____ 2024г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат техн. наук, доцент



Мандрыкин Андрей
Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В современном машиностроении нашли применение и широко используются детали, имеющие в своей конструкции крупноразмерные отверстия, к поверхностям которых предъявляются высокие требования по шероховатости и погрешностям формы и др. Примером таких деталей, в частности, могут служить гильзы пневмо- и гидроцилиндров, изготавливаемых из конструкционных сталей (например, сталей 20, 35, 40X и 45).

Несмотря на современное развитие техники и технологий, основным методом обработки таких отверстий, в т.ч. и на чистовых операциях, по-прежнему, остаётся растачивание твердосплавным резцом на заданный размер, которое из всех разновидностей обработки деталей резанием является наиболее сложной и трудоемкой. В процессе такого растачивания происходит непрерывный контакт режущего клина резца со сбегавшей сливной стружкой, что повышает тепловую нагрузку на обрабатываемую поверхность детали и режущий инструмент, понижает его прочность и износостойкость. При этом, не возможным является одновременное обеспечение в процессе резания температуры на поверхности заготовки ниже температуры структурно-фазовых изменений для заданной марки стали, что будет негативно сказываться на качестве обработанной поверхности, и температуры в зоне резания соответствующей наилучшим показателям стойкости инструмента (о которой упоминается в работах проф. Макарова А.Д., Артамонов Е.В. и др.).

Так же, одним из проблемных вопросов при растачивании является необходимость дробления сливной стружки и её удаление из зоны резания и отверстия, а также ограниченность попадания смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ) в зону обработки, всё это в целом негативно сказывается на стойкости инструмента и эффективности операции растачивания.

Перспективным направлением совершенствования чистовой обработки крупноразмерных отверстий является реализация схемы вихревого растачивания вращающимся многорезцовым блоком, при которой будет осуществляться процесс прерывистого резания при скорости более 500 м/мин, что позволит устранить недостатки присущие непрерывному резанию, обеспечить образование мелкой раздельной стружки, срезаемой отдельно каждым резцом; снизить тепловую нагрузку на обрабатываемую поверхность детали и режущий инструмент, и как следствие повысить стойкость режущего инструмента и обеспечить требуемое качество обработанной поверхности отверстий.

В настоящее время схема вихревой обработки рассматривалась в работах Никитина В.К., и использовалась для нарезания внутренних резьб в крупноразмерных отверстиях, с диаметрами отверстий более 80 мм, также в работах Отений Я.Н., Муравьев О.П., Туменов Т.Н., Жунусова А.Ш., Деулин М.М. Вирт А.Э. и использовалась применительно к черновому точению, где позволяла увеличить минутную подачу в 3,16 раза по сравнению с непрерывным резанием одним резцом. Однако, вопросы применения схемы вихревой обработки применительно к растачиванию крупноразмерных отверстий подробно не исследовались, особенно при их чистовой обработке.

Таким образом, можно утверждать, что разработка и применение метода вихревого растачивания вращающимся резцовым блоком на чистовых операциях обработки крупноразмерных отверстий, а также определение режимов обработки, позволяющих добиться высоких показателей по стойкости инструмента, является актуальной научно-технической задачей.

Цель работы: Снижение тепловой нагрузки на обрабатываемую поверхность детали для исключения структурно-фазовых изменений материала и на поверхность твердосплавного инструмента посредством обеспечения температуры в зоне резания, соответствующей наилучшим показателям по стойкости инструмента, при чистовой обработке крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей на основе применения метода вихревого растачивания вращающимся резцовым блоком.

Объектом исследования является процесс чистовой обработки крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей методом вихревого растачивания с применением вращающегося многорезцового блока.

Предметом исследования является установление взаимосвязей шероховатости обработанной поверхности крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей, периода стойкости инструмента, температуры в зоне резания и на обработанной поверхности от конструктивных параметров резцового блока и режимов резания.

Область исследований. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности п.2 «Теоретические основы, моделирование и методы экспериментального исследования процессов механической и физико-технической обработки, включая процессы комбинированной обработки с наложением различных физических и химических воздействий» и п.4 «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки», п.6 «Исследование влияния режимов обработки на силы резания, температуру, стойкость инструмента и динамическую жесткость оборудования» специальности 2.5.5 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки.

Задачи исследования:

1) Разработать механизм формообразования отверстий методом вихревого растачивания, вращающимся резцовым блоком, оснащенным сменными многогранными пластинами (СМП).

2) Разработать метод моделирования гребешков шероховатости на обработанной поверхности, выполнить, на основе компьютерного моделирования, экспериментальное исследование и установить регрессионные зависимости их высоты от геометрических параметров резцового блока и режимов обработки, установить области проектных параметров обеспечивающих высоту гребешков шероховатости соответствующих чистовому и получистовому растачиванию.

3) Исследовать методами компьютерного моделирования изменение температуры в зоне резания и на обработанной поверхности в процессе вихревого растачивания от геометрических параметров инструмента и режимов обработки, установить соответствующие регрессионные зависимости.

4) Спроектировать и изготовить экспериментальную установку для исследования процесса вихревого растачивания на базе токарно-винторезного станка высокой точности с установкой вместо резцедержателя высокоскоростного шпинделя с закреплённым резцовым блоком.

5) Выполнить экспериментальные исследования влияния режимов обработки и конструктивных параметров резцового блока на изменение формы отделяемой стружки, а также на величину шероховатости обработанной поверхности (Ra , Rz) и установить соответствующие регрессионные зависимости.

6) Выполнить экспериментальные исследования влияния режимов обработки конструкционных сталей и конструктивных параметров резцового блока на величину изменения ширины площадки износа от времени на задней поверхности. Исходя из заданного критерия износа, построить регрессионную модель для периода стойкости инструмента.

7) Разработать модель оптимизации режимов вихревого растачивания вращающимся резцовым блоком по критерию достижения наибольшей производительности обработки крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей при условии обеспечения заданной шероховатости, требуемого периода стойкости инструмента, температуры в зоне резания и на обработанной поверхности. Разработать рекомендации по назначению режимов обработки отверстий методом вихревого растачивания.

Методы исследований. Исследования процесса вихревого растачивания отверстий многорезцовым блоком производились на основе положений геометрической теории проектирования режущих инструментов, теории резания, математической статистики, компьютерного моделирования процессов резания, планирования и организации эксперимента.

Статистическая обработка полученных экспериментальных результатов производилась с использованием математического аппарата программных комплексов Maple, STATISTICA и Excel. Исследование модели процесса обработки осуществлялась на основе компьютерного моделирования в системе Deform 3D.

Экспериментальные исследования выполнялись с использованием современных стандартных и специальных измерительных приборов: портативный измеритель шероховатости TR220, микроскоп отсчетный измерительный МПБ-2 и др.

Научная новизна работы состоит в установлении зависимостей для температуры в зоне резания и на обработанной поверхности, шероховатости обработанной поверхности, ширины площадки износа по задней поверхности, а также периода стойкости СМП резцов расточного блока от режимов обработки крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей и конструктивных параметров вращающегося резцового блока.

