

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

На правах рукописи

Нгуен Ван Дао



ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ТИПА
«ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ» ИЗ СТАЛЕЙ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ
ЛОКАЛЬНОГО КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Максаров В.В.

Санкт-Петербург – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА	14
1.1 Нержавеющие аустенитные стали и их применение в нефтегазовой промышленности	14
1.2 Методы механической обработки труднообрабатываемых материалов	18
1.3 Методы и способы механической обработки резанием деталей типа «тел вращения» с дроблением стружки.....	33
1.4 Варианты решения осуществляющих проблем при механической обработке деталей из сталей аустенитного класса.....	40
1.5 Выводы по Главе 1 и постановка задач	46
ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ» ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЛОКАЛЬНОГО КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	49
2.1 Формирование метастабильной структуры в поверхностном слое сталей при локальном криогенном воздействии	50
2.2 Метод предварительной подготовки обрабатываемой поверхности заготовки на основе локального криогенного воздействия	60
2.3 Исследование влияния режимов криогенного воздействия на геометрические размеры зоны с метастабильной структурой	62
2.4 Способ механической обработке деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе предварительного локального криогенного воздействия.....	67
2.5 Кинематика процесса механической обработки аустенитной стали на основе предварительного локального криогенного воздействия.....	70
2.6 Выводы по Главе 2.....	74

ГЛАВА 3 ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТСМО ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ» ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ.....	75
3.1 Построение математической модели эквивалентной технологической системы механической обработки деталей типа «тел вращения»	77
3.2 Составление системы уравнений движения эквивалентной технологической системы механической обработки деталей типа «тел вращения» с учетом процесса стружкообразования	87
3.3 Моделирование динамических характеристик ТСМО при обработке деталей типа «тел вращения» с локальным криогенным воздействием.....	94
3.4 Исследования влияния параметров упрочненной зоны с мелкозернистой структурой на процесс динамической устойчивости ТСМО деталей типа «тел вращения»	98
3.5 Выводы по Главе 3.....	100
ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ЛОКАЛЬНОГО КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ»	103
4.1 Методика проведения экспериментальных исследований при механической обработке деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия	103
4.2 Планирование эксперимента и разработка математических моделей при механической обработке деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия	107
4.3 Экспериментальные исследования влияния технологических параметров способа механической обработки на основе локального криогенного воздействия на шероховатость поверхности.....	112
4.4 Визуальная оценка состояния стружек, обращающихся при механической обработке деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия	118

4.5 Совершенствование технологического процесса механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.....	119
4.5 Выводы по Главе 4.....	122
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	124
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	126
ПРИЛОЖЕНИЯ А Планирование экспериментального исследования и его результаты.....	138
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Технические характеристики станка, приборов.....	140
ПРИЛОЖЕНИЕ В Патент на способ механической обработки стальной заготовки аустенитного класса с дроблением стружки.....	144
ПРИЛОЖЕНИЕ Г Акт о промышленном внедрении результатов диссертации	146

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

В современной машиностроительной промышленности, особенно в нефтегазовой, в настоящее время широко применяются изделия из сталей аустенитного класса благодаря своим особым эксплуатационным свойствам, таким как способность выдерживать механические нагрузки и высокие температуры. Они обладают превосходной коррозионной стойкостью, поэтому могут работать в высокоагрессивных средах, таких как среды, содержащие кислоты, морскую воду и другие агрессивные промышленные химические жидкости, а также используются для изготовления компонентов трубопроводных систем, клапанов, теплообменников и сосудов под давлением.

Значимое преимущество аустенитной стали заключается в том, что ее кристаллическая структура аустенит (гамма-фаза) имеет гранцентрированную кубическую кристаллическую решетку в широком диапазоне температур. Такая структура способствует сохранению прочности и вязкости при чрезвычайно высоких или низких температурах, что особенно полезно в тех случаях, когда требуется стабильность под большим давлением и в суровых условиях работы. Поэтому аустенитная сталь приоритетна для использования в областях, требующих строгой безопасности и производительности, таких как морская добыча нефти и газа.

Типичные аустенитные нержавеющие стали это легированные стали, содержащие кроме железа хром от 16 до 26%, никель от 9 до 22%, и небольшое количество других элементов, таких как углерод, марганец, молибден и медь. Одной из наиболее распространенных аустенитных сталей является сталь 08X18H10T, известная в мировой практике как сталь типа 18-10. Именно высокий процент никеля обеспечивает стабилизацию аустенита в хромоникелевых сталях, высокую пластичность и низкотемпературную ударную вязкость и предотвращает образование магнитных фаз, в то время как хром обеспечивает устойчивость стали к окислительной среде. При совместном действии никеля, молибдена и меди хром повышает устойчивость стали к органической кислоте, мочеvine и щелочным

средам; хром также улучшает устойчивость стали к межкристаллитной коррозии, и работе в тяжело нагруженных условиях.

Однако механическая обработка коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса сталкивается со многими трудностями, обусловленными высокой пластичностью и вязкостью стали, склонностью к ее упрочнению при деформации и образованию сливной стружки. Из-за низкой теплопроводности аустенитных сталей происходит также повышение температуры в зоне резания, что сопровождается повышенной адгезией стали с инструментом, налипанием ее на режущий клин и возникновению неравномерных вибраций. Все это приводит к высоким нагрузкам (силам резания) и ускоренному износу и разрушению инструмента, а также к ухудшению качества поверхностного слоя деталей. Для устранения этих недостатков приходится снижать скорость резания, что приводит к снижению производительности процесса. Плохая обрабатываемость аустенитных нержавеющей сталь предъявляет повышенные требования к применяемому инструменту и жесткости оборудования, вызывает необходимость использования смазочно-охлаждающей жидкости и стружкодробления. При этом чрезвычайно важной задачей является обеспечение качества при механической обработке аустенитной стали.

Экспериментально было установлено, что традиционные методы не удовлетворяют предъявляемым требованиям. В настоящее время наиболее эффективным методом является обработка изделий с криогенным воздействием, так как позволяет обеспечить качество эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» при обработке изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

Степень разработанности темы исследования

Значительный вклад в изучение вопроса увеличения эффективности при механической обработке труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках внесли работы Бармина Б.П., Грановского Г.И., Жаркова И.Г., Подураева В.Н., Чечулина Б.Б., Исаева А.В. и других отечественных ученых, а также исследования зарубежных ученых, которые занимались вопросом обработки

труднообрабатываемых материалов, в том числе аустенитной стали, такие как: Amresh Kumar, Rajesh Sharma, Santosh Kumar и Prajjawal Verma Yansong Zhang, Huan Xue, Yongchun Li, Xuelin Wang и др.

Методу механической обработки деталей типа «тел вращения» на основе предварительного локального физического воздействия уделяли особое внимание в своих исследованиях Ганзбург Л.Б., Максаров В.В., Тимофеев Д.Ю., Ефимов А.Е., Ванчурин А.Н., и другие.

В развитие криогенной обработки сталей значительный вклад внесли отечественные ученые, такие как Гуляев А.П., Вязников Н.Ф., Положенцев В.С., Воробьев В.Г., Петросян П.П., Минкевича Н.А., Асонова А.Д. и другие.

В настоящее время отсутствует оптимальный метод механической обработки коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса. Традиционные способы создают высокие нагрузки на инструмент и вызывают автоколебания, что увеличивает шероховатость поверхности, износ инструмента и снижает производительность. В связи с этим предлагается способ обеспечения качества поверхностей на основе предварительного локального криогенного воздействия, изучение влияния которого на структуру и свойства материала, процесс резания и автоколебания технологической системы не уделялось достаточного внимания.

Актуальной технологической задачей является проведение дополнительных теоретических и практических исследований, опирающихся на комплексный подход к обеспечению качества поверхностей изделия с применением локального криогенного воздействия.

Объектом исследования является процесс сегментации и дробления стружки при механической обработке деталей типа «тел вращения» сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия.

Предметом исследования является шероховатость поверхностного слоя обрабатываемого материала

Целью исследования является технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» из сталей

аустенитного класса на основе установления закономерностей устойчивого сегментирования и дробления сливной стружки при локальном криогенном воздействии.

Идея исследования заключается в обеспечении качества прецизионных поверхностей деталей типа "тел вращения" из сталей аустенитного класса посредством применения предварительного локального криогенного воздействия на поверхности заготовки для создания зоны с метастабильной структурой по глубине снимаемого припуска, которая при пересечении с режущим инструментом снижает наростообразование и формирует устойчивое сегментирование и равномерное дробление сливной стружки.

Задачи исследования

Для достижения цели исследования необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных, приведенных в литературных источниках, посвященных современному состоянию вопроса технологического обеспечения эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса.

2. Экспериментально определить и проанализировать влияние криогенного воздействия и последующего пластического деформирования на структуру и физико-механические свойства аустенитной стали для технологического обеспечения качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» при обработке изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

3. На основании экспериментальных исследований разработать способ механической обработки деталей типа «тел вращения» с дроблением стружки на основе предварительного локального криогенного воздействия и устройство для его осуществления.

4. Разработать имитационную модель технологической системы, учитывающую влияние технологических режимов механической обработки и микроструктурные изменения в поверхностном слое заготовки созданную

посредством локального криогенного воздействия для оценки динамической устойчивости системы.

5. Установить эмпирические зависимости влияния технологических режимов механической обработки с учётом особенностей локального криогенного воздействия на шероховатость обработанной поверхности.

6. Предложить практические рекомендации по выбору параметров нанесения локального криогенного воздействия и подбору значений технологических режимов обработки, позволяющих обеспечить установленную шероховатость поверхностей изделий.

Научная новизна работы:

1. Установлены закономерности влияния технологических параметров (времени и давления криогенного воздействия, подачи резания, глубины резания и частоты вращения) в процессе механической обработке при применении локального криогенного воздействия на шероховатость обработанной поверхности из коррозионноустойчивых и жаропрочных материалов аустенитного класса.

2. Разработана математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая применение локального криогенного воздействия, позволяющая оценить динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и подтверждающая повышение динамической стабильности изготовления изделий из коррозионноустойчивых и жаропрочных материалов аустенитного класса.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.5.6. Технология машиностроения по пунктам:

4. «Совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска»;

7. «Технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин».

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Установлены эмпирические зависимости, учитывающие показатели времени криогенного воздействия, подачи, частоты вращения шпинделя и глубины резания в процессе механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия, позволяющие оценить степень влияния технологических параметров обработки на шероховатость эксплуатационных поверхностей;

2. Разработан способ механической обработки изделий типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия и устройство для его нанесения (патент на изобретение № 2804202);

3. Определены рациональные режимы процесса механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса с применением локального криогенного воздействия, позволяющие обеспечить шероховатость по параметру среднего арифметического отклонения профиля $R_a = 1,3...1,4$ мкм;

4. Установлено применение способа механической обработки с применением локального криогенного воздействия, способствующее устойчивому сегментированию и равномерному дроблению сливной стружки на сегменты в диапазоне 150...200 мм, снижению величины и периодичности наростообразования, обеспечивая качество эксплуатационных поверхностей с величиной шероховатости $R_a = 1,3...1,4$ мкм;

5. Установлено применение способа механической обработки с применением локального криогенного воздействия, позволяющее сократить количество проводимых операций, в том числе финишную операцию шлифованием;

6. Результаты диссертации прошли апробацию на промышленном предприятии ПК ЦНТУ «Прометей» и внедрены в технологический процесс механической обработки резанием деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса (акт внедрения результатов диссертационных исследований от 02 декабря 2025 г., Приложение Г).

Методология и методы исследования. Проведение исследований базировалось на современных положениях теории резания материалов, научных основах технологии машиностроения, статистических методах исследований и методиках математического моделирования. Экспериментальные исследования проведены на универсальном станке *JET GHB 1340A DRO*. При анализе результатов экспериментов применены статистические методы обработки данных, лабораторное оборудование: микроскоп инвертированный лабораторный *Leica DM ILM HC*, профилометр *Mitutoyo Surftest SJ-210*, виброметр *Pruftechnik Vib Xpert EX*.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный способ механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия, включающий в себя схему осуществления предварительного локального криогенного воздействия на обрабатываемой поверхности и схему обработки, обеспечивает устойчивое сегментирование и дробление сливной стружки на равные отрезки длиной 150...200 мм, а также позволяет удалять наростообразование во время резания, что приводит к уменьшению шероховатости поверхности в диапазоне $R_a = 1,3 \dots 1,4$ мкм.

2. Математическая модель технологической системы механической обработки, учитывающая комбинированное влияние совокупности технологических параметров механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия, позволяет адекватно оценить динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и подтверждает повышение динамической стабильности изготовления изделий из сталей аустенитного класса с заданными параметрами шероховатости $R_a = 1,3 \dots 1,4$ мкм.

3. Установленные регрессионные математические зависимости, учитывающие комбинированное влияние совокупности технологических параметров с локальным криогенным воздействием, позволяют адекватно оценить эффективность варьируемых параметров технологической системы и получить

прогнозируемые значения шероховатости поверхности на всех операциях снимаемого припуска.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена необходимым объемом использованных методов математического планирования эксперимента; проведением лабораторных экспериментов на токарном станке JET GNB 1340A; результатами промышленного опробования на производственных предприятиях», а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациями в рецензируемых журналах.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 2 международных:

1. Всероссийская научно-техническая конференция «От качества инструментов к инструментам качества» (19-20 октября 2023, г. Тула).

2. VII Международная научно-практическая конференция «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация» (26 января 2024 г. Санкт-Петербург).

3. VII Международная научно-практическая конференция «Машиностроение: инновационные аспекты развития» (29 марта 2024, г. Санкт-Петербург).

4. XVII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых с международным участием «Россия молодая» (22-25 апреля 2025, г. Кемерово).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертации; анализе отечественной и зарубежной научной литературы; разработке способа и устройства для механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия; установлении математических зависимостей влияния технологических параметров данного способа на шероховатость поверхности; проведение экспериментальных исследований и создание цифровой модели; подготовке рекомендаций по

назначению технологических параметров для обеспечения качества поверхностей изделия из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

Публикации. Результаты диссертационной работы в достаточной степени освещены в 9 печатных работах (пункты списка литературы № 1, 42 – 44, 49 – 52, 88), в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение (пункт списка литературы № 60, Приложение В).

Структура работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 95 наименований, и 4 приложений. Диссертация изложена на 146 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 27 таблиц.

Благодарности. Автор выражает благодарность декану механико-машиностроительного факультета Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II, доктору технических наук, профессору Максарову Вячеславу Викторовичу за наставничество и помощь, оказанную при работе над диссертацией, а также коллективу кафедры машиностроения.

ГЛАВА 1 ОБОСНОВАНИЕ ПРОБЛЕМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА

1.1 Нержавеющие аустенитные стали и их применение в нефтегазовой промышленности

Нефть является важным стратегическим ресурсом для мировой экономики из-за ее роли в обеспечении энергией и широкого использования в химической и других секторах промышленности. Страны с большими запасами нефти, такие как Саудовская Аравия, Иран, Россия и США, влияют не только на мировой энергетический рынок, но и имеют значительное геополитическое влияние, регулируя добычу и экспорт нефти, оказывая сильное влияние на национальную политику и стратегию. Хотя многие страны стремятся снизить свою зависимость от нефти и перейти на возобновляемые источники энергии, нефть и природный газ будут продолжать играть важную роль в ближайшие десятилетия, оставаясь незаменимыми источниками энергии в современной жизни.

Поэтому нефтегазовая отрасль играет ключевую роль в обеспечении жизненно важной национальной энергетической безопасности и оборонного потенциала, генерирует большие валютные поступления от экспорта и вносит важный вклад в государственный бюджет. Кроме того, эта отрасль также создает миллионы рабочих мест и способствует развитию инфраструктуры и новых технологий. Нефтегазовая промышленность является важным сектором экономики, специализирующимся на добыче, переработке и распределении продуктов нефти и природного газа.

Для обеспечения надежного и эффективного процесса добычи, транспортировки и переработки нефти и газа, в нефтегазовой промышленности требуется применять множество различных типов специализированного оборудования, включающего буровую установку, нефтепроводы (трубопроводы), резервуары, насосы и компрессоры и т.д.

Материалы выбирают для оборудования нефтегазовой промышленности не только из-за их способности выдерживать давление и температуру, но также из-за

их высокой коррозионной стойкости в суровых нефтегазовых средах, особенно в глубоководных районах или на нефтяных месторождениях, содержащих много нефти и газ. Оборудование из неподходящих материалов может быстро выйти из строя, что приведет к образованию отходов и угроз безопасности, что повлияет на эффективность производства, а также на безопасность труда.

Широкое применение в нефтегазовой промышленности находят нержавеющие аустенитные стали, благодаря их особой коррозионной стойкости. Нержавеющая аустенитная сталь представляет собой легированную сталь в основном железе, которая содержит в химическом составе хром (16-22%), никель (6-22%) и другие легирующие добавки, например, марганец, молибден, медь и др. Данный материал содержит аустенит (γ - фаза) в качестве своей первичной кристаллической структуры [38, 71]. Кроме нефтегазового оборудования нержавеющие аустенитные стали широко используются в производстве жаропрочного, химического, пищевого и медицинского оборудования. Они имеют кристаллическую структуру аустенита, которая представляет собой металлическую структуру, стабильную при высоких температурах, немагнитную и обладающую высокой коррозионной стойкостью [9, 22, 38]

Аустенитная сталь обладает следующими характеристиками и физико-химическими свойствами:

1. Хорошая коррозионная стойкость. Аустенитная нержавеющая сталь обладает превосходной коррозионной стойкостью в средах, содержащих морскую воду, кислоты, щелочи и другие химические растворы, благодаря пленке оксида хрома, которая защищает поверхность.

2. Хорошая обрабатываемость и свариваемость. Благодаря своей аустенитной структуре аустенитная нержавеющая сталь легко поддается механической обработке, резке и сварке, что позволяет легко создавать различные формы без потери механических свойств.

3. Хорошая термостойкость. Аустенитная нержавеющая сталь выдерживает температуру до 870-925°C, не ухудшая и не нарушая свою структуру, что позволяет ей хорошо функционировать при высоких температурах.

4. **Немагнитность.** Аустенитная нержавеющая сталь обладает немагнитным свойством, что делает ее пригодной для применения в условиях, требующих низких или немагнитных свойств.

5. **Высокая пластичность и долговечность.** Аустенитная нержавеющая сталь обладает высокой пластичностью, выдерживает большие растягивающие усилия и обладает хорошей ударной вязкостью, что делает ее подходящей для применений, требующих долговечности и стойкости к истиранию.

6. **Химическая стабильность.** Благодаря своему химическому составу аустенитная нержавеющая сталь обладает высокой химической стабильностью, противостоит коррозии в химически агрессивных и окислительных средах [9].

Широкое применение аустенитной нержавеющей сталей различных областях промышленности было обусловлено своими выдающимися эксплуатационными характеристиками. Данный материал востребован в машиностроении, строительстве и архитектуре, фармацевтической и пищевой, высокотехнологичной, а также нефтегазовой отраслях и т.д.

В нефтегазовой отрасли переработка нефти представляет собой процесс, происходящий под землей по трубам высокого давления и собирающий нефть в сепараторах. Затем сырая нефть будет транспортироваться по трубопроводам на нефтеперерабатывающие заводы. Этот процесс относительно сложен и довольно трудоёмок из-за некоторого влияния климатических условий. Требование состоит в том, что машины и трубопроводы должны быть самого высокого качества и долговечны, чтобы процесс мог проходить бесперебойно. Конкретные операции и оборудование включают в себя:

- системы трубопроводов. Аустенитная нержавеющая сталь используется для изготовления нефте- и газопроводов, поскольку она обладает высокой устойчивостью к коррозии в нефтяных средах, природном газе и химических растворах. В частности, эта сталь выдерживает воздействие таких веществ, как H_2S , CO_2 и кислотные соединения, которые могут присутствовать в среде бурения нефтяных скважин.

- буровые установки и горнодобывающее оборудование. Поскольку подводная среда очень агрессивна, аустенитная нержавеющая сталь помогает увеличить долговечность и срок службы оборудования, такого как буровые установки, резервуары, насосы и другие вспомогательные системы.

- очистка газа и отходов. При обработке газа и отходов в нефтегазовой промышленности аустенитная нержавеющая сталь обеспечивает долгосрочную работу и сохраняет свои антикоррозионные свойства в течение длительного периода времени при воздействии химикатов, токсичных газов или высоких температур. температурный режим.

- сосуды под давлением и резервуары для хранения. Сосуды под давлением и резервуары для нефти и газа также изготовлены из нержавеющей стали 304 (аналог 08X18H10), поскольку их можно использовать в средах с высоким давлением.

- клапаны, аксессуары, которые часто подвергаются воздействию многих химикатов и различных типов жидкостей, поскольку их основная функция – закрытие, изменение направления потока и контроль количества жидкости, поэтому нержавеющая аустенитная сталь является наиболее оптимальным материалом для изготовления клапанов и аксессуаров.

- теплообменник – важное устройство в системе фильтрации масла, поэтому материалам изготовления также необходимо уделить пристальное внимание. Если теплообменник изготовлен из нержавеющей стали 304, это принесет некоторые преимущества, такие как: он может предотвратить протекание кислородного процесса, поддерживая способность теплопередачи устройства при высокой производительности по сравнению с некоторыми другими материалами, такими как алюминий и медь не оставляет следов, что значительно облегчает очистку.

Однако, обработка нержавеющей аустенитных сталей сталкивается со многими трудностями, обусловленными высокой пластичностью и вязкостью стали, склонностью к ее упрочнению при деформации и образованию сливной стружки.

Именно низкая теплопроводность аустенитных сталей обуславливает высокую температуру в зоне резания, вызывает повышенное наростообразование у

режущего клина инструмента и изменяет его геометрию. В результате чего ведет к возникновению и развитию неравномерных вибраций в технологической системе.

Способность материала сохранять высокие значения прочности и твердости в условиях пластической деформации приводит к росту сил резания, ускоренному изнашиванию режущего инструмента, повышению вероятности его разрушения, и также снижению качества поверхности обработанного изделия. Причиной возникновения автоколебаний и ухудшения динамической устойчивости технологического процесса является высокая склонность нержавеющей аустенитных сталей к деформационному упрочнению при неравномерной пластичной деформации. Кроме того, значительная пластичность аустенитных сталей затрудняет процесс стружкообразования и эффективного дробления стружки при механической обработке [1, 51].

Для устранения этих недостатков приходится снижать скорость резания, что приводит к снижению производительности процесса. При этом существует важная задача, которой является технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей при механической обработке деталей из коррозионноустойчивых и жаропрочных материалов аустенитного класса.

1.2 Методы механической обработки труднообрабатываемых материалов

Труднообрабатываемые материалы являются материалами, которые трудно поддаются механической обработке. К труднообрабатываемым материалам относятся материалы с высокой твердостью и прочностью, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали и сплавы, а также сплавы титана и других тугоплавких металлов, таких как вольфрам, молибден, ниобий [24, 62]. Высокие эксплуатационные характеристик и особые физико-химические свойства труднообрабатываемые материалы обусловили их широкое применение во многих разных отраслях промышленности.

Изделия, изготовляющиеся из этих материалов, получают значительную повышенную надежность, работоспособность и долговечность. Однако, обработка труднообрабатываемых материалов имеет уникальные особенности, качественно отличающие ее от процесса обработки конструкционных материалов [53].

Основными особенностями процесса механической обработки труднообрабатываемых материалов являются следующие:

- нержавеющие стали, коррозионно-стойкие, жаропрочные стали и сплавы обладают аустенитной структурой, характеризующейся склонностью к наклепу при резании. Технологическими характеристиками этих материалов является низкая теплопроводность, что приводит к высокой концентрации тепла в зоне резания.

- титановые сплавы обладают высокой химической активностью, что приводит к образованию оксидов титана на поверхности при механической обработке. Кроме того, при высоких температурах может происходить диффузия углерода из материала инструмента в обрабатываемый материал, влияющая на поверхностные свойства изделия и долговечность инструмента.

- высокопрочные стали и сплавы часто создают значительные силы резания во время обработки, что приводит к повышению температуры обработки и возможному повреждению режущей кромки инструмента. Эти материалы требуют режущих инструментов с высокой прочностью и хорошей термостойкостью для поддержания производительности обработки.

- тугоплавкие металлы, такие как вольфрам, молибден, ниобий и сплавы на их основе, обладают очень высокой твердостью и износостойким воздействием на режущий инструмент. Однако, они также имеют высокое сродство к углероду, что приводит к диффузии и износу, сокращая срок службы режущего инструмента [62].

Существуют различные способы резания труднообрабатываемых материалов. Механическая обработка в настоящее время по-прежнему остается самым популярным методом резания материалов и составляет около 90-95% всех выполняемых операций по обработке резанием в различные отрасли промышленности.

Механическая обработка – это технологический процесс, в ходе которого с заготовки удаляется определенного снимаемого припуска материала для придания ей заданных геометрических параметров и формы, отвечающих техническим условиям. Широкое распространение данного метода обусловлено рядом

существенных преимуществ, среди которых: универсальность; относительная простота ее эксплуатации; технологическая гибкость; а также низкое удельное энергопотребление при сохранении высокой производительности. Механическая обработка характеризуется высокой устойчивостью эксплуатационных свойств изготавливаемых деталей и обеспечивает возможность получения изделий с различной сложной конфигурацией. Возможное применение различных типов режущего инструмента позволяет реализовывать широкий спектр технологических операций, что обеспечивает требуемую точность геометрических параметров, соблюдение установленных допусков и, как следствие, повышение общего качества выпускаемого изделия [8, 16, 25].

Токарная обработка считается одним из базовых и наиболее распространённых методов механической обработки в обрабатывающих производствах, в первую очередь является неотъемлемой частью машиностроительных процессов. В процессе токарной обработки режим резания (скорость резания, подача, глубина резания), состояние инструмента и материал заготовки прямо влияют на эффективность обработки и рабочие характеристики, производительность и потребление энергии [2, 3, 95]. Поэтому необходимо выбрать наиболее подходящие параметры токарной обработки для повышения эффективности резания, снижения затрат и получения высококачественной продукции. Условия токарной обработки влияют на микроструктуру и механические свойства обрабатываемой поверхности. Надежность непрерывного токарного процесса является существенной потребностью массового производства и автоматических производственных систем. Автоматизированные и массовые производственные системы предъявляют повышенные требования к надёжности и непрерывности при токарной обработке.

Наряду с сильным развитием современной промышленности и появлением новых передовых машин и оборудования, разработка высокопроизводительных методов и способов механической обработки труднообрабатываемых материалов чрезвычайно необходима в области машиностроения. В современном производстве не существует метод механической обработки, который является оптимальным и

может быть эффективно применен ко всем материалам. Методы механической обработки могут включать в себя: традиционное резание, вибрационное, электрохимическое или лазерное резание, каждый из которых имеет определенные особенности и сферу применения, и выбирается в зависимости от таких факторов, как требуемая форма полученных изделий, точность и качество поверхности, а также экономическая эффективность процесса обработки, и общая производительность [2, 29]. Правильный выбор метода обработки позволяет снизить затраты, повысить производительность и обеспечить качество изделий. В то же время условия резания, такие как скорость резания, глубина резания и другие технические факторы, должны быть оптимизированы, чтобы процесс обработки происходил эффективно, быстро и с минимальными затратами ресурсов [5, 6, 39].

Требование к высокому качеству поверхности и повышенной производительности возникает из-за строгих требований, предъявляемых в последнее время к точным и сложным операциям [73].

Качеством поверхностного слоя является обеспечение основных характеристик изделия, таких как: микротвёрдость, шероховатость поверхности, уровень остаточных напряжений и микроструктуру, которые непосредственно определяются режимом резания и условиями процесса механической обработки. В связи с этим, состояние рабочих поверхностей, полученных при процессе резания, служит одним из основных критериев для комплексной оценки качества готовых изделий.

При этом управление и улучшение качества поверхностного слоя детали при механической обработке служит важной задачей для специалистов машиностроительной промышленности в настоящее время. Показатели состояния поверхностного слоя, в частности, параметры шероховатости и величина остаточных напряжений, относятся к числу наиболее значимых факторов, определяющих коррозионную стойкость и усталостную долговечность машиностроительных деталей [64, 72]. Формируемые в процессе обработки свойства поверхностного слоя оказывают непосредственное влияние на срок службы режущего инструмента и их способность противостоять коррозионному

разрушению в условиях эксплуатации. Параметр шероховатости, получаемый при финишной операции технологического процесса, является одним из ключевых факторов, определяющих эксплуатационные свойства деталей. Он существенно влияет на уровень усталостной прочности и износостойкости, коэффициент трения, условия смазывания, коррозионную стойкость, и т.д. [68]. Стандартным и общепринятым методом её количественной оценки служит параметр среднего арифметического отклонения профиля R_a . Формирование шероховатости является следствием ряда технологических факторов, к которым относят вибрации оборудования, следы подачи режущего инструмента и процессы наростообразования на его кромках. Все эти факторы могут привести к сокращению срока службы режущего инструмента и увеличению стоимости изделий. Таким образом, улучшение целостности поверхности и контроль шероховатости являются важными аспектами в технологической системе механической обработки, что требует тщательного выбора технологических параметров для достижения необходимых требований качества [64, 68].