Положения новизны, выносимые на защиту:

1) Метод моделирования поверхности гребешков шероховатости, результаты её компьютерного моделирования и расчета высоты гребешков шероховатости при различных геометрических параметрах резцового блока и режимах обработки, а также установленные на основе полученных зависимостей области проектных параметров обеспечивающих высоту гребешков шероховатости соответствующих чистовому растачиванию.

2) Результаты компьютерного моделирования и расчета изменения температуры в зоне резания и на обработанной поверхности в процессе вихревого растачивания от геометрических параметров инструмента и режимов обработки крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей.

3) Результаты экспериментальных исследований влияния режимов обработки и конструктивных параметров резцового блока на изменение формы отделяемой стружки, а также на величину шероховатости обработанной поверхности (R_a , R_z).

4) Результаты экспериментальных исследований влияния режимов обработки крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей и конструктивных параметров резцового блока на величину изменения ширины площадки износа от времени на задней поверхности резца и на изменение периода стойкости инструмента.

5) Модель оптимизации режимов вихревого растачивания вращающимся резцовым блоком по критерию достижения наибольшей производительности обработки крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей и обеспечении заданной температуры в зоне резания и на обработанной поверхности, а также шероховатости и требуемого периода стойкости инструмента.

Реализация результатов. Результаты работы приняты к внедрению в ООО «ЗБТ» г. Санкт-Петербург и ООО «ЕвроТрансСервис» г. Санкт-Петербург, ООО «СЗМЗ» г. Тихвин, что подтверждено соответствующими актами.

Практическая значимость работы заключается в разработке:

1) Практических рекомендаций по назначению режимов обработки крупноразмерных отверстий, с диаметром более 80 мм в заготовках из конструкционных сталей методом вихревого растачивания для обеспечения требуемой шероховатости обработанной поверхности (Ra от 0,8 до 3,2 мкм) и заданного периода стойкости инструмента.

2) Установки для реализации процесса вихревого растачивания на базе токарно-винторезного станка высокой точности, а также в разработанной конструкции вращающегося резцового блока.

3) Программы расчета параметров режимов обработки в процессе вихревого растачивания отверстий (Свид. 2023661445 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ).

Апробация работы: Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-технической конференции «Современное перспективное развитие науки, техники и технологий» (Воронеж 2023 г.), Всероссийской научно-технической конференции «От качества инструментов в инструментах качества» (Тула 2023 г.), II, III и IV Всероссийской научно-технической конференции «Отечественный и зарубежный опыт обеспечения качества в машиностроении» (Тула, 2020 г., 2022, 2023 г.), 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей (Брянск, 2022 г.), Международной научно-технической конференции «МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении» (Москва 2022 г.), Всероссийской молодежной научной конференции «За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества» (Курск, 2022 г.), 7th International Conference on Industrial Engineering (Челябинск, 2021г.), 3-й Международной научной конференции молодых ученых «Исторические, философские, методологические проблемы современной науки» (Курск, 2020 г.), 9-й Международной молодежной научной конференции «Поколение будущего: Взгляд молодых ученых-2020» (Курск, 2020 г.), 12-й Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» (Курск, 2022 г.), 11-й Международной научно-практической конференции «Техника и технологии: пути инновационного развития» (Курск, 2022 г.).

Публикации. Общий объем публикаций по теме работы – 20, из них 3 издания, входящих в перечень ВАК, 3 издания, входящие в перечень Scopus.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка. Работа выполнена на 154 страницах и содержит 34 рисунка, список используемой литературы из 124 наименований, 18 таблиц, 9 приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цель и задачи диссертационной работы, определена научная новизна и практическая значимость.

Первая глава посвящена анализу методов чистовой обработки крупноразмерных отверстий деталей, к которым предъявляются высокие технологические требования. На этапе чистовых операций, немаловажную роль играет качество получаемой поверхности, которое в основном характеризуется величиной параметра шероховатости $Ra(Rz)$ соответствующей квалитету точности обрабатываемой поверхности (ГОСТ Р 70117-2022).

В работе были рассмотрены способы обработки, позволяющие повысить качество и производительности процесса, так в частности в работах Уткина Н. Ф., Кижняева Ю.Н., Тотая А.В., Плужникова С.К., и др. показано влияние режимов обработки, геометрии инструмента на шероховатость поверхности, в работах Андреева Г.С., Этин А.О., Чигиринского Ю.Л., Грешникова А.А., Лаврентьева А.М., Каневцев В.М., Грановского Г.И., Зорева Н. Н. и пр. проанализированы кинематические схемы непрерывного и периодического резания.

Так же, в работе был проведен обзор инструментов для обработки отверстий, был изучен отечественный и зарубежный опыт проектирования сборных режущих инструментов, нашедший отражение в работах таких ученых, как Гречишников В.А., Петухов Ю.Е., Артамонов Е.В., Коротков И.А., Схиртладзе А.Г., Емельянов С.Г., Куц В.В. Горохов В.А., Борискин О.И., Протасьев В.Б., Боровский Г.В., Тамбовцева А. А., Gokkaya H, Nalbant M, Ozel T, Hsu TK, Zeren E. и др.

В виду того, что любой процесс резания сопровождается выделением тепла в работе были изучены работы таких авторов как Андреев Г.С., Артамонов Е.В., Макаров А.Д., Силин С.С., Лоладзе Т.Н., Постнов В.В., Зорев Н.Н., Резников А. Н., Григорьев С.Н., Васин С.А., Верещака А.С., Кушнера В.С., Козочкина М.П., Штин А.С. и др. посвященные исследованию стойкостных и прочностных показателей инструмента от температуры в зоне резания.

Анализ научных трудов и литературных источников показал, что убрать недостатки, присущие непрерывному резанию, при растачивании отверстий, такие как, высокая температура в зоне резания, затрудненный подвод смазывающе-охлаждающей жидкости (СОЖ) к поверхностям режущего клина, наличие сливной стружки, которая наматывается на инструмент и деталь, можно применением метода вихревого растачивания с помощью многорезцового блока. Так как в процессе вихревого растачивания режущие элементы участвует в работе периодически, то применение данного метода позволит снизить тепловую нагрузку на поверхности расточного инструмента, обеспечить образование отдельной стружки, которая может легко удаляться из обрабатываемого отверстия. При этом применение метода вихревого растачивания, может одновременно обеспечить в процессе резания температуру на поверхности заготовки ниже температуры структурно-фазовых изменений для заданной марки стали и температуру в зоне резания соответствующей наилучшим показателям стойкости инструмента.

Процессу обработки вихревым резанием были посвящены работы таких авторов как Отений Я.Н., Смольников Н.Я., Олыштынский Н.В., Вирт А.Э., Лаврентьев А.М., Муравьев О.П., Туменов Т.Н., Жунусова А.Ш., Ткачева Ю.О., Плешакова Е.А., Ерахтина А.В., Деулин М.М. Проведенный анализ работ данных авторов показал, что большинство из них посвящены исследованию процесса вихревого точения.

На основании проведенного анализа были определены цель и задачи исследования.