Обработка труднообрабатываемых материалов часто сопровождается развитием вибраций, что связано с недостаточной динамической жёсткостью отдельных элементов технологической системы. Вибрационные явления, возникающие в процессе механической обработки, в общем случае подразделяются на две основные группы: вынужденные вибрации и автоколебания. Наличие вибрационных явлений оказывает негативное влияние как на качество формируемого поверхностного слоя изделия, так и на производительность технологического процесса в целом. Вынужденные вибрации при механической обработке, как правило, обусловлены периодическими внешними воздействиями, связанными с резонансными явлениями в упругой системе «станок – приспособление – инструмент – деталь», и при периодическом воздействии неравномерного движения каждого элемента/подсистемы технологической системы. В отличие от вынужденных колебаний, автоколебания формируются и поддерживаются непосредственно в процессе механической обработки вследствие наличия динамической обратной связи. К основным факторам, вызывающим их

возникновение, относят: нестационарный характер силы трения на контактных поверхностях режущего инструмента (передней и задней); изменение пластических свойств обрабатываемого материала, сопровождающееся изменением сил резания; процесс наростообразования; а также упругую деформацию режущего инструмента и обрабатываемой заготовки [31, 32].

Наростообразование представляет собой адгезионное отложение сильного деформированного материала заготовки, которое формируется и налипает на режущий клин режущего инструмента при процессе резания, что вызывает изменение его исходной конфигурации и размеры и приводит к изменению условия резания [34]. Твердость материала при наростообразовании может превышать твердость как материала заготовки, так и материала режущего инструмента, следовательно, наростообразование в данном случае может служить как для новой режущей кромки. Это явление приводит к увеличению эффективного переднего угла, что в определенных условиях может благоприятствовать процессу стружкообразования и выполнять временную защитную функцию от износа у режущего инструмента. Тем не менее, при выполнении финишных операций чистовой обработки наличие наростообразования является нежелательным, так как оно ухудшает качество поверхностного слоя (повышает параметр шероховатости) и точность формы, а также приводит к уменьшению стойкости режущего инструмента. Нарост может либо частично, либо полностью отделяться от режущего клина инструмента при его достижении к пределу прочности. Следовательно, он попадает в зону между обработанной поверхностью заготовки и задней поверхностью режущего инструмента, что приводит к повреждению и интенсивному износу поверхностей инструмента, в результате происходит ускоренный выход его из строя [34].

Практика механической обработки труднообрабатываемых материалов показывает, что одной из наиболее сложных задач является управление процессом стружкообразования. Для эффективного изучения процесса стружкообразования необходимо учитывать совокупность различных физических явлений, сопровождающих процесс механической обработки, включая величину характер

изменения силы резания, износ режущего инструмента, а также структурные изменения и разупрочнение обрабатываемого материала. В процессе механической обработки сила трения оказывает влияние на форму образующейся стружки. В свою очередь, особенности стружкообразования сказываются на параметрах качества поверхности и точности обработки деталей. В зависимости от физических свойств исходного материала, режимов резания и особенностей процесса пластической деформации срезаемого слоя образующаяся стружка имеет различные формы, к которым относят суставчатую, сливную, элементную и стружку надлома.

Процесс стружкообразования определяется совокупностью взаимосвязанных факторов, к числу которых относятся физико-механические свойства обрабатываемого материала, геометрические параметры режущего инструмента, тепловые условия в зоне резания, установка технологической системы «станка – заготовки – инструмента – приспособление», а также выбранные режимы резания. Варьирование указанных параметров приводит к существенным изменениям формы, размеров и характера стружки, образующейся в процессе обработки. Механизм стружкообразования связан обусловлен процессом отделения слоя материала в зоне сдвига, которая простирается от вершины режущей кромки инструмента по плоскости сдвига под определённым углом φ по отношению к поверхности обрабатываемой заготовки [11, 13, 19].

При работе на станках с числовым программным управлением особенно актуальной проблемой становится стружкообразование, которая может оказывать влияние на качество поверхностного слоя обрабатываемой заготовки. В процессе резания образующаяся стружка в виде стальной ленты, нагретой до высоких температур и перемещающейся с высокой скоростью, возможно попадать как на главную, так и на вспомогательную режущие кромки инструмента, а также на поверхность заготовки, что снижает качество обработки и увеличивает износ режущего инструмента.

Стружкообразование является одной из основных проблем, проявляющихся в процессе чистовой и получистовой операций механической обработки с

варьируемой глубиной резания, особенно в условиях токарной обработки ковких сталей и жаропрочных сплавов. При высоких температурах и значительных давлениях процесс резания становится неустойчивым, что приводит к значительной деформации поверхности заготовки, увеличению длины контакта между инструментом и стружкой, усложнению процесса разрушения стружки и повышенной вероятности её наматывания на инструмент [13]. Большинство пластин имеют геометрию стружколомы для удаления стружки в процессе токарной обработки. Образование ленточной, запутанной и плоской спиральной стружки может вызвать значительные проблемы со стружкодроблением. На станках с ЧПУ особой проблемой является стружкообразование при процессе механической обработки материалов, в том числе коррозионностойких, жаропрочных и титановых сталей и сплавов. Когда процесс резания нестабилен, высокая температура и давление могут привести к серьезной деформации поверхности заготовки, увеличению длины контакта между инструментом и стружкой, что затрудняет сегментирование и дробление стружки. Кроме того, неблагоприятные формы стружки не только влияют на качество поверхности полученных изделий и срок службы режущего инструмента, но также подвергают опасности рабочих, снижает эффективность производства и увеличивает потребление энергии.

К специальным труднообрабатываемым материалам относятся коррозионностойкие, жаропрочные, аустенитные и титановые стали и сплавы и т.д. Форма образующейся стружки определяется выбранными режимными параметрами резания и физико-механическими свойствами обрабатываемого материала. Обладая высокой пластичностью, стружка, образующаяся в процессе обработки материалов аустенитного класса, получает сливную форму, которая определяет показатели устойчивости технологической системы, способствует достижению заданного качества получаемого изделия и обеспечивает длительный срок службы режущего инструмента. Как на практике показано, что образование сливной стружки соответствует ограниченному диапазону состояния технологической системы, и не всегда совпадает с соответствующими режимами

резания и стойкостью инструмента с целью обеспечения требуемой производительности процесса. Стружкообразование в процессе механической обработки оказывает существенное влияние на безопасность труда и состояние оборудования, а также напрямую связано с качеством обрабатываемых деталей, износом режущего инструмента и расходом энергии, в результате приводит к ухудшению общей эффективности технологического процесса [19]. При этом управление процессом стружкообразования, его формой и размерами не только предупреждает негативные последствия, но и позволяет косвенно оценивать качество поверхности получаемого изделия.

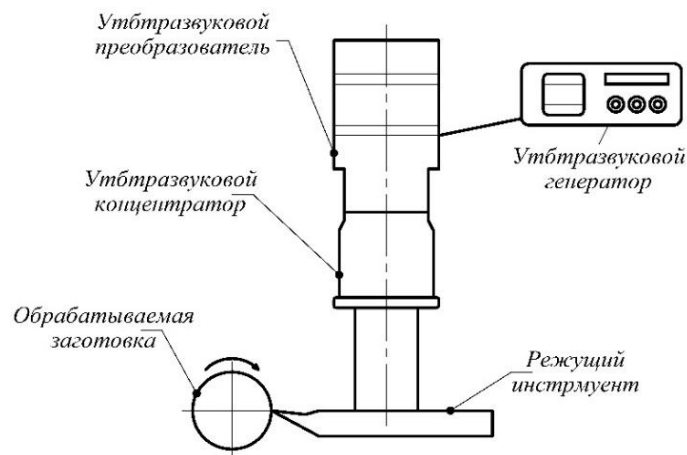
В исследованиях Amresh Kumar, Rajesh Sharma, Santosh Kumar и Prajjawal Verma проанализированы основные проблемы, сопровождающие механическую обработку аустенитной стали марки 08X18H10T. Авторы указывают, низкая теплопроводность данного материала в сочетании с выраженной склонностью к деформационному упрочнению приводит к усложнению условий резания и снижению устойчивости технологического процесса. В работах указанных авторов представлено применение смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ), подаваемых непосредственно в зону резания с целью снижения/удаления тепла, что способствует повышению качества обработки и стойкости режущего инструмента, а также общей производительности процесса обработки аустенитной стали. Целью использования различных СОЖ при механической обработке является не только снижение температуры и сил резания, но и удаление стружки из зоны резания. Использование смазочно-охлаждающих жидкостей способствует увеличению стойкости режущего инструмента и повышению общей производительности процесса обработки. Однако следует учитывать, что в состав подобных жидкостей часто входят вредные химические компоненты, которые могут представлять опасность для здоровья оператора, способствовать загрязнению окружающей среды, а также увеличивать затраты на производство. Результаты различных исследований показали, что обработка, выполненная в режиме минимального количества смазки, показала высокую целостность поверхности и улучшенные характеристики. Кроме того, производительность обработки и целостность

обработанной поверхности могут быть улучшены за счет оптимизации параметров процесса (скорость, подача, глубина резания и т.д.) [76]. Следовательно, оптимизация этих параметров очень важна для уменьшения шероховатости поверхности и износа инструмента чтобы реализовать качественную и высокоэффективную обработку аустенитной нержавеющей стали.

В своих исследованиях Yansong Zhang, Huan Xue, Yongchun Li, Xuelin Wang, Xinli Jiang, Chongwen Yang, Kewei Fang, Wenqian Zhang и Hui Jiang предполагают метод механической обработки нержавеющей аустенитных сталей, который называется многопроходной обработкой. Многопроходная обработка является отличным альтернативным решением для обработки с большим съемом материала и может быть подходящим методом для улучшения целостности обрабатываемой поверхности [93]. Кроме того, были разработаны модели оптимизации многопроходной токарной обработки с целью снижения энергопотребления, высокого качества обработки и высокой эффективности. Однако влияние многопроходной обработки на целостность поверхности нержавеющей сталей изучено недостаточно.

Для решения этой проблемы Yingshuai Xu, Zhihui Wan, Ping Zou и Qinjian Zhang представляют ультразвуковую вибрационную токарную обработку, которая является типичным методом обработки, обеспечивает эффективный подход к высококачественной и высокопроизводительной обработке труднообрабатываемых материалов [94]. Технологическая система ультразвуковой вибрационной токарной обработки состоит из станка, ультразвукового генератора, ультразвукового преобразователя, ультразвукового рупора, системы инструментов и специального приспособления. При механической обработке использовалась система управления токарным станком и станком для обеспечения вращения и движения подачи, необходимых для токарной обработки, а ультразвуковая вибрационная токарная обработка выполнялся путем объединения с ультразвуковой вибрацией, создаваемой системой ультразвуковой вибрации. В ультразвуковой вибрационной токарной обработке к режущему инструменту применяется гармоническое движение с небольшой амплитудой в направлении

скорости резания [15, 63]. При ультразвуковой вибрационной токарной обработке с высокой частотой и низкой амплитудой обеспечится не только качество обработки стальной заготовки но и не происходит деформации материала заготовки из-за предельно малого времени контакта между режущим инструментом и обрабатываемой поверхностью. Результаты исследования показали, что ультразвуковая вибрационная токарная обработка может снизить силу резания и шероховатость поверхности [7]. Структурная схема ультразвуковой колебательной системы представлена на рисунке 1.1.



а



б



в

Рисунок 1.1 – Экспериментальная установка: (а) структурная схема ультразвуковой вибрационной системы, (б) система ультразвуковой вибрационной токарной обработки и (в) система трехмерного отображения сверхглубины резкости типа VHX-1000E [94]

При ультразвуковой вибрационной токарной обработке процесс стружкообразования является важным процессом экструзии, вибрации и резки. При этом режущий инструмент режет материал определенного размера на

заготовке в виде импульсов, чтобы он регулярно вызывал деформацию сдвига и образовывал стружку; стружка также срезается режущим инструментом с небольшими помехами вибрации. Процесс стружкообразования показан на рисунке 1.2.

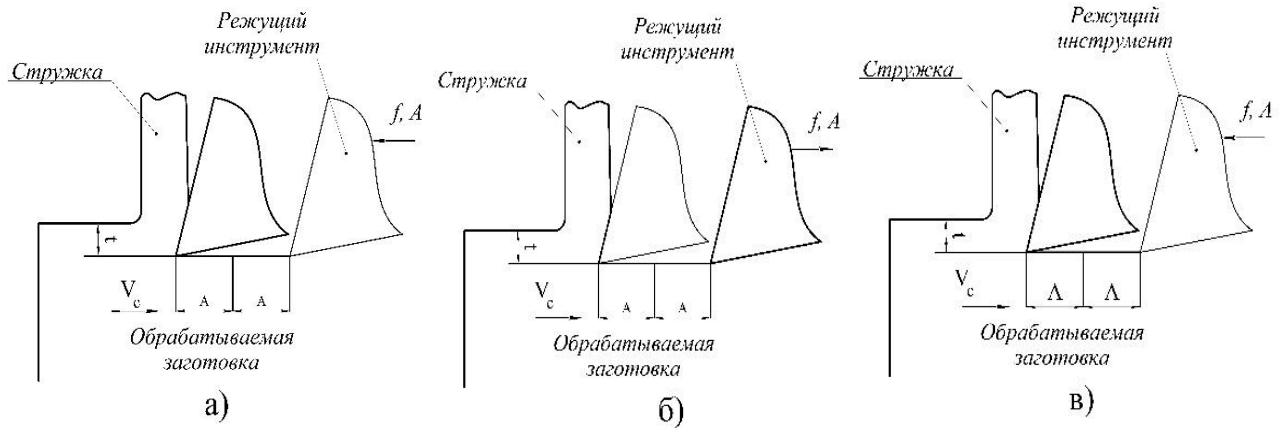


Рисунок 1.2 – Процесс стружкообразования при ультразвуковой вибрационной токарной обработке: (а) контакт, (б) разделение, (в) процесс стружкообразования [94]

В первой зоне деформации стружки происходит интенсивная деформация, что приводит к повышению твердости и снижению пластичности стружки во второй зоне. Стружка становится хрупкой и сталкивается с препятствиями (поверхности инструмента или заготовки). Если значение деформации в определенном месте на стружке превышает значение деформации разрушения материала стружки, и будет автоматически отламываться, как показано на рисунке 1.3. Стружка, образующая при ультразвуковой вибрационной токарной обработке, способствует получению повышенной эффективности обработки. Стружка в основном представляет собой стружку со свободной спиралью, которая имеет относительно меньшую деформацию и больший радиус закручивания. При ультразвуковой вибрационной токарной обработке выбор соответствующих параметров процесса имеет решающее значение для дробления стружки. Параметры резания оказывают значительное влияние на форму стружки. С увеличением скорости резания, глубины резания и подачи степень деформации стружки, увеличивается. Стружка может быть получена без проблем при малых параметрах резания, наоборот, и соответствующая стружка может обеспечить

качества токарной обработки. Ультразвуковая обработка оказалась эффективным способом повышения обрабатываемости и качества резания [15, 40, 61].

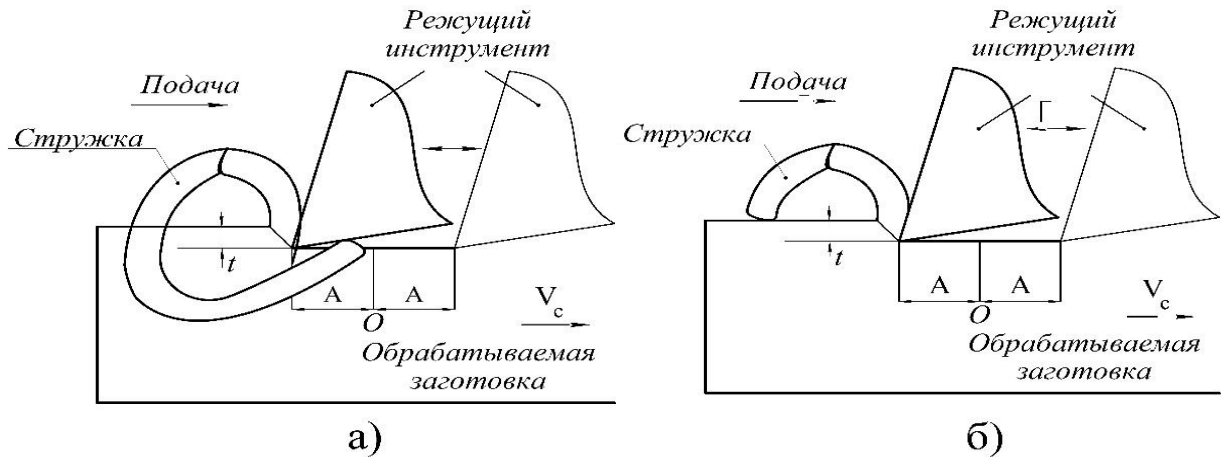


Рисунок 1.3 – Причины дробления стружки: (а) в результате столкновения с режущим инструментом и (б) в результате столкновения с заготовкой [94]

Следующий метод токарной обработки с дроблением стружки, эффективный для обработки труднообрабатываемых материалов, является термической обработкой. Термическая обработка подразделяется на три основных типа: лазерную обработку, индукционную обработку и обработку с использованием плазмы.

Лазерная токарная обработка в последние годы рассматривается как перспективный технологический подход к механической обработке труднообрабатываемых материалов, таких как жаропрочные суперсплавы, керамические, композиционные материалы и др. [21, 26]. Применение данного метода существенно оказывает влияние на процесс обработки и изменять условия формирования поверхностного слоя. В работах Jun-Hwan Kim, Eun-Jung Kim, Choon-Man Lee проведён анализ влияние термического воздействия, а также проведена оценка технологических показателей обработки материалов с применением лазерного и индукционного воздействия. Целью данного исследования является анализ зоны термического влияния, создаваемой лазерными и индукционными источниками тепла в труднообрабатываемых материалах. Зона термического влияния – это область основного материала из металла или термопластичных материалов, зона термического влияния не расплавляется, но

свойства материала и микроструктура могут изменяться при термическом воздействии [84].

Лазерный источник тепла характеризуется высокой концентрацией энергии и осуществляет прямое воздействие излучения на поверхность обрабатываемой заготовки [84]. Путем экспериментов было получено оптимальное расстояние между источником лазерного тепла и режущим инструментом, а влияние на такие характеристики, как износ инструмента и сила резания, было подтверждено путем изменения скорости вращения шпинделя и угла наклона заготовки. Непосредственно перед резанием режущей пластиной при токарной лазерной обработке заготовка подвергается локальному предварительному нагреву лазерным излучением с целью увеличения температуры в зоне резания. При последующем процессе резания пересечение этих зон с плоскостью резания способствует сегментации и дроблению стружки, что значительно повышает надёжность процесса стружкодробления. Такой подход обеспечивает быстрое удаление материала за счёт снижения предела текучести, а уменьшение твёрдости способствует снижению сил резания. Это в свою очередь улучшает качество обработанной поверхности и увеличивает срок службы инструмента за счёт уменьшения его износа [21, 27]. К недостаткам данного метода относится возникновение значительных динамических нагрузок в зоне контакта режущего инструмента с материалом, обусловленных взаимодействием передней и вспомогательной режущих кромок с зоной поверхностного слоя, характеризующейся изменённой метастабильной структурой. В результате чего вызывают снижение стойкости режущего инструмента, формирование на вершине и режущих кромках механических повреждений, усиление вибрационных проявлений и ухудшение параметров шероховатости обработанной поверхности, а также отрицательно оказывают влияние на процесс сегментации и дробления сливной стружки. Кроме того, дополнительным фактором является высокая энергоёмкость лазерного/индукционного воздействия, что приводит к существенному увеличению энергетических затрат технологического процесса.

Кроме лазерной обработки, индукционная обработка также представляет собой один из известных способов термического воздействия за счёт нагрева материалов. Данный метод основан на индукции вихревых токов в материале посредством подачи электрического тока в индукционную катушку. Этот индукционный источник тепла был изучен для пайки, термообработки и нагрева [84]. Принципиальная схема термической обработки и зоны нагрева с использованием лазерного и индукционного источников тепла показана на рисунке 1.4.

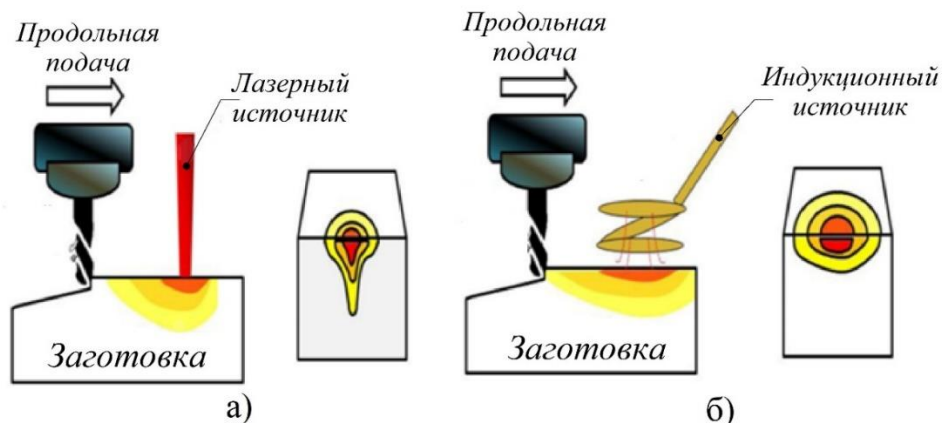


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема термической обработки и зоны нагрева (а) лазерного фрезерования и зоны лазерного нагрева (б) индукционного фрезерования и зоны индукционного нагрева [84]

На рисунке 1.5 показана экспериментальная установка для экспериментов лазерной и индукционной обработки. Несмотря на то, что рассмотренные выше методы обработки позволяют частично преодолеть решенные трудности, проблемы, возникающие в процессе механической обработки аустенитной стали, их производительность и экономность являются не оптимальными. Вместе с тем в процессе обработки этими методами сохраняются значительные силовые воздействия на режущую кромку инструмента, что вызывает уменьшение значения его твёрдости и приводит к сокращению ресурса работоспособности инструмента; а также возникновение вибраций, увеличивающих шероховатость обработанной поверхности. Кроме того, применение лазерного или индукционного источников для нанесения лазерного и индукционного воздействия сопровождается значительными энергетическими затратами.

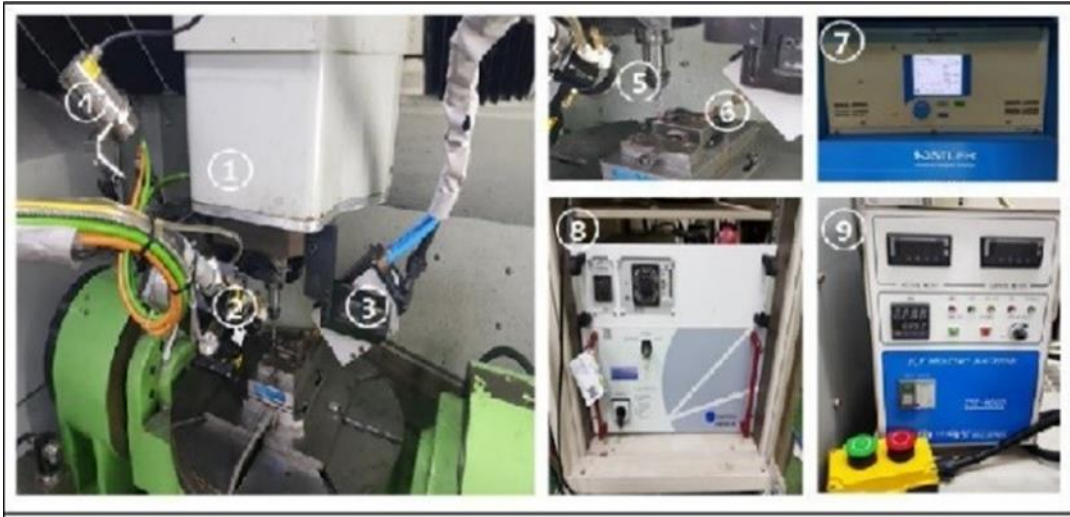


Рисунок 1.5 – Экспериментальная установка, где 1 – 5-осевой обрабатывающий центр, 2 – лазерное устройство, 3 – индукционное устройство, 4 – пирометр, 5 – плоская концевая фреза, 6 – индукционная катушка, 7 – динамометр, 8 – контроллер лазера, 9 – контроллер индукционного нагревателя [84]

1.3 Методы и способы механической обработки резанием деталей типа «тел вращения» с дроблением стружки

Задача сегментирования и дробления стружки в процессе механической обработки материалов имеет важное значение, поскольку напрямую влияет на качество и производительность обработки, а также на безопасность производства, удобство хранения и транспортировки отходов [4; 20]. Для управления стружкообразованием разработан широкий спектр методов, включающих как механические и термические способы, так и использование специализированных стружкодробильных устройств [78]. Эти подходы способствуют уменьшению объёма стружки, облегчая её последующую транспортировку и хранение. Основные подходы включают в себя следующие:

- метод управления процессом стружкодробления на основании непосредственного воздействия, включающий применение вспомогательных ручных устройств/инструментов или стружкоотводчиков для отвода стружки, а также режущих инструментов, оснащённых сменными твердосплавными пластинами, других приспособлений и т.п.;

- метод управления процессом стружкодробления на основании воздействия на режущий инструмент при процессе резания, такие как: применение специальных стружколомающих геометрий режущих пластин; использование вибрационного резания с различными частотными характеристиками (как низко-, так и высокочастотные воздействия) и др.;

- метод предварительного глобального/локального воздействия на обрабатываемую заготовку, например, метод формирования напряжений в поверхностном слое обрабатываемой заготовки за счёт её растяжения, метод физико-химического и механического воздействия [18, 50].

Анализ известных технических решений по сегментированию и дроблению стружки при механической обработке труднообрабатываемых материалов показывает, что существуют многие способы обработки, основывающиеся на предварительном термическом воздействии. Сущность данных способов заключается в локальном изменении структуры и свойств материала заготовки перед началом процесс механической обработки режущим инструментом. Данные способы осуществляются путём механического или термического воздействия, создающего локальную зону, характеристики которой отличаются от характеристик исходного материала. В ряде работ и авторских свидетельств [57 – 59] предложены способы, предусматривающие процесс стружкообразования и стружкодробления за счёт локального нагрева, завивания или ориентации стружки, создания стружкоразделительных канавок с помощью воздействия периодических кратковременных импульсов тока плазматрона, а также предварительного воздействия на обрабатываемую заготовку с целью изменения механических свойств материала при использовании плазматронов, газовых горелок или лазерных источников энергии и т.п.

Был разработан способ дробления стружки, который заключается в её принудительном завивании в спираль заданного диаметра, который не должен превышать зону термического влияния сварочной дуги. Далее сформированная спираль подвергается разрушению за счёт её дополнительной ориентации в направлении, перпендикулярном оси перемещения, с использованием свободно

вращающегося ролика (рисунок 1.6). Существенным недостатком данного подхода является потребность в частой корректировке системы ориентации при каждом изменении режима резания или величины припуска. Это, в свою очередь, требует установки в зону обработки дополнительного технологического оборудования (ролика).

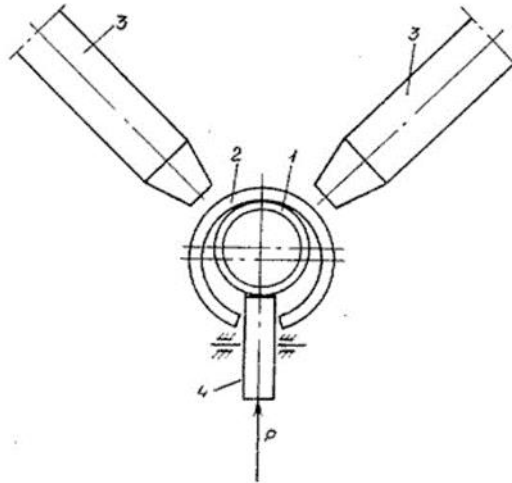


Рисунок 1.6 – Способ дробления стружки с устройством для его реализации, где 1 – стружка, 2 – направляющая трубка, 3 – вольфрамовый электрод, 4 – ролик; Р – сила обеспечения дробления [57-59]

На рисунке 1.7 представлен существующий способ механической обработки, включающий предварительный локальный нагрев заготовки.

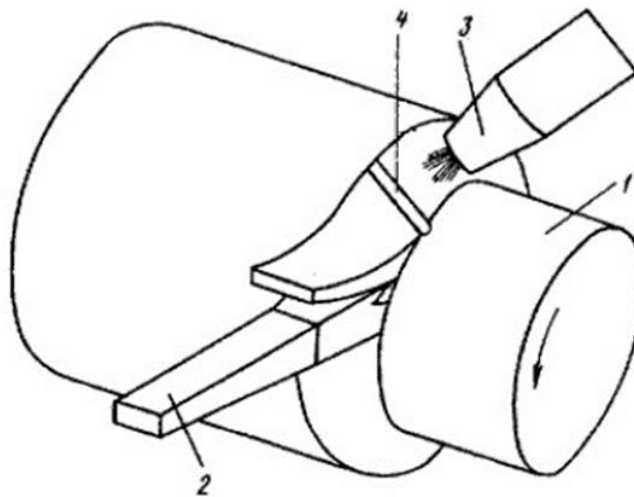


Рисунок 1.7 – Способ механической обработки с подогревом, где 1 – обрабатываемая заготовка, 2 – режущий инструмент, 3 – плазмотрон, 4 – стружкоразделительная канавка [57-59]

Его принцип состоит в формировании на поверхности заготовки стружкоразделительных канавок импульсным плазменным воздействием для

управления процессом образования стружки. К ключевым недостаткам данного способа относятся:

- прохождение режущего инструмента по предварительно созданным канавкам генерирует ударные нагрузки на режущую кромку. Это вызывает повышенные вибрации и сокращает ресурс инструмента.

- необходимость технологического объединения двух операций — нанесения канавок и непосредственно резания — приводит к значительному усложнению процесса.

Существует способ механической обработки, который предусматривает предварительный локальный подогрев материала (рисунок 1.8). С помощью плазматрона на поверхности резания перед инструментом формируются канавки, при этом металл в зоне воздействия разогревается до температуры, существенно меняющей его механические свойства.