Во второй главе приведена схема формообразования отверстия методом вихревого растачивания, вращающимся резцовым блоком, оснащенным СМП, разработана математическая модель процесса, а также метод расчета высоты гребешков шероховатости на основе пространственного моделирования их поверхности.

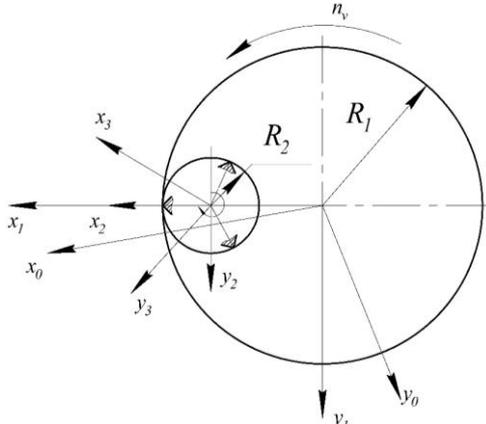


Рис. 1 Схема формообразования отверстия методом вихревого растачивания

Математическое моделирование процесса формообразования отверстий связано с построением модели поверхностей резания описываемых режущими кромками резцов в процессе обработки заготовки внутренним радиусом R_1 вращающимся резцовым блоком радиусом R_2 (рис. 1).

Было выполнено компьютерное моделирование процесса формообразования при заданных геометрических параметрах резцового блока и режимах обработки.

В виду того, что поверхности резания, образованные СМП резцового блока располагаются дискретно, на поверхности детали остаются неровности в виде гребешков, которые получаются в результате интерференции двух поверхностей резания, образованных режущими кромками резцового блока. В работе была получена функция для определения максимальной высоты остаточных гребешков шероховатости, которая представлена в виде

$$R_{Z \max} = \max \left(R_1 - \left| \bar{R}(s, t) \right|_{xy} \right), \quad (1)$$

где R_1 - радиус обрабатываемого отверстия заготовки; $\left| \bar{R}(s, t) \right|_{xy}$ - радиус-вектор образующей остаточного гребешка, где параметры $s_{\min} \leq s \leq s_{\max}$ и $t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$.

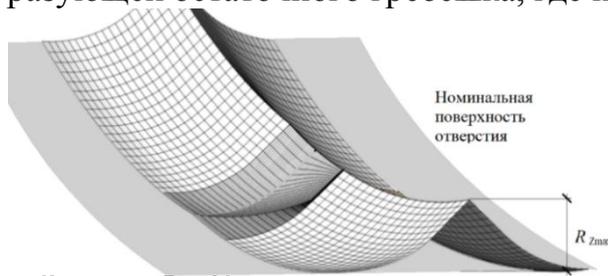


Рисунок 2 – Пространственная модель участка остаточного гребешка

В работе было проведено компьютерное моделирование высоты остаточных гребешков шероховатости поверхности (рис. 2). Реализация экспериментов производилась с использованием методов компьютерного моделирования и применением разработанного программного обеспечения в соответствии с планом эксперимента (таблица 2).

Таблица 2 - План эксперимента

Факторы	R_1 , мм	R_2 , мм	Z	r , мм	$K = n_b / n_z$	n_{z_2} об/мин	S_m , мм/мин
Верхний уровень, +1	250	$R_1 - 5$	12	1	150	500	200
Средний уровень, 0	150	$(R_1 + 25) / 2$	7	0,6	80	255	105
Нижний уровень, -1	50	30	3	0,2	10	10	10

При моделировании резцовый блок с твердосплавными четырехгранными СМП, имел следующие параметры: углы $\alpha = 10^\circ$; $\gamma = 0^\circ$; $\lambda = 0^\circ$.

После обработки результатов в программе STATISTICA были получены регрессионные уравнения следующего вида:

- высота остаточных гребешков шероховатости отверстий в осевом направлении Rz_{os}

$$Rz_{os} = 1278,898 r^{(-0,426-0,183 \ln(n_z)+0,132 \ln(S_m))} n_z^{(-2,461+0,127 \ln(S_m))} S_m^{1,362}; \quad (2)$$

- высота остаточных гребешков шероховатости отверстий в радиальном направлении Rz_{rad}

$$Rz_{rad} = \frac{1}{Z^{1,986} K^{1,885}} (1,061 \cdot 10^6 r^{(-0,610+0,092 \ln(R_1)+0,163 \ln(K)+0,058 \ln(n_z)-0,045 \ln(S_m))} \cdot R_2^{(-2,534-0,180 \ln(K)-0,039 \ln(n_z))} n_z^{(-0,404-0,053 \ln(S_m))} S_m^{0,734} R_1^{(0,400 \ln(R_2)+0,151 \ln(n_z)-0,093 \ln(S_m))}) \quad (3)$$

На основе уравнений (2) и (3) было построено обобщенное регрессионное уравнение максимальной высоты остаточных гребешков при растачивании внутренних отверстий вращающимся резцовым блоком

$$Rz_{max} = \max(Rz_{rad}, Rz_{os}). \quad (4)$$

При помощи уравнения (4) было исследовано влияние режимов обработки и конструктивных параметров резцового блока при вихревом растачивании на Rz_{max} , при $R_1=80$ мм, $S_{ob} = 0,1$ мм/об, $Z = 2$ (рис.3).

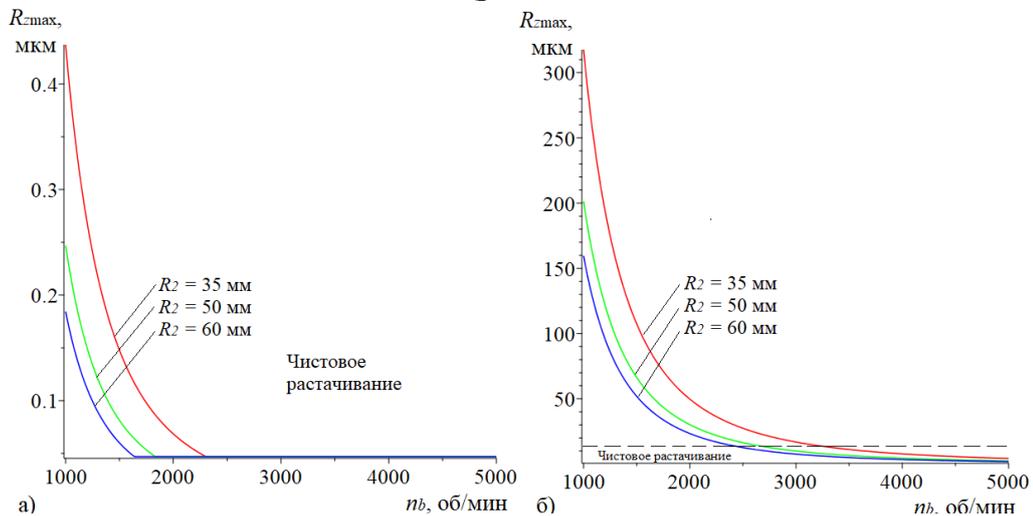


Рисунок 3 – Зависимость значения Rz_{max} от частоты вращения резцового блока n_b : а) $n_z = 20$ об/мин; б) $n_z = 200$ об/мин

При исследовании данных зависимостей были установлены области значений режимов обработки – $20 \text{ об/мин} \leq n_z \leq 200 \text{ об/мин}$, $1000 \text{ об/мин} \leq n_b \leq 5000 \text{ об/мин}$, которое обеспечивают требуемое значение Rz_{max} .