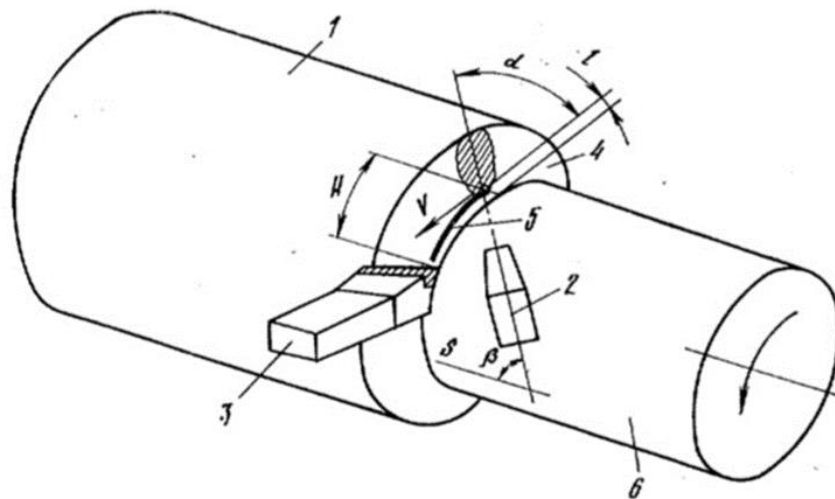


Рисунок 1.8 – Способ механической обработки с подогревом, где 1 – обрабатываемая заготовка, 2 – плазматрон, 3 – резец, 4 – плоскость резания, 5 – образующаяся канавка, 6 – обработанная поверхность [57-59]

Последующее удаление этого разогретого слоя выполняется обычным резцом. Основными недостатками способа являются:

- значительная энергоёмкость технологического процесса, что напрямую связано с использованием плазменного нагрева.

- узкая область эффективного применения. Метод демонстрирует удовлетворительное дробление стружки преимущественно при обдирочных (черновых) операциях, таких как обработка литых или кованных заготовок.

Известен способ обработки труднообрабатываемых материалов с локальным подогревом срезаемого слоя до температур, превышающих точку рекристаллизации металла (рисунок 1.9). Основной недостаток способа – интенсивный износ режущей кромки инструмента. Это вызвано совокупностью двух факторов:

- совместное тепловое воздействие: Температура в зоне резания резко возрастает из-за одновременного протекания процесса резания и дополнительного предварительного нагрева.

- изменение свойств материала: Такое сочетание приводит к повышению вязкости обрабатываемого металла, что, в свою очередь, нарушает процесс равномерного сегментирования и дробления образующейся сливной стружки, усиливая нагрузку на инструмент.

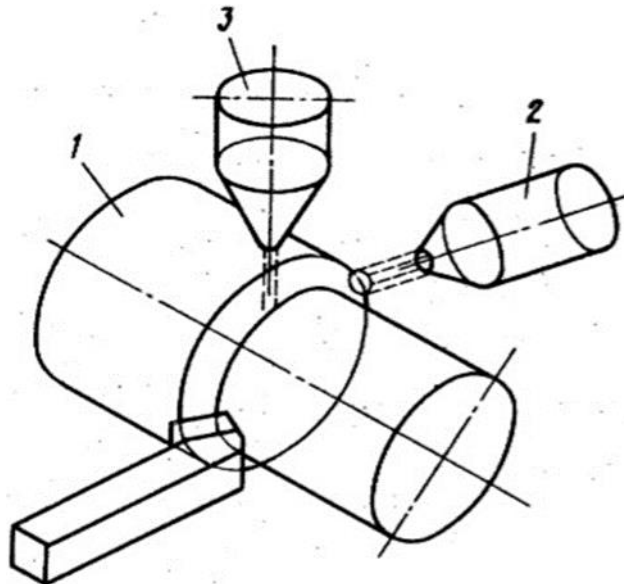


Рисунок 1.9 – Способ механической обработки заготовок из труднообрабатываемых сталей с нагревом срезаемого слоя, где 1 – заготовка, 2 – плазмотрон, 3 – устройство для подачи охлаждающей среды [57 – 59]

Известен способ дробления стружки, основанный на предварительном нагреве поверхности заготовки пламенем газовой горелки, ось факела которой ориентирована по касательной к обрабатываемой поверхности (рисунок 1.10).

Такое расположение обеспечивает безударное врезание режущего инструмента, так как его главная режущая кромка проходит параллельно зоне локального нагрева. Это способствует изменению упругих свойств материала и последующему дроблению стружки.

Ключевые недостатки способа:

- низкая производительность термической стадии. Процесс характеризуется длительным нагревом поверхностного слоя и невысокой скоростью последующего охлаждения.

- неравномерность структуры и последствия. В результате такого теплового режима в зоне воздействия формируется неоднородная структура материала. Это приводит к возникновению периодических ударных нагрузок на инструмент в процессе резания, ускоренному износу режущей кромки и снижению общей надёжности процесса стружкодробления.

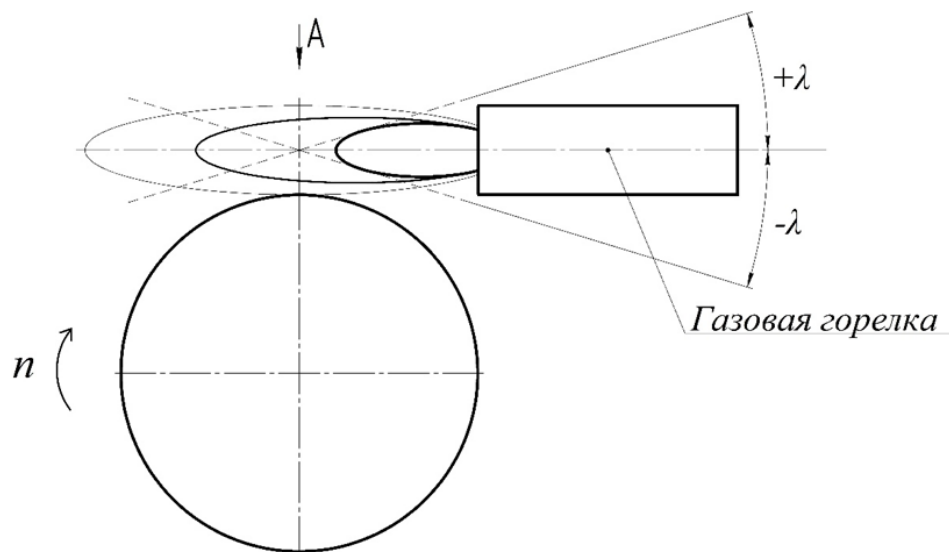


Рисунок 1.10 – Способ дробления стружки на предварительном нагреве поверхности заготовки пламенем газовой горелки [55]

Существует способ лазерно-механической обработки, который обладает целью повышение точности и расширение технологических возможностей. Его суть заключается в локальном нагреве заготовки лазерным излучением с последующим охлаждением, при этом глубина лазерного воздействия рассчитывается с учётом глубины резания и допустимого дефектного слоя. Ключевым недостатком метода является склонность инструмента к выкрашиванию

режущей кромки. Это вызвано ударными нагрузками, возникающими при контакте резца с упрочнённым слоем микротвёрдостью около 165 кг/мм^2 , который формируется в результате лазерного воздействия. Данное явление делает недостижимой целевую задачу метода – уменьшение шероховатости обработанной поверхности (R_a) в 2,5 раза.

Был разработан способ обработки стальных заготовок с дроблением стружки на основании использования предварительного лазерного нагрева. Непрерывный луч, ориентированный под углом $75^\circ\text{--}80^\circ$ к поверхности, движется по прямой, формируя сфокусированное пятно (рисунок 1.11). Его параметры (диаметр, скорость, мощность, длина волны) подбираются для достижения заданной плотности мощности, что обеспечивает фазовые превращения в материале на глубину, соответствующую припуску. В результате в зоне воздействия создаётся метастабильная область с изменёнными упругими свойствами. При пересечении этой области плоскостью резания происходит сегментирование и дробление стружки, повышая надёжность процесса.

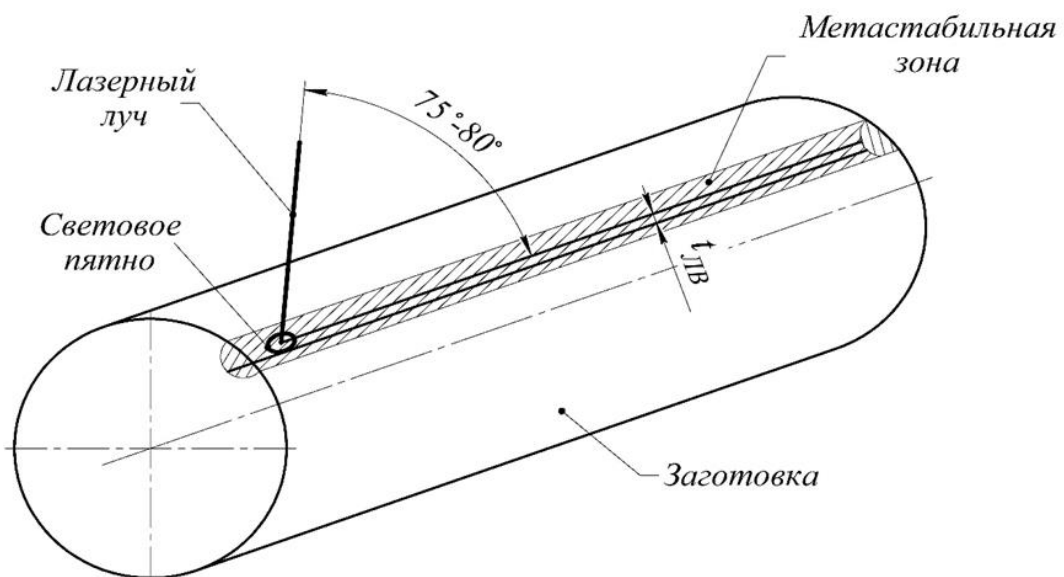


Рисунок 1.11 – Способ обработки стальных заготовок с дроблением стружки на основе предварительного лазерного нагрева [57]

Основные недостатки способа заключаются в следующем:

- возникновение значительных динамических нагрузок на инструмент при входе резца в упрочнённую метастабильную зону, что приводит к ударному воздействию на его вершину и кромки.

- негативные технологические последствия: снижение стойкости инструмента, сколы режущих кромок, усиление вибраций, ухудшение шероховатости поверхности и падение эффективности дробления стружки.

- высокая энергоёмкость процесса, обусловленная использованием лазерного нагрева.

Несмотря на положительный эффект при обеспечении процесса стружкообразования и стружкодробления, вышеуказанные методы характеризуются рядом существенных недостатков, включая: необходимость сложной кинематической ориентации вспомогательных элементов, нестабильность процесса при изменении режимов резания, возникновение ударных и динамических нагрузок на режущий инструмент, усиление вибрационных явлений и ускоренный износ режущей кромки. Кроме этого, дополнительными ограничивающими факторами являются высокая энергоёмкость теплового воздействия, неравномерность сформированной структуры в поверхностном слое и усложнение технологического процесса за счёт совмещения операций термического воздействия и процесса механической обработки резанием. При лазерно-механическом способе, отмечается снижение стойкости инструмента, ухудшение параметров шероховатости и рост энергетических затрат, что ограничивает их применение в условиях серийного производства.

1.4 Варианты решения осуществляющих проблем при механической обработке деталей из сталей аустенитного класса

Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют, что до сих пор, использование традиционных методов хотя и позволяет обеспечить качество обработки, но сопровождается множеством проблем, дефекты которых до сих пор не устранены. В последние годы был разработан процесс криогенной токарной обработки для упрочнения поверхностного слоя заготовок из аустенитных сталей в процессе обработки и таким образом, что исключает необходимость дополнительных операций [49, 78]. Результаты многочисленных экспериментальных и теоретических исследований в области криогенной обработки свидетельствуют о её высокой эффективности при обеспечении

требуемого качества поверхностного слоя деталей из аустенитных сталей. Установлено, что применение криогенных сред способствует улучшению параметров поверхности и стабилизации условий механической обработки материалов. Было доказано, что криогенное воздействие позволяет улучшить скорость съема материала без увеличения износа инструмента, увеличивает стойкость инструмента благодаря меньшему абразивному и химическому износу, улучшает целостность обработанной поверхности детали и ломкость стружки [42, 80].

Сущность криогенной обработки при обработке материалов заключается в термическом воздействии на основе криогенной температуры за счёт использования криогенных веществ. Наиболее распространёнными криогенными агентами являются жидкий азот (LN) с температурой $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ и углекислый газ (CO_2) при температуре $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$, что объясняется их невысокой стоимостью и безопасностью для окружающей среды. В процессе криогенной обработки LN или CO_2 применяются в качестве охлаждающих жидкостей с целью эффективного отвода тепла от зоны резания [49, 79, 81].

Метод криогенной обработки реализуется в технологических процессах только при применении специализированного технического оборудования, способствующего хранению криогенных агентов и противодействию их достижения температуры кипения при продолжительном применении.

Механизм криогенной обработки определяется применяемыми криогенными веществами. В случае применения жидкого азота охлаждающий эффект обусловлен его крайне низкой температурой ($-196\text{ }^{\circ}\text{C}$). При этом следует учитывать, что жидкий азот, обладающий более низкой температурой кипения по сравнению с углекислотой, обеспечивает более выраженное и глубокое охлаждение зоны воздействия, тогда как CO_2 характеризуется менее интенсивным, но более локализованным и управляемым охлаждающим эффектом. Жидкий азот может накапливаться в нижних зонах или замкнутых полостях обрабатываемого пространства, создавая потенциальную опасность для дыхания вследствие его высокой плотности. Однако, жидкий азот широко применяется в качестве

смазочно-охлаждающей среды при механической обработке материалов благодаря высокой эффективности теплоотвода [81].

В связи с тем, что механическая обработка коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса, характеризующихся повышенной прочностью и пластичностью, сопровождается значительными силовыми и ударными нагрузками. Это, в свою очередь, приводит к интенсивному износу режущих кромок инструмента и снижению его эксплуатационной стойкости.

Таким образом, для повышения эксплуатационных характеристик получаемого изделия, в частности, твердости поверхностного слоя, как правильно, требуется применить последующую термическую обработку или методы поверхностного пластического деформирования – наклеп после процесса механической обработки резанием режущим инструментом.

С одной стороны, заготовки из аустенитной нержавеющей стали обычно механически упрочняют путем глубокой прокатки,ковки или дробеструйной обработки. Эти процессы постобработки пластически деформируют поверхностный слой заготовки и повышают твердость в приповерхностной области за счет наложения различных механизмов упрочнения. Повышение твердости обусловлено процессами измельчения зерна, формирования двойниковых границ и увеличения плотности дислокаций, и наличием мартенситной фазы в материале является источником данного явления.

С другой стороны, для целенаправленного улучшения микроструктурных характеристик материала предполагается применить криогенную обработку, способствующую в соответствии с диаграммой состояния железо-углерод превращению остаточного аустенита в наиболее твердую фазу, которая является мартенситом [23]. Таким образом, при криогенной обработке необходимо изучать и понимать процесс деформационного структурного превращения из γ -аустенита в α - мартенсит за счет термического воздействия на низкой температуре [23, 65]. Фазовое мартенситное превращение способствует повышению величины микротвердости, а также износостойкости и повышению усталостной прочности получаемого изделия. Пластические деформирования и низкие криогенные

температуры являются основными источником деформационно-индуцированного фазового мартенситного превращения [82, 85, 87]. Следует отметить, что при постоянной температуре термической обработки содержания мартенсита в материале, как правильно, возрастает с увеличением пластического деформирования. А снижение температуры термической обработки, в частности до температуры жидкого азота -196°C , позволяет достичь прохождения процесса фазового мартенситного превращения, независимо от фактора Шмида. Максимально достижимое содержание мартенсита при повышении температуры показывается на рисунке 1.12.

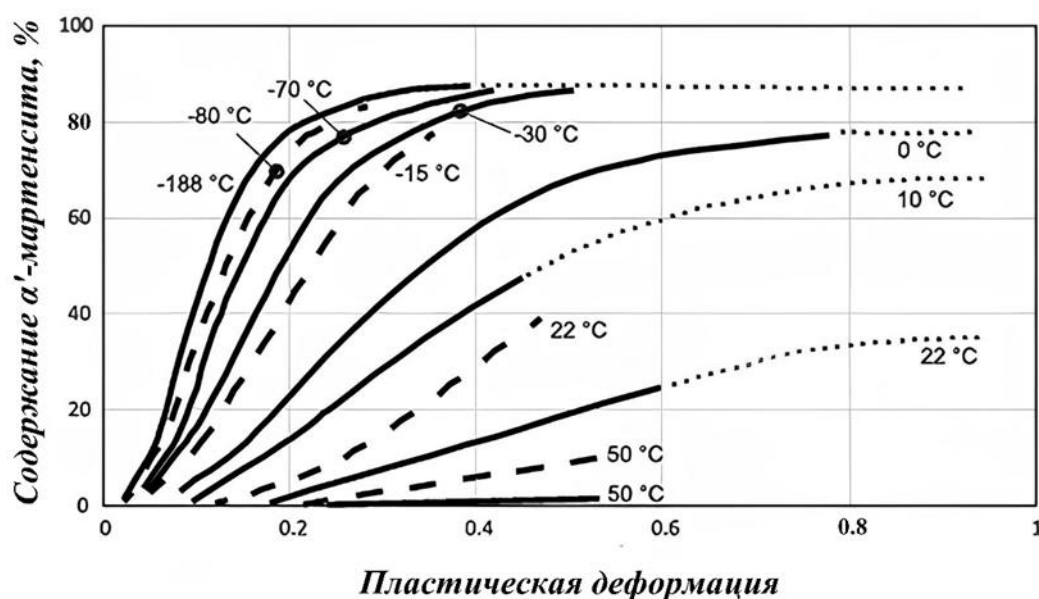


Рисунок 1.12 – Пластическая деформация [44, 89]

На этом основании можно заключить, что для надёжного обеспечения достаточной доли структурного мартенситного превращения в аустенитной стали температура криогенной обработки должна либо находиться в достаточном низком диапазоне, либо перед стадией механической обработки необходимо сформировать требуемую текстуру материала [79, 85, 86].

В публикации «Прогнозирование содержания мартенсита в метастабильных аустенитных сталях после криогенного точения с использованием машинного обучения» авторы [89] проводили тематическое исследование с криогенной обработкой, и давали прогнозирование содержания мартенсита, образующегося во время процесса, что имеет решающее значение для поверхностного упрочнения.

В настоящее время применяют различные методы криогенной обработки, которые можно делиться на трех основных группах методов:

Первый основной метод криогенной обработки основывается на непосредственном криогенном охлаждении/воздействии, которое заключается в прямом охлаждении зоны резания и/или области формирования стружки. Данный подход реализуется за счёт подачи или распыления криогенных сред, таких как жидкий азота или углекислота, непосредственно в зону резания или в область формирования стружки. При этом коэффициент трения между материалом обрабатываемой заготовки и режущим инструментом напрямую оказывает существенное влияние на силу трения и силу резания, следовательно, на характеристики режущего инструмента и качества поверхностного слоя получаемого изделия.

При криогенном воздействии с достаточной низкой температурой в зоне контакта поверхностей скольжения образуют смазочные пленки, которые оказывают влияние на характеристики материалов, в частности, способствуют повышению твёрдости поверхностного слоя и уменьшению значения коэффициента трения [23, 65]. Метод прямого криогенного охлаждения/воздействия реализуется с использованием внешних насадок для подачи криогенной среды, а также за счёт конструктивной модификации режущего инструмента или его державки. Непосредственное криогенное воздействие/охлаждение способствует эффективному отводу тепла из зоны резания, снижению температурной нагрузки на режущий инструмент и улучшению его эксплуатационных характеристик, включая изменение условий трения. Одновременно данный подход позволяет предотвратить нежелательные структурные и фазовые изменения, а также ухудшение свойств обрабатываемой заготовки.

Исследования, проведенные Патриком Майером, Бенджамином Киршем, Кристофером Мюллером и другими авторами показали, что в криогенное воздействие/охлаждение может быть применено для осуществления деформационно-индуцированного поверхностного упрочнения. По их мнениям,

углекислота (CO₂) рассматривается в качестве эффективного криогенного средства, обладающего высокой охлаждающей способностью и хорошими смачивающими характеристиками. В их работе было исследовано влияние варьируемых технологических параметров обработки, таких как: скорости резания, глубины резания и продольной подачи, угла наклона режущей кромки инструмента и т.п., на процесс деформационного упрочнения поверхностного слоя при токарной обработке нержавеющей аустенитной стали в условиях криогенного охлаждения/воздействия [83, 90]. Таким образом, было подтверждено существенное влияние метода криогенной обработки с непосредственным криогенным воздействием/охлаждением посредством анализа и оценки значений возникающих механических и термических нагрузок, которые в свою очередь способствует повышению микротвердости и снижению шероховатости поверхности получаемого изделия.

В исследованиях Яна К. Ауриха, Патрика Майера, Бенджамин Кирша и соавторов было предложено новое направление применения криогенного воздействия/охлаждения, которое позволяет одновременно в процесс механической обработки резанием осуществлять упрочнение поверхностного слоя нержавеющей аустенитной стали [77]. При криогенном воздействии/охлаждении с достаточной низкой температурой в структуре материала аустенитного класса может происходить структурное мартенситное превращение из метастабильного аустенита в мартенсит посредством пластической деформации. Для практического использования данного явления в процессе обработки материалов необходимо обеспечить непрерывное сохранение криогенных условий в зоне резания, что позволяет совместить процесс резания и закалку в единую технологическую операцию.

Второй метода криогенной обработки представляет собой косвенное криогенное воздействие/охлаждение режущего инструмента в процесс резания, которое реализуется с учётом бесконтактного криогенного воздействия которым криогенная среда не вступает в прямой контакт ни с обрабатываемой заготовкой, ни с режущим инструментом. В результате отвод тепла, выделяющегося в зоне

резания, осуществляется преимущественно за счет теплопроводности у самого режущего инструмента при его криогенном воздействии/охлаждении.

Третий метод криогенной обработки является механической обработкой обрабатываемых заготовок на основе предварительного криогенного воздействия, которое способствует изменению физико-механических свойств исходного материала, следовательно, изменению условий резания и повышению общей обрабатываемости. Метод предварительной криогенной обработки изделий «тел вращения» отличается относительно высокой простотой внедрения в производственные процессы и обеспечивает высокую производительность [17, 18].

1.5 Выводы по Главе 1 и постановка задач

В результате проведенного анализа были сделаны следующие выводы:

1. Нефть и газ играют важную роль в мировой экономической жизни, а также для каждой страны. Нефтегазовая промышленность всегда является ключевой отраслью для стран, обеспечивающей важнейшее сырье для современного общества, особенно для производства электроэнергии и топлива для транспортных средств.

2. В настоящее время развитие современных отраслей промышленности, таких как аэрокосмическая, нефтегазовая, химическая, атомная энергетика и т.д., предъявляет требования к новому спросу на различные изделия из разных материалов. В современной машиностроительной промышленности постепенно происходит смещение в сторону применения труднообрабатываемых материалов в производстве благодаря своим уникальным эксплуатационным свойствам. К ним относятся коррозионностойкие и жаропрочные стали и сплавы, материалы с высокой твердостью и прочностью, сплавы на основе титана и тугоплавких металлов (вольфрам, молибден, ниобий). Для эффективной обработки труднообрабатываемых материалов применяют методы обработки, такие как: ультразвуковая, вибрационная, лазерная, индукционная, электрохимическая и т.д.

3. Аустенитная нержавеющая сталь является чрезвычайно важным материалом во многих отраслях промышленности, особенно в нефтегазовой промышленности, благодаря своей исключительной коррозионной стойкости,

термостойкости и механическим свойствам. Благодаря своим превосходным свойствам аустенитная сталь не только играет важную роль в высокотехнологичных приложениях, но также помогает повысить долговечность, безопасность и эффективность в суровых промышленных условиях.

4. Управление процессом стружкообразования является одной из ключевых задач механической обработки труднообрабатываемых материалов, поскольку оно напрямую влияет на качество изготавливаемых изделий и общую производительность технологического процесса. Кроме того, характер и формы образующихся стружек определяет сбор, транспортировки и переработки отходов, а также уровень безопасности персонала при выполнении технологических операций.

5. Применение метода криогенной обработки в процессе механической обработки позволяет сформировать новую структуру материала с изменёнными по сравнению с исходными физико-механическими свойствами, что приводит к формированию новых условий резания. А также данный метод криогенной обработки позволяет эффективно преодолевать технологические трудности, характерные для чистовой токарной обработки коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

6. Метод криогенной обработки рассматривается как более эффективное и технологически целесообразное решение при обработке аустенитных сталей, а также других труднообрабатываемых сталей и сплавов.

В результате вышеприведённого анализа необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных, приведенных в литературных источниках, посвященных современному состоянию вопроса технологического обеспечения эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса;

2. Экспериментально определить и проанализировать влияние криогенного воздействия и последующего пластического деформирования на структуру и физико-механические свойства аустенитной стали для технологического

обеспечения качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» при обработке изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса;

3. Разработать устройства подачи криогенного средства для осуществления предварительной подготовки поверхности обрабатываемой заготовки на основе локального криогенного воздействия и определить режимные параметры метода криогенной обработки на геометрические размеры формируемой упрочненной зоны с метастабильной структурой

4. На основании экспериментальных исследований разработать способ механической обработки деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия, обеспечивающий эффективное и устойчивое сегментирование и дробление сливной стружки. Данный способ включает в себя схему предварительного локального криогенного воздействия на поверхности обрабатываемой заготовки с последующим осуществлением механической обработки режущим инструментом на заданный припуск;

5. Разработать имитационную модель технологической системы, учитывающую влияние технологических режимов механической обработки и микроструктурные изменения в поверхностном слое заготовки созданную посредством локального криогенного воздействия для оценки динамической устойчивости системы;

6. Установить эмпирические зависимости влияния технологических режимов механической обработки с учётом особенностей локального криогенного воздействия на шероховатость обработанной поверхности;

7. Разработать практические рекомендации по выбору параметров нанесения локального криогенного воздействия и обоснованию значений технологических параметров, обеспечивающих достижение заданного уровня шероховатости поверхности изделий.

ГЛАВА 2 РАЗРАБОТКА СПОСОБА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ» ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЛОКАЛЬНОГО КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Анализ технологических аспектов формирования качественных поверхностей, а также оценка преимуществ и недостатков существующих методов и способов механической обработки, выполненные в первой главе, показывают, что для коррозионностойких и жаропрочных аустенитных материалов до сих пор не существует оптимального способа, полностью удовлетворяющего требованиям, предъявляемым к их обработке. Сливная стружка, образующаяся при резании аустенитной стали из-за своей высокой пластичности, не сама сегментируется и дробится, что приводит к увеличению шероховатости поверхности, то есть снижению качества полученных изделий. Кроме того, сливная стружка также оказывает влияние на режущий инструмент, вызывает его износ и необходимость периодической замены. Это приводит к увеличению стоимости обработки, а также к увеличению цены продукта. Кроме того, такая сливная стружка также может быть опасной, поскольку может привести к травме рабочего.

Вопросы технологического обеспечения качества механической обработки труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках рассматривались в работах рядов авторов, таких как: Подураева, Б.Б. Чечулина, Исаев А.В., Гречишников В.А., Маслова А.Р., Б.П. Бармина, Г.И. Грановского, И.Г. Жаркова, В.Н. Окунькова А.А., Торресильяс Р. и других отечественных ученых; Вопросом обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе аустенитной стали, занимались также и зарубежные ученые, такие как: Amresh Kumar, Rajesh Sharma, Santosh Kumar и Prajjawal Verma Yansong Zhang, Huan Xue, Yongchun Li, Xuelin Wang, Xinli Jiang, Chongwen Yang, Kewei Fang, Wenqian Zhang и Hui Jiang, Джун-Хван Ким, Ын-Юнг Ким, Чун-Ман Ли и др.

Для решения вышеперечисленных задач в данной диссертации предлагается новый метод обработки, называемый способом обработки с предварительным локальным криогенным воздействием (ЛКВ) на поверхность заготовки,

изменяющим свойства заготовки из аустенитной стали. Этот способ можно рассматривать как перспективный и оптимальный способ для повышения качества механической обработки изделий из аустенитной стали.