Анализ также показал, что при растачивании заготовок с отверстиями диаметром от 80 до 500 мм обеспечить требуемое значение шероховатости обработанной поверхности (ГОСТ Р 70117-2022) удастся резцовым блоком с диаметром от 70 мм и числом зубьев равное двум, применение резцового блока с наименьшими размерами является экономически целесообразнее и позволит обеспечить его большую универсальность.

Третья глава посвящена выполнению компьютерного моделирования и установлению зависимостей для температуры в зоне резания и на обработанной поверхности в процессе вихревого растачивания от геометрических параметров инструмента и режимов обработки различных конструкционных сталей. Исследование выполнялось в программном комплексе DEFORM-3D рис. 4.

Так как, при вихревом растачивании обработка производится вращающимся резцовым блоком, частота вращения которого намного больше частоты вращения заготовки, движение подачи – поступательное перемещение резцового блока в

продольном направлении, то при планировании эксперимента введены следующие переменные:

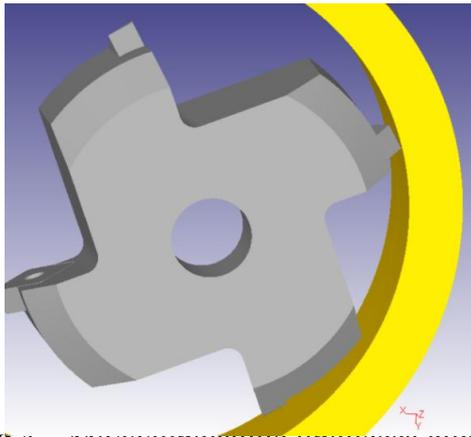


Рисунок 4 – моделирование процесса вихревого растачивания отверстия в системе DEFORM 3D

- подача на зуб в осевом направлении $S_{z1} = S_m / n_b Z$;
- подача на зуб в радиальном направлении $S_{z2} = 2\pi R_1 n_z / n_b Z$;
- скорость резания (при встречном вращении заготовки) $v = (2\pi R_1 n_z + 2\pi R_2 n_b) / 1000$.

Серия виртуальных экспериментов проводилась в соответствии с планом, приведенном в табл.3.

Таблица 3 – План эксперимента

Факторы	S_{z1} , мм/зуб	S_{z2} , мм/зуб	v , м/мин
Верхний уровень, +1	0,15	0,15	600
Средний уровень, 0	0,1	0,1	350
Нижний уровень, -1	0,05	0,05	100

На основе полученных в результате эксперимента данных в программе STATISTICA, с учетом введенных переменных, были получены регрессионные уравнения для температуры на обработанной поверхности θ_{zag} и для температуры в зоне резания θ_{zr} :

$$\theta_{zag} = 14,79M^{-1,12+0,20\ln B} B^{0,71}, \quad (5)$$

$$\theta_{zr} = 131,05 \cdot e^{0,02\ln(6,28Y)} B^{0,3} K_1, \quad (6)$$

где $B = 0,006R_1 n_z + 0,006R_2 n_b$; $Y = R_1 n_z / n_b Z$; $M = S_m / n_b Z$; K_1 - коэффициент, учитывающий влияние физико – механических свойств обрабатываемого материала (например, для ст20 $K_1=0,71$, ст35 $K_1=0,77$, ст40X $K_1=0,86$ и ст45 $K_1=1$).

Для того, чтобы оценить влияние параметров режимов растачивания на температуру в зоне резания и на поверхности заготовки, были построены графики при обработке стали 45 рис.5 и 6, при следующих параметрах $R_1=50$ мм и $R_2=40$ мм, $Z=2$, $S_m=2$ мм/мин.

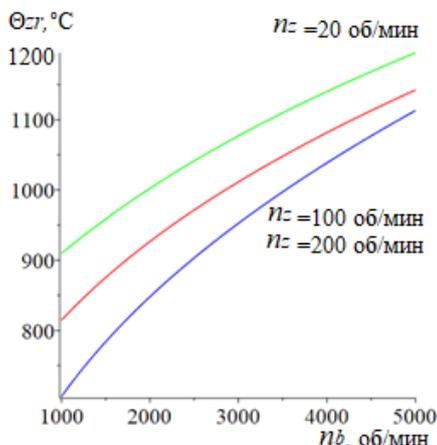


Рисунок 5 - График зависимости температуры в зоне резания от частоты вращения резцового блока n_b

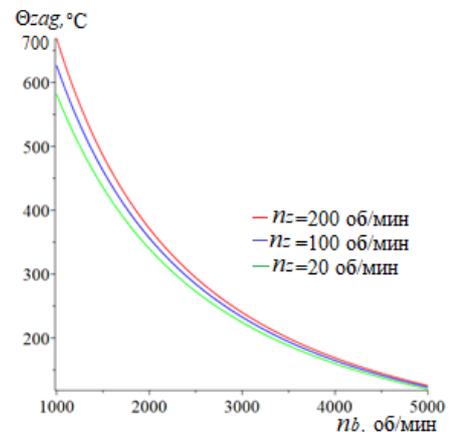


Рисунок 6 - График зависимости температуры на поверхности заготовки от частоты вращения резцового блока n_b

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что существует область режимов обработки, изменяющаяся в пределах $20 \text{ об/мин} \leq n_z \leq 200 \text{ об/мин}$, $1000 \text{ об/мин} \leq n_b \leq 5000 \text{ об/мин}$, позволяющая избежать изменения физико-механических свойств материала заготовки (до $700 \text{ }^\circ\text{C}$) и обеспечить температуру резания соответствующую высоким стойкостным показателям инструмента (около $850 \text{ }^\circ\text{C}$ по мнению проф. Макарова А.Д.).

Так же из графиков видно, что полученные зависимости не противоречат ранее полученным результатам таких авторов как Резников А.Н., Уткин Н.Ф., Бобров В.Ф.

Для оценки статической составляющей погрешности формы, формируемой резцовым блоком в процессе вихревого растачивания на основе результатов виртуального эксперимента были построены регрессионные уравнения для радиальной P_y , окружной P_z и осевой P_x составляющих силы резания. Проведенный анализ баланса точности системы показал, что в виду не высоких значений сил резания на чистовых операциях вихревого растачивания погрешности формы не будет превышать значениям соответствующим заданному качеству точности.

Глава четвертая посвящена экспериментальному исследованию процесса вихревого растачивания отверстий.

Для реализации процесса вихревого растачивания использовался модернизированный токарно-винторезный станок 16Б16А, на котором вместо резцового блока был установлен шпиндельный двигатель ER25, позволяющий обеспечить необходимую частоту вращения инструмента (рис. 7).

Для выполнения эксперимента был спроектирован резцовый блок с изменяющимся количеством режущих элементов, конструкция которого представлена на рисунке 8.