2.1 Формирование метастабильной структуры в поверхностном слое сталей при локальном криогенном воздействии

Криогенная обработка – это новая технология, применяемая для улучшения и создания новых свойств материалов. С помощью криогенной обработки добиваются улучшения обрабатываемости труднообрабатываемых материалов в машиностроении [52,88]. Данная технология была теоретически обоснована и впервые апробирована в начале XX века, однако её практическое развитие и широкое научное признание пришлось лишь на его последние десятилетия. Несмотря на актуальность криогенной обработки в металлургии и машиностроении количество фундаментальных исследований и публикаций в данной области остаётся ограниченным. В этих работах основное внимание уделяется исследованиям по холодной обработке и глубокой холодной обработке некоторых инструментальных сталей, углеродистых сталей и легированных сталей. Во Вьетнаме в области металлургии и машиностроения исследовательские работы по этому вопросу практически отсутствуют. Причин может быть много, но одной из причин, которую можно считать важной, является то, что во Вьетнаме нет данного криогенного оборудования. Такие оборудования с низкой температурой в настоящее время в основном используется только в медицине и физике

Для оценки влияния криогенного воздействия на структуру и свойства аустенитных сталей проводили эксперименты на основе стали марки 08X18H10T. Эксперименты проводили таким образом, что образцы из стали 08X18H10T были полностью погружены на разные отрезки времени, начиная от 10 с и до 180 с в сосуд Дьюара с широким горлом с жидким азотом по очереди, чтобы они не касались друг друга и не создавали дополнительного слоя паровой рубашки. Результаты экспериментов представлены ниже:

- 10 с (образец 1) – наблюдается активное кипения азота, охлаждение происходит только поверхности и сопровождается интенсивным теплоотводом из

центральных слоев; видимо превращение еще не пошло, так как азот бурно кипит даже при интенсивном передергивании образца для срыва паровой рубашки, пар создает тепловую оболочку и не пускает холод к металлу;

- 30 с (образец 2) – все еще происходит активное кипение азота даже при интенсивном передергивании образца для срыва паровой рубашки, но постепенно приблизительно после 20 с. (процесс контролировали секундомером) кипение начинает затухать – металл охлаждается и с поверхности вглубь пошел сдвиговый, вероятно, мартенситный процесс;

- 60 с (образец 3) – кипение прекратилось примерно на ≈ 43 с, металл полностью остыл - прошел сдвиг по объему, весь потенциальный мартенсит образовался, и процесс остановился;

- 180 с (образец 4) – в процессе уже ничего не меняется по сравнению с 60 с.

Таким образом, весь наблюдаемый процесс превращения прошел в течение от 30 с до 60 с. За такой короткий промежуток времени происходит только сдвиговый мартенситный процесс. Поскольку нас интересует процесс криогенного воздействия на поверхность, достаточно захлаживания поверхности в интервале 30...40 с.

Подтверждением образования мартенситной фазы, которая в отличие от аустенита, является магнитной, может служить изменение магнитной проницаемости и твердости исследуемых образцов.

Исследование магнитной проницаемости проводили портативным магнитометром Magnetoscop 1.070 фирмы FOERSTER. Магнитометр Magnetoscop 1.070 представляет собой переносную магнитометрическую систему с микропроцессорным управлением и зондами для быстрого измерения плотности магнитного потока в качестве абсолютного или дифференциального значения (градиент), которую используют, в том числе для контроля качества нержавеющей стали и подтверждения структурных преобразований путем сравнительного изменения относительной магнитной проницаемости.

Измерение магнитной проницаемости производили с использованием зонда PP-2-5 в соответствии с ASTM A342/A342M (измерение в пределах μ от 1,00000 до

2,00000), где μ – магнитная проницаемость. Стандартный образец (тарирование прибора $\mu = 1,05$).

Магнитная проницаемость определяется по формуле (2.1):

$$\mu = (1 + 4\pi\chi\rho), \quad (2.1)$$

где $\pi = 3,14$; χ – магнитная восприимчивость, м³/кг; ρ – плотность, кг/м³.

Замеры производили по 4 позициям – по противоположащим точкам на диаметре. Магнитная проницаемость до аустенизации была 1,097 (остаточные напряжения и т.п.), после аустенизации 1,085. Результаты измерений после захлаживания представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Значения магнитной проницаемости в зависимости от времени захлаживания (по данным автора)

Время захлаживания, t	Магнитная проницаемость, μ				Средние значения магнитной проницаемости, μ
	1	2	3	4	
10 с	1,088	1,089	1,091	1,093	1,091
30 с	1,119	1,137	1,141	1,153	1,142
60 с	1,216	1,214	1,210	1,215	1,214
180 с	1,218	1,221	1,239	1,221	1,220

Всюду – первый замер там, где крепили образец. В результате измерения магнитной проницаемости установлено, что процесс завершен уже при 60 с – разница в проницаемости находится скорее в пределах погрешности измерения. Выпад 1,239 не учитываем – скорее всего, какая-то грязь на поверхности

Увеличение магнитной проницаемости может быть связано как с образованием ферромагнитных фаз мартенситного типа наиболее вероятно α -или ϵ -мартенсита, так и выделениями избыточных фаз карбидного типа. Количество мартенсита, судя по увеличению магнитной проницаемости очень мало – менее 5% - магнитная восприимчивость изменяется незначительно, но так как превращение идет по границам зерен, а мартенсит хрупкий, то частичная смена механизма отрыва на скалывание возможна при очень малых его содержаниях.

Микроструктуру стали исследовали на оптическом микроскопе *Leica DM 2500*. Микроструктура стали в исходные состояния представлена на рисунке 2.1.

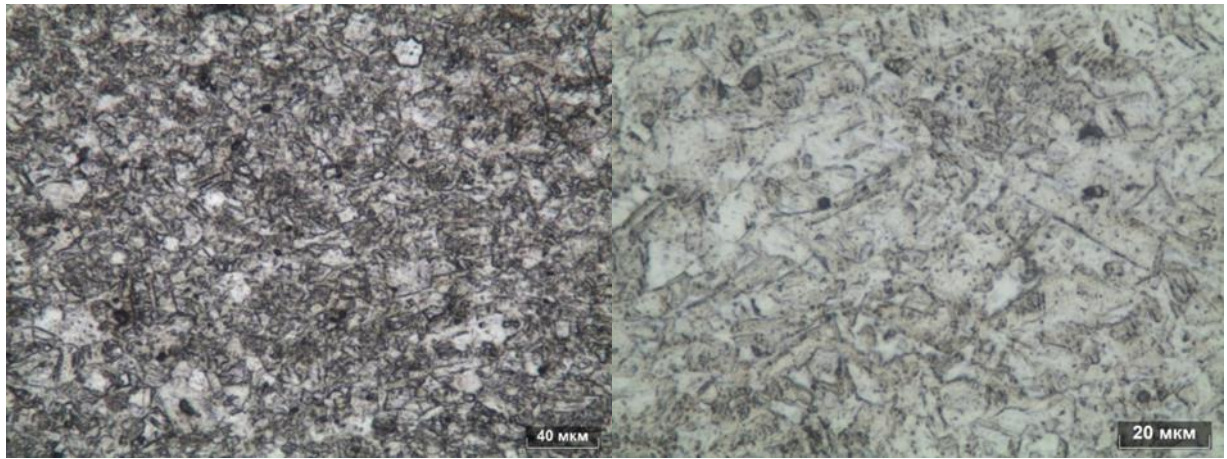


Рисунок 2.1 – Микроструктура аустенитной стали в исходном состоянии при различных увеличениях (фото автора)

Исходная структура представляет собой высоко-деформированный аустенит (деформация около 40% в результате холодной вытяжки) и немного ферромагнитных карбидов. После закалки с температуры 1020°C – 1100°C (1050°C) структура представляет собой аустенит.

Микроструктура после закалки представлена на рисунке 2.2.

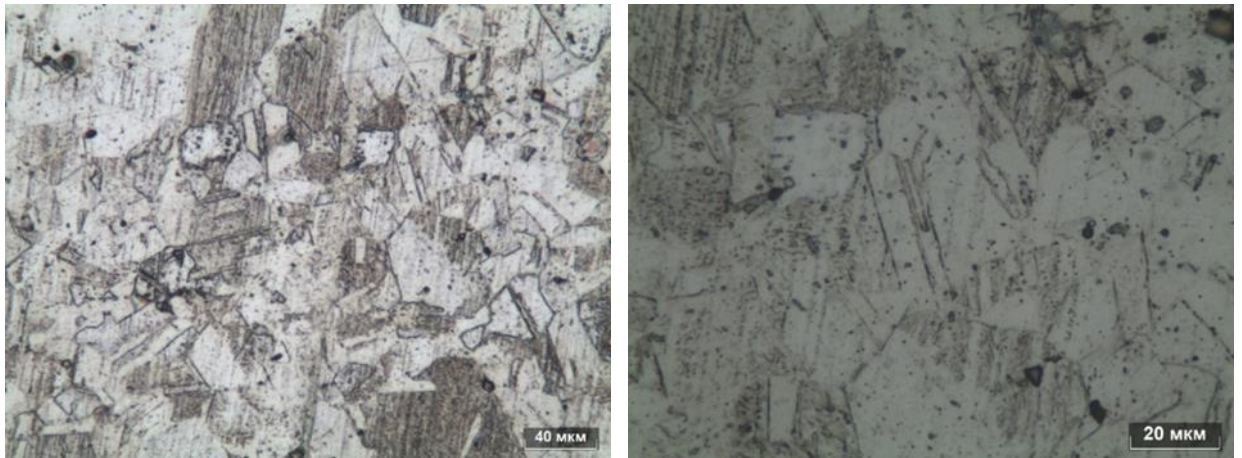


Рисунок 2.2 – Микроструктура аустенитной стали после закалки при различных увеличениях (фото автора)

Микроструктура после захлаживания представлена на рисунке 2.3.

Дополнительно проводили фрактографические исследования поверхности шлифов стали на растровом микроскопе (рисунок 2.4).

Результаты исследований приведены на рисунках 2.5 и 2.6, четко видны иглы мартенсита, образованные по границам аустенитных зерен.

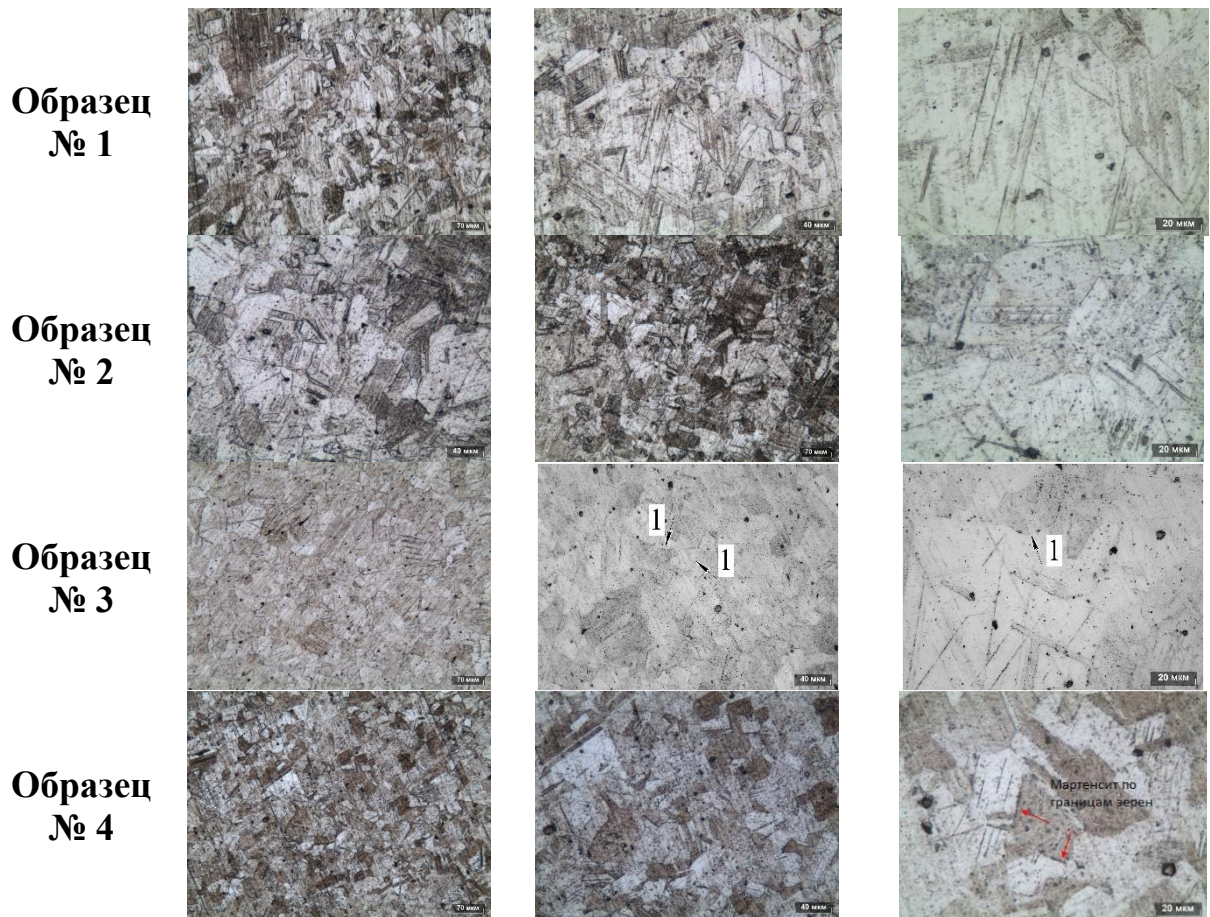


Рисунок 2.3 – Микроструктура аустенитной стали после криогенного воздействия, где: 1 – мартенсит по границам аустенитных зерен (фото автора)



Рисунок 2.4 – Растровый микроскоп (фото автора)

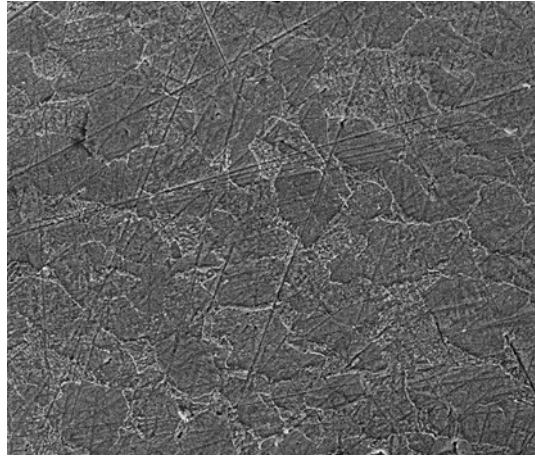
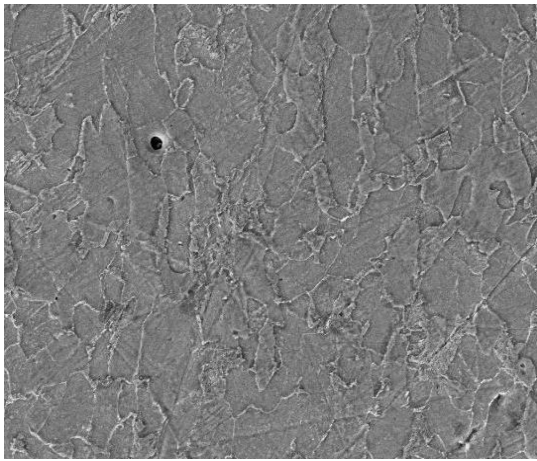
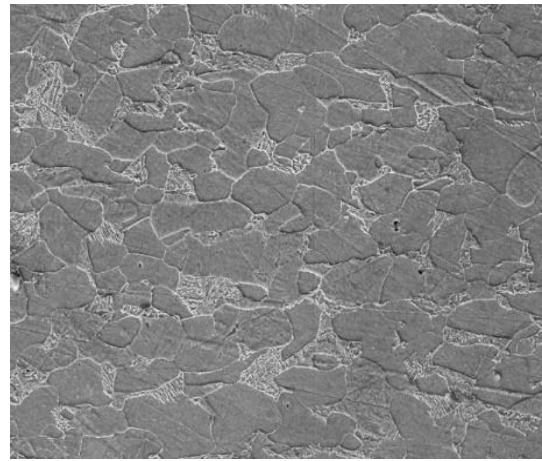