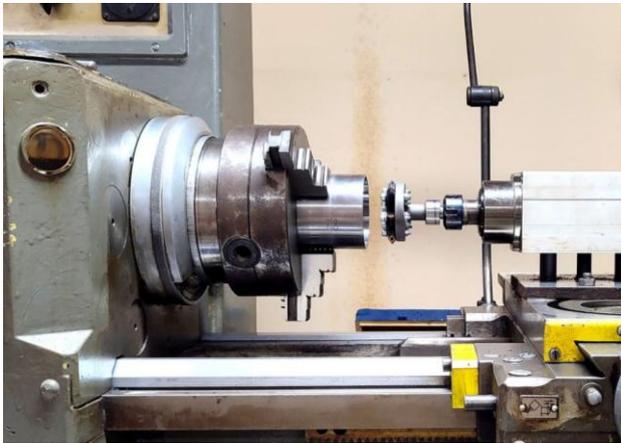


Рисунок 7 - Общий вид установки для проведения эксперимента

В качестве режущей части сборного резца были выбраны сменные твердосплавные пластины ССМТ 060204 UE6020, которые имеют следующие параметры $\alpha = 7^\circ$, $r = 0,4 \text{ мм}$, угол при вершине 80° .

Эксперимент проводился при постоянной глубине резания $t = 0,5 \text{ мм}$, обрабатывались заготовки из стали 45 с радиусом внутреннего отверстия $R_1 = 40 \text{ мм}$. При этом радиус вращающегося резцового блока $R_2 = 36 \text{ мм}$.

Режимы обработки изменялись в ранее установленных пределах: частота вращения резцового блока в минуту $n_b = 1000..5000 \text{ об/мин}$; частота вращения заготовки в минуту $n_z = 20..200 \text{ об/мин}$; подача на один оборот заготовки $S_{ob} = 0,01..0,1 \text{ мм/об}$, при числе СМП в резцовом блоке $Z = 2..6$.

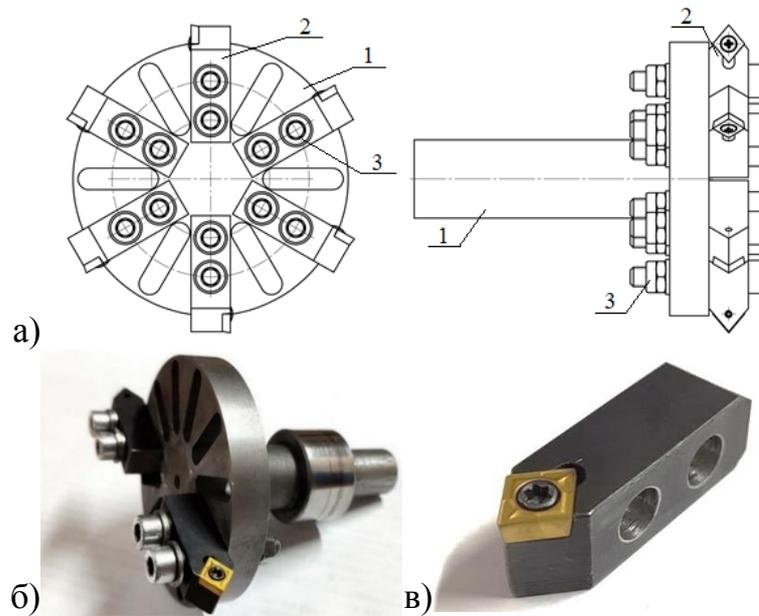


Рисунок 8 - Конструкция резового блока: а) сборный чертеж: 1 – корпус резового блока; 2 – сборный резец; 3 – крепежные элементы; б) резовый блок; в) сборный резец

Обработав внутренние поверхности заготовок на заданных режимах, соответствующих точкам плана, было выполнено измерение шероховатости с помощью портативного измерителя шероховатости TR220.

После обработки полученных результатов были получены регрессионные уравнения параметра шероховатости Ra и максимальной высоты остаточного гребешка шероховатости Rz , которые имеют следующий вид:

$$Ra = \frac{8,023 \cdot S_{ob}^{1,129-0,301 \ln(Z)} n_z^{1,543-0,128 \ln(n_b)}}{Z^{0,770}}; \quad (7)$$

$$Rz = \frac{39,837 \cdot S_{ob}^{1,046-0,319 \ln(Z)} n_z^{1,291-0,104 \ln(n_b)}}{Z^{0,890}}. \quad (8)$$

На основе уравнения (7) были построены графики зависимости шероховатости Ra от количества оборотов резового блока n_b (рис. 9).

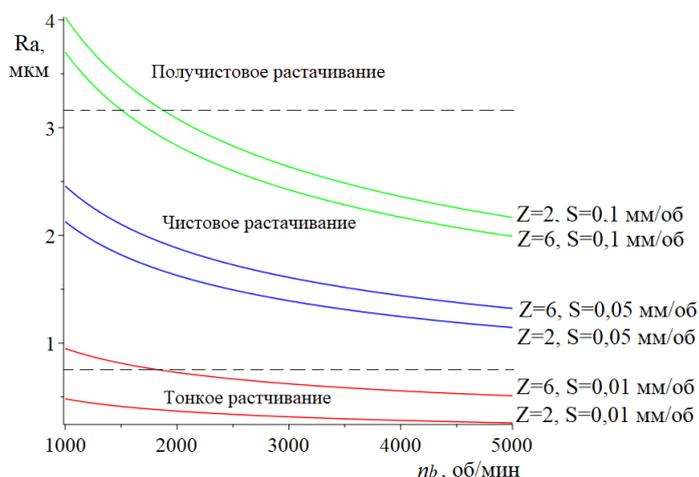


Рисунок 9 - График зависимости величины шероховатости Ra от частоты вращения резового блока n_b при $n_z = 20$ об/мин

В качестве критерия износа был принят размер площадки износа h_3 (рис. 10), значение которого составляло 0,5 мм, так как с дальнейшим увеличением фаски износа повышается шероховатость обработанной поверхности. На рисунке 11

Таким образом, полученные уравнения (7) и (8) позволяют описать закономерности формирования шероховатости получаемой поверхности в процессе вихревого растачивания и могут быть использованы при назначении режимов обработки детали, обеспечивающих величину шероховатости соответствующую виду чистовой обработки.

Так же, в главе приведены результаты исследования износа СМП резового блока по задней поверхности.

представлен график зависимости размера площадки износа по задней поверхности пластины от времени работы при параметрах: $Z = 6$ шт., $n_b = 5000$ об/мин; $n_z = 200$ об/мин, $S = 0,01$ мм/об, материал заготовки – сталь 45.

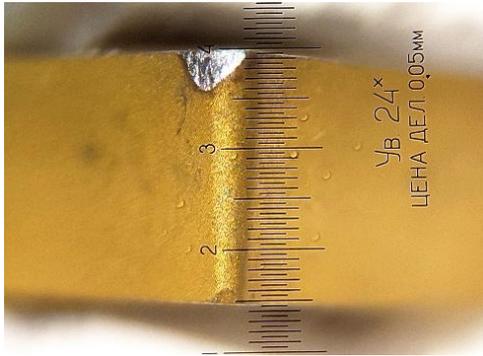


Рисунок 10 – Площадка износа по задней поверхности пластины

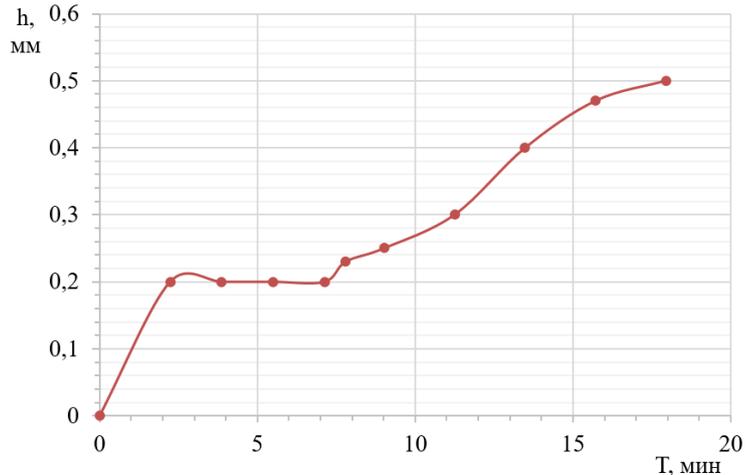


Рисунок 11 – График зависимости износа по задней поверхности пластины от времени работы

На кривой (см. рис. 11) можно выделить участки приработки – интенсивного изнашивания режущей кромки, вступившей в работу, и нормального изнашивания – относительно стабильного функционирования лезвия во времени до достижения заданной величины износа h_3 .

В результате статистической обработки результатов измерений размера площадки износа и математических преобразований получена эмпирическая формула периода стойкости T :

$$T = \frac{6,639 \cdot Z^{0,749} L^{2,554}}{K^{1,977} v^{2,554} S_{ob}^{0,466}} K_2 \quad (9)$$

где $L = 2\pi R_1 + KR_2$, $K = n_b / n_z$, K_2 - коэффициент, учитывающий влияние физико – механических свойств обрабатываемого материала (например, для ст20 $K_2=1,67$, ст35 $K_2=1,47$, ст40Х $K_2=1,23$ и ст45 $K_2=1$). Анализ полученных зависимостей позволил установить режимы вихревого растачивания, обеспечивающие повышение стойкости инструмента.

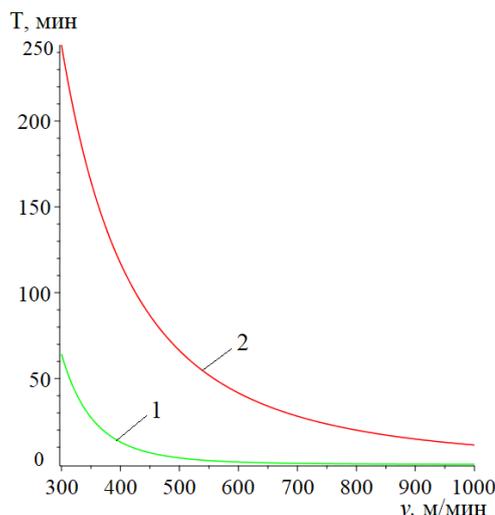


Рисунок 12 – График зависимости периода стойкости от скорости резания: 1) растачивание резцом; 2) вихревое растачивание при $Z = 2$ шт., $n_b / n_z = 50$.

На рисунке 13 приведены некоторые ее образцы, при обработке стали 20 на следующих режимах: $Z = 2$; $S = 0,01$ мм/об; $t = 0,5$ мм.

На рисунке 12 дано сравнение графиков зависимости периода стойкости от скорости резания при чистовом растачивании резцом и при вихревой обработке стали 20, видно, что использование предложенного метода позволит повысить в среднем в 2,5 – 3 раза, при этом $S = 0,01$ мм/об, $t = 0,5$ мм.

В процессе проведения экспериментов был выполнен сбор и анализ полученной стружки. Во всех точках эксперимента стружка сливная размером в 0,5-5 завитков.

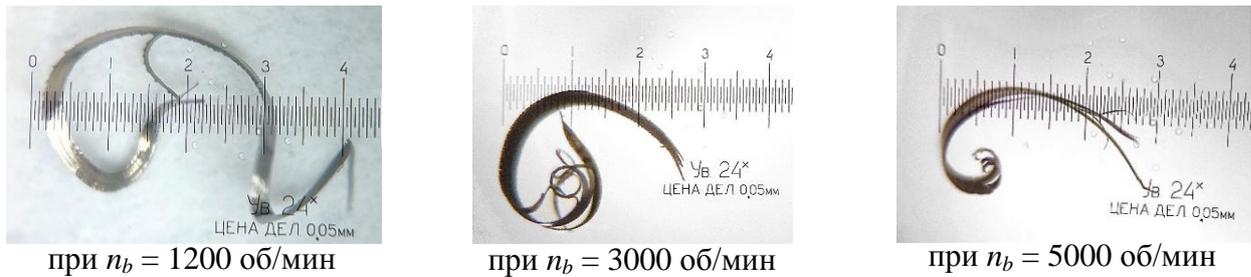


Рисунок 13 – Образцы стружки при обработке заготовок из стали 20

Анализ стружки подтверждает, что применение вихревого растачивания позволяет обеспечить образование отдельной сливной стружки и с увеличением скорости резания длина стружки сокращается, что позволит беспрепятственно удалять ее из зоны обработки.

Пятая глава посвящена разработке модели оптимизации режимов вихревого растачивания крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей вращающимся резцовым блоком по критерию достижения наибольшей производительности и обеспечения заданной шероховатости, требуемого периода стойкости инструмента и температур в зоне резания и на обработанной поверхности заготовки.

Модель имеет целевую функцию

$$S_m \rightarrow \max \quad (10)$$

и ограничения:

- по шероховатости обработанной поверхности

$$Ra_{\min} \leq Ra(S_m, n_z, n_b, Z) \leq Ra_{\max}$$

или

$$Rz_{\min} \leq Rz(S_m, n_z, n_b, Z) \leq Rz_{\max};$$

- по периоду стойкости инструмента

$$T(S_m, n_z, n_b, Z) \geq T_{\text{треб}};$$

- по температуре на обработанной поверхности

$$\theta_{\text{zag}}(S, n_z, n_b, Z) \leq \theta_{\text{zag}}^{\max};$$

- по температуре в зоне резания

$$\theta_{\text{zr}}^{\min} \leq \theta_{\text{zr}}(S_m, n_z, n_b, Z) \leq \theta_{\text{zr}}^{\max},$$

где Ra_{\max} - максимальное значение параметра шероховатости при чистовой обработке; Ra_{\min} - минимальное значение параметра шероховатости при чистовой обработке; Rz_{\max} - максимальное значение максимальной высоты остаточного гребешка шероховатости при чистовой обработке; Rz_{\min} - минимальное значение максимальной высоты остаточного гребешка шероховатости при чистовой обработке; $T_{\text{треб}}$ - требуемое значение периода стойкости; $\theta_{\text{zag}}^{\max}$ - максимальная температура поверхности заготовки; $\theta_{\text{zr}}^{\max}$ - максимальное значение температуры в зоне резания; $\theta_{\text{zr}}^{\min}$ - минимальное значение температуры в зоне резания.

В работе был выполнен анализ областей допустимых значений режимов обработки вихревым растачиванием спроектированным и изготовленным резцовым блоком радиусом $R_2 = 40$ мм, для заготовок радиусом $50 \text{ мм} \leq R_1 \leq 160$ мм, при $2 \text{ шт} \leq Z \leq 6$ шт, $1000 \text{ об/мин} \leq n_b \leq 3000 \text{ об/мин}$, $10 \text{ об/мин} \leq n_z \leq 200 \text{ об/мин}$.

Так, в частности, на рисунке 14 представлена область допустимых значений режимов обработки вихревым резанием заготовки из стали 20 с внутренним ра-

диусом $R_1 = 50$ мм, резцовым блоком радиусом $R_2 = 40$ мм с 2-мя СМП, глубина резания 0,5 мм.

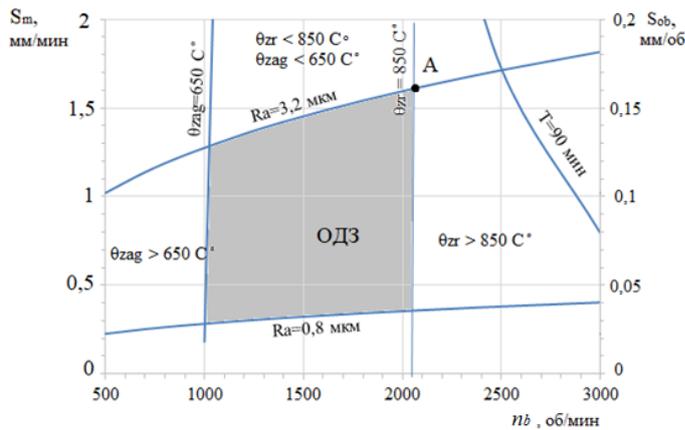


Рисунок 14 - Область допустимых значений режимов обработки заготовок из стали 20, при $n_z = 10$ об/ми

Проведённый анализ построенных областей допустимых значений позволил установить, что оптимальное значение осевой подачи будет определяться точкой на линии пересечения поверхностей функций шероховатости (7), при $Ra = 3,2$ мм и температуры в зоне резания (6), при $\theta_{zr} = 850$ °С, на всем диапазоне исследуемых параметров. Поэтому, для определения экстремума целевой функции (10) необходимо выполнить построение линии пересечения поверхностей шероховатости и температуры в зоне резания в системе координат (S_m, N_z) . На рисунке 15 показана данная линия при обработке заготовки с внутренним радиусом $R_1 = 50$ мм, резцовым блоком радиусом $R_2 = 40$ мм с 2-мя пластинами, глубина резания 0,5 мм.

Из графика видно, что максимальное значение минутной подачи будет соответствовать точке В, что и будет являться решением оптимизационной задачи для данной заготовки. Следовательно, для обработки заготовки с внутренним радиусом $R_1 = 50$ мм, резцовым блоком радиусом $R_2 = 40$ мм с 2-мя пластинами, глубина резания 0,5 мм на модернизированном токарно-винторезном станке 16Б16А оптимальными будут являться следующие режимы $n_b = 1452$ об/мин, $n_z = 80$ об/мин, $S_{ob} = 0,035$ мм/об, $S_m = 2,91$ мм/мин, $T = 167$ мин, $\theta_{zag} = 498$ °С.

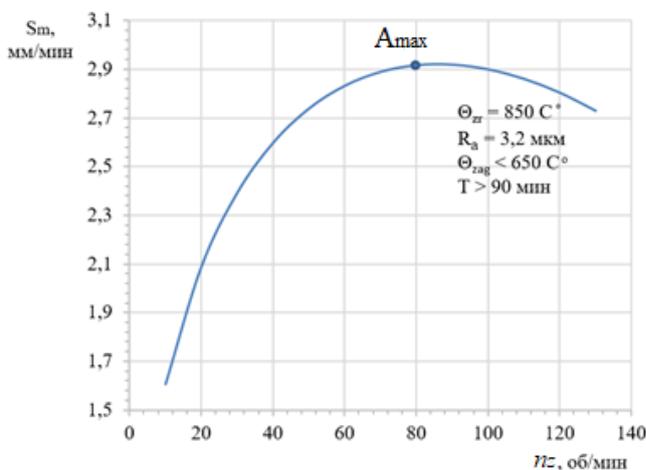


Рисунок 15 – Графики функции определяющей положение точки пересечения кривой шероховатости и кривой температуры в зоне резания в ОДЗ

Из графика видно, что для заготовки с внутренним радиусом $R_1 = 50$ мм и при использовании резцового блока радиусом $R_2 = 40$ мм с 2-мя пластинами, были получены следующие режимы вихревого растачивания (точка А): $n_b = 2045$ об/мин; $S_m = 1,6$ мм/мин. При этом значение шероховатости обработанной поверхности $Ra = 3,2$ мкм, период стойкости инструмента более 90 мин, температура в зоне резания равна $\theta_{zr} = 850$ °С, температура на поверхности заготовки не превышает $\theta_{zag} = 352$ °С.

Таким образом, полученные в ходе экспериментов уравнения, позволяют решить поставленную задачу оптимизации и получить область допустимых значений параметров режимов обработки, повысив эффективность процесса растачивания отверстий диаметров более 100 мм резцовым блоком.

Также в главе приведены практические рекомендации по назначению режимов обработки крупноразмерных отверстий с диаметром более 100 мм в заготовках из стали 20 методом вихревого растачивания двухзубым резцовым блоком диаметром 80 мм для обеспечения шероховато-

сти обработанной поверхности Ra от 0,8 до 3,2 мкм и периода стойкости инструмента не менее 90 мин.

В перспективе планируется исследование возможности применения процесса вихревого растачивания отверстий закалённых заготовок.

Заключение

В диссертации содержится решение научной задачи, снижения тепловой нагрузки на обрабатываемую поверхность детали для исключения структурно-фазовых изменений и на поверхность титано-вольфрамового твердосплавного инструмента посредством обеспечения температуры в зоне резания, соответствующей наилучшим показателям по стойкости инструмента, при чистовой обработке крупноразмерных отверстий, с диаметрами более 80 мм, в заготовках из конструкционных сталей на основе применения метода вихревого растачивания вращающимся резцовым блоком, и имеющей существенное значение в области металлообработки.

В процессе теоретического и экспериментального исследования сделаны выводы и получены следующие результаты:

1. В работе доказана перспективность применения метода вихревого растачивания вращающимся многорезцовым блоком для снижения тепловой нагрузки на обработанную поверхность детали и на поверхности расточного инструмента при чистовой обработке крупноразмерных отверстий при чистовой обработке крупноразмерных отверстий в заготовках из конструкционных сталей.

2. Теоретическое исследование высоты гребешков шероховатости обработанных отверстий, выполненное на основе разработанного метода расчета, показало, что наибольшая величина высоты формируется в осевом направлении и при заданных геометрических параметрах резцов, путем подбора частоты вращения заготовки и осевой подачи, позволяет обеспечить значение шероховатости (Rz_{max}) соответствующее чистовой обработки в диапазоне от 2 до 12,5 мкм.

3. Компьютерное моделирование и расчет изменения температуры в зоне резания и на обработанной поверхности в процессе вихревого растачивания от геометрических параметров инструмента и режимов обработки показал, что: температура в зоне резания варьируется от 700 до 1150 °С во всём исследуемом диапазоне числа зубьев и режимов обработки, это позволит обеспечить температуру резания, соответствующую высоким стойкостным показателям инструмента, с точки зрения обрабатываемого и режущего материалов; увеличение частоты вращения резцового блока от 1000 до 5000 об/мин позволяет уменьшить температуру на поверхности заготовки до 140 °С, это позволит исключить структурно-фазовые изменения на обработанной поверхности детали.

4. Оценка сил резания, выполненная по результатам компьютерного моделирования процесса вихревого растачивания, показала, что, с учетом жесткости системы СПИД, величина погрешности формы обрабатываемых отверстий не превышает величины соответствующей виду чистового растачивания.

5. Выполненное экспериментальное исследование шероховатости в диапазоне чисел зубьев резцового блока от 2 до 6, подачи на оборот от 0,01 до 0,1 мм/об, частоты вращения заготовки от 20 до 200 об/мин, частоты вращения блока от 1000 до 5000 об/мин позволило установить зависимости для параметров шероховатости Ra , Rz и периода стойкости вращающегося резцового блока. Анализ стружки подтвердил, что применение вихревого растачивания позволяет обеспечить образование отдельной сливной стружки и с увеличением скорости резания сокращается длина стружки и количество её завитков.

6. Оценка стойкости, с использованием, установленных в работе зависимостей, показала, что для вращающегося резцового блока при чистовом вихревом растачивании отверстий величина периода стойкости в диапазоне скоростей резания от 300 до 1000 м/мин будет выше, чем и при обычном растачивании одним резцом, в частности, при обработке крупноразмерных отверстий в заготовках из стали 20 выше в 2-2,5 раза.

7. Анализ разработанной модели оптимизации режимов чистового вихревого растачивания отверстий в заготовках из конструкционных сталей и конструктивных параметров резцового блока, для достижения наибольшей производительности обработки, позволил установить, что максимальное значение минутной подачи (в частности для стали 20 при $T > 90$ мин) будет соответствовать точке экстремума на линии пересечения поверхностей функций ограничений по требуемой шероховатости (Ra) и температуры в зоне резания ($\theta_{zr} = 850$ °С). При этом температура на поверхности заготовки не будет превышать 400 °С, что позволяет избежать структурно-фазовых изменений материала детали.

8. Результаты проведенных исследований приняты к промышленному применению на предприятиях ООО «ЗБТ» г. Санкт-Петербург и ООО «ЕвроТранс-Сервис» г. Санкт-Петербург, ООО «СЗМЗ» г. Тихвин.

Научные и практические результаты диссертации рекомендуется применять при технологической подготовке производства гильз из конструкционной стали с диаметром отверстий более 100 мм.

Дальнейшие перспективы исследований связаны с разработкой и исследованием процесса вихревого растачивания закалённых заготовок вращающимся резцовым блоком, оснащённым СМП из кубического нитрида бора.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах из перечня ВАК:

1. Экспериментальное исследование шероховатости обработанной поверхности при вихревом растачивании / В.В. Куц, Т.А. Толмачева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 495-501.

2. Куц, В. В. Исследование глубины прогрева гильз гидроцилиндров при несоосном растачивании вращающимся резцовым блоком / В. В. Куц, Т. А. Толмачева // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 10. – С. 80-84.

3. Куц, В. В. Построение пространственной модели остаточного слоя при полигональном растачивании тонкостенных деталей / В. В. Куц, Т. А. Толмачева // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16, № 3. – С. 95-100.

В изданиях Scopus

1. Tolmacheva, T. A. Reducing the Heat Load on the Workpiece When Boring Holes with a Rotating Tool Block / T. A. Tolmacheva, V. V. Kuts, S. A. Mikhailova // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021) : ICIE: International Conference on Industrial Engineering, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Vol. 2. – Челябинск: Springer, 2022. – P. 518-524.

2. Tolmacheva, T. A. Construction of a Regression Model of the Height of Residual Scallops When Boring Internal Holes with a Rotating Tool Block Based on the Results of Virtual Modeling / T. A. Tolmacheva, V. V. Kuts, Y. A. Malneva // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021) : ICIE:

International Conference on Industrial Engineering, Sochi, 17–21 мая 2021 года. Vol. 2. – Челябинск: Springer, 2022. – P. 541-547.

3. Tolmacheva, T. A. Improving Productivity of Misaligned Boring of Hydraulic Cylinder Holes with a Rotating Cutter Block Based on Computer Simulation Results / T. A. Tolmacheva, V. V. Kuts, Y. A. Malneva // Key Engineering Materials. – 2022. – Vol. 910 KEM. – P. 150-155.

В изданиях РИНЦ

1. Куц, В. В. Исследование износа задней поверхности пластины режцового блока в процессе вихревого растачивания отверстий / В. В. Куц, Т. А. Толмачева, В. В. Золотарев // Современные технологии производства в машиностроении : Межвузовский сборник научных трудов. Том Выпуск 16. – Воронеж : Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2023. – С. 88-92.

2. Куц, В. В. Оптимизация процесса вихревого растачивания заготовок из конструкционных сталей / В. В. Куц, Т. А. Толмачева, Ю.А. Мальнева, А.Г. Хмелевская // Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества». 19-20 октября 2023 г.: сборник докладов. – Тула: Изд – во ТулГУ, 2023. – С. 115-120.

3. Толмачева, Т. А. Исследование температуры в зоне резания и на поверхности обработанной детали в процессе вихревого растачивания / Т. А. Толмачева, В. В. Куц // Технологическое обеспечение и повышение качества изделий машиностроения и авиакосмической отрасли: сборник научных статей 14-ой международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию Брянской научной школы технологов-машиностроителей, Брянск, 05–07 октября 2022 года. – Брянск: Брянский государственный технический университет, 2022. – С. 124-128.

4. Толмачева, Т. А. Оптимизация процесса обработки гильз гидроцилиндров методом вихревого растачивания / Т. А. Толмачева // МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материальные заготовки в машиностроении : сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 24–26 мая 2022 года. – Москва: Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2022. – С. 351-355.

5. Патенты и свидетельства на программы

1. Свид. 2023661445 Российская Федерация. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ. Расчет параметров процесса вихревого растачивания отверстий / В.В. Куц, Т.А. Толмачева, Ю.А. Мальнева; заявитель и правообладатель ЮЗ ГУ (RU). – №2023660822; заявл. 29.05.23.; опубл. 31.05.23, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.

Подписано в печать __. __. 2023

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага офсетная.

Цифровая печать. Усл. Печ. л. 1,23 Тираж 100 экз. Заказ

Юго-Западный государственный университет

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94