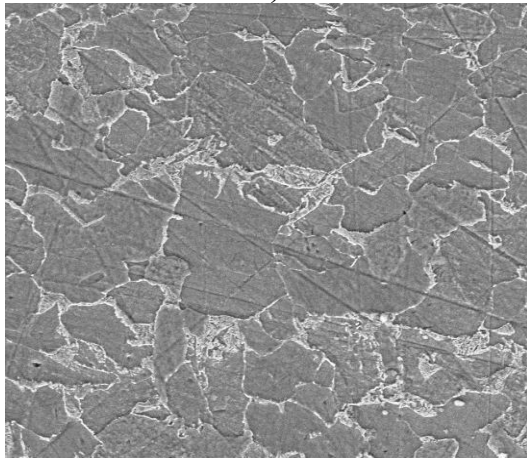
Рисунок 2.5 – Микроструктура аустенитной стали 08X18N10T
после закалки x1200 (фото автора)



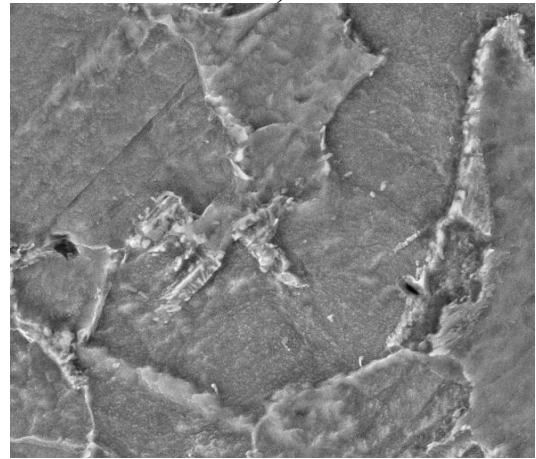
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.6 – Микроструктура аустенитной стали 08X18N10T, где: а – после
захолаживания 30 с x1200; б – после захолаживания 60-180 с x1200; в –
после захолаживания 60-180 с x1800; г – после захолаживания 60-180 с
x10800 (фото автора)

Далее, проводили измерения значений микротвердости (HV) исследуемых образцов стали 08X18H10T в исходном состоянии, при закалке и при криогенной обработке, результаты которых представлены в таблице 2.2 и изображены на рисунке 2.7.

Таблица 2.2 - Значение микротвердости (HV) аустенитной стали при криогенном воздействии (по данным автора)

Расстояние от внешней поверхности, мм	Закалка	Образец № 1 (T = 10 с)	Образец № 2 (T = 30 с)	Образец № 3 (T = 60 с)	Образец № 4 (T = 180 с)
0	135	148	178	200	197
0,5	132	146	171	195	187
1	135	142	184	196	193
1,5	139	153	183	201	195
2	146	155	182	203	194

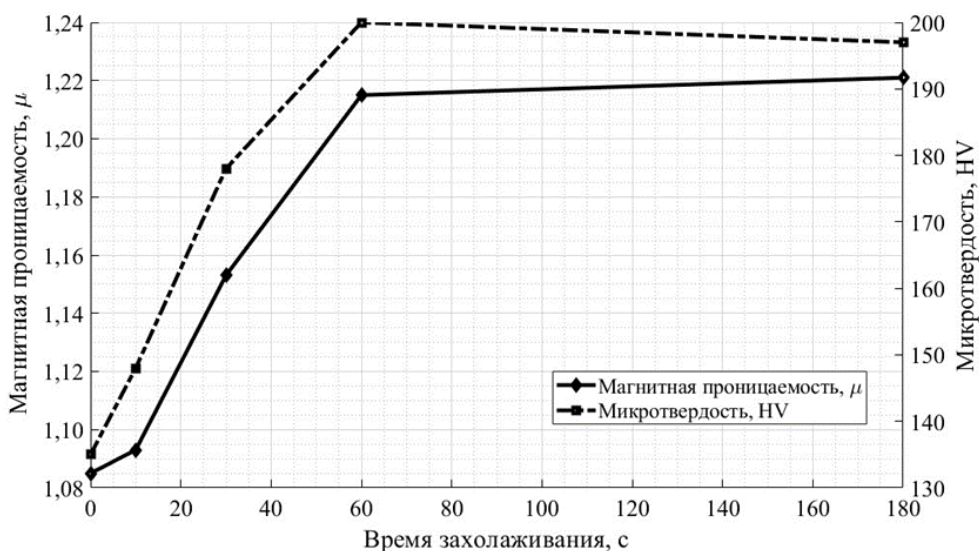


Рисунок 2.7 – Схема зависимостей магнитной проницаемости и микротвердости стали 08X18H10T от времени криогенной обработки (составлено автором)

На основании полученных экспериментальных данных установлено, что криогенная обработка приводит к существенному повышению твердости материала. После закалки твердость составляет 135 HV, тогда как при криогенном захлаживании она возрастает до 148 HV при времени выдержки 10 с (образец № 1), 178 HV при 30 с (образец № 2) и достигает 200 HV при 60 с (образец № 3). Дальнейшее увеличение времени захлаживания с 60 до 180 с не вызывает

заметных изменений твердости, что указывает на завершение фазового превращения.

Характер изменения твердости соответствует с поведением магнитной проницаемости, оба параметра возрастают с увеличением времени захлаживания до 60 с, после чего их значения стабилизируются.

Таким образом, наблюдаемое увеличение значений твердости и магнитной проницаемости в опытных образцах после захлаживания демонстрирует формирование в структуре аустенитной нержавеющей стали новой твердой ферромагнитной фазы. Установлено, что данный процесс характеризуется высокой скоростью протекания и завершается за короткий промежуток времени, не превышающий 60 с, а его скорость ограничена исключительно интенсивностью промерзания металла, сопровождающейся постепенным замораживанием глубинных слоев. Указанные особенности соответствуют сдвиговому механизму фазового превращения с образованием мартенсита, обусловленного интенсивным локальным шоквым захлаживанием поверхностных слоев.

Вследствие высокой термодинамической устойчивости аустенита в нержавеющей аустенитных сталях мартенситное превращение, сопровождающееся изменением кристаллической решетки и значительным ростом твердости, происходит преимущественно по границам аустенитных зёрен. Данное явление наиболее отчетливо проявляется на образцах № 3 и № 4 и в меньшей степени – на образце № 2. Изменение состояния межзеренных границ в зоне криогенного захлаживания поверхности приводит к модификации условий пластического сдвига при деформации материала режущим инструментом в процессе последующей механической обработки.

Далее исследовали влияния деформации на структуру и свойства нержавеющей стали, захлаженной в течение 10 и 180 с. Давление осуществляли при помощи устройства с шариком диаметром 5 мм мм с усилием от 0,1 МПа по 1 МПа. По оси отпечатка образец разрезали при помощи установки электроэрозионной резки (рисунок 2.8), и в дальнейшем фиксировали при помощи двухкомпонентной самотвердеющей эпоксидной смолы.

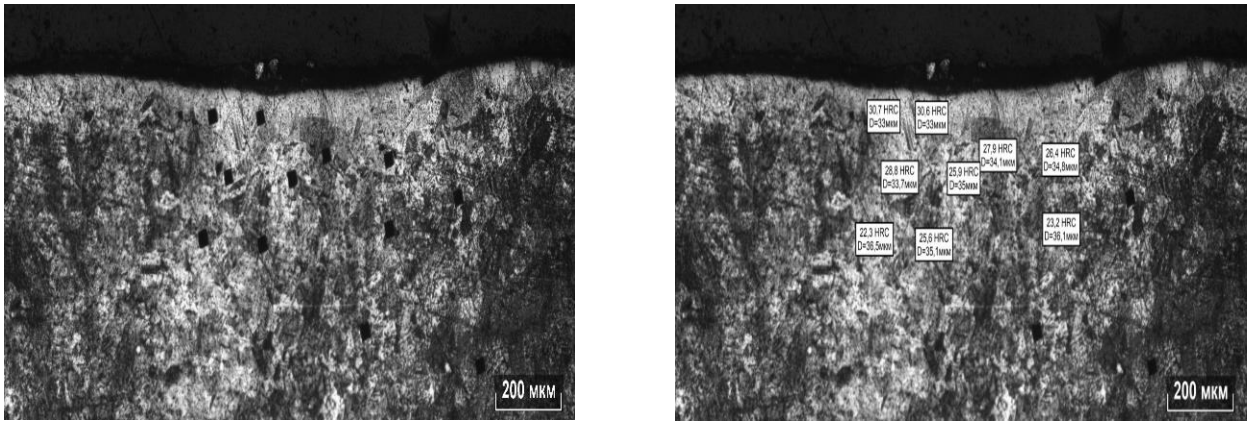


Рисунок 2.10 – Микроструктура и микротвердость аустенитной стали в зоне пластической деформации шариком металла после захлаживания в течение 1-3 минут, (x100) (фото автора)

Наблюдаемый на поверхности белый слой это мартенсит. В этом случае мартенсит, образованный при шоковом захлаживании, послужил катализатором для образования мартенсита при одинаковых условиях деформации. Аналогично силовое воздействие при резании вызывает перераспределение напряженно-деформированных состояний в зонах концентрации напряжения, обусловленных образованием мартенситной составляющей по границам зерен при шоковом захлаживании участков поверхности.

Микроструктура деформированных участков при больших увеличениях, полученная на растровом микроскопе, приведена на рисунке 2.11.

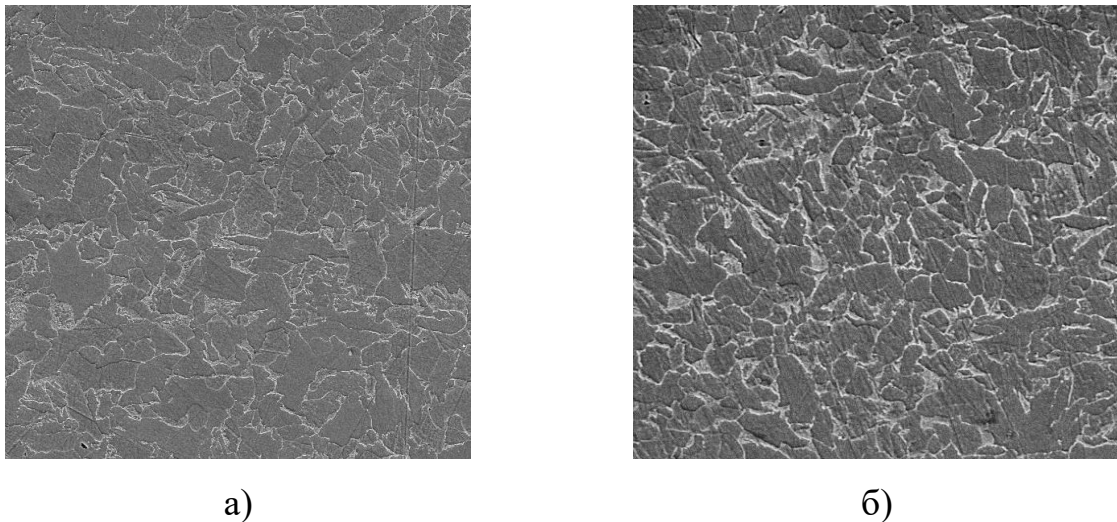


Рисунок 2.11 – Микроструктура аустенитной стали, деформированной после шокового захлаживания в течение: а) – 10 с., б) – 180 с (x1200) (фото автора)

2.2 Метод предварительной подготовки обрабатываемой поверхности заготовки на основе локального криогенного воздействия

Для реализации способа механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия необходимо разработать и внедрить в производственную практику устройство подачи жидкого азота [60], конструктивная схема которого изображена на рисунке 2.12.

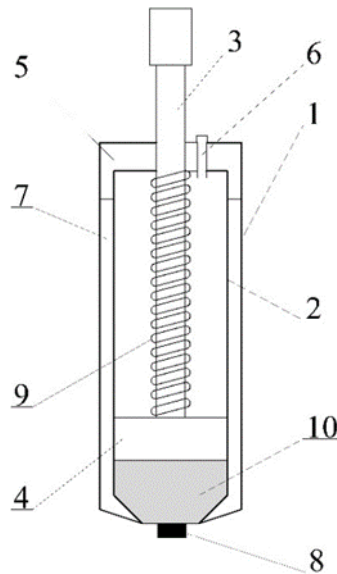


Рисунок 2.12 – Устройство подачи жидкого азота (составлено автором)

1 – внешний корпус устройства; 2 – внутренний корпус устройства, изготавлиющиеся из нержавеющей стали; 3 – шток; 4 – поршень, предназначенный для подачи жидкого азота из камеры; 5 – крышка устройства; 6 – канал подачи сжатого воздуха, обеспечивающий поступательное перемещение штока и поршня; 7 – вакуумная полость, предназначенная для тепловой изоляции от внешней среды; 8 – контактный элемент, выполненный в виде волокнистого стержня из фетра либо иного пористого материала, размещённого в корпусе устройства; 9 – возвратная пружина, обеспечивающая обратное поступательное движение штока и поршня; 10 – камера для хранения жидкого азота

Предлагаемый способ механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе ЛКВ обеспечивает, за счёт направленной подачи жидкого азота, формирование локальной зоны интенсивного захлаживания, что позволяет воздействовать на структуру и свойства материала в

зоне резания. Линия ЛКВ, формируемая на поверхности обрабатываемой заготовки, может иметь различную конфигурацию в зависимости от условий обработки и геометрии детали, например. В частности, она может быть выполнена в виде прямой линии; нескольких прямых линий, ориентированных параллельно оси заготовки; винтовой траектории и других форм. Выбор конкретной формы линии локального криогенного воздействия определяется, в том числе, длиной образующейся стружки и особенностями процесса обработки, что позволяет адаптировать режим обработки для повышения её эффективности.

Для осуществления способа механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе ЛКВ требуется разработка соответствующей технологической установки, показывающая на рисунке 2.13. Первый этап выступает подачу жидкого азота из сосудов Дьюара 6 в устройство подачи жидкого азота 7 посредством переливного устройства 5 (см. рисунок 2.13, а). При предварительной технологической надстройке, устройство 7 устанавливается на резцедержателе и ориентируется относительно локального участка поверхности обрабатываемой заготовки 1, таким образом, чтобы контактный элемент находился в непосредственном соприкосновении с данной поверхностью. Баллон со сжатым воздухом 4 предназначен для подачи сжатого воздуха через соответствующий канал. Под действием создаваемого давления шток перемещается вдоль оси устройства, обеспечивая вытеснение жидкого азота из камеры на поверхность обрабатываемой заготовки. В результате на заданном участке поверхности локальное криогенное воздействие.

Перемещение устройства с продольной подачей $S_{\text{ЛКВ}}$ вдоль оси обрабатываемой заготовки формирует линейную зону локального криогенного воздействия. Между контактным элементом и обрабатываемой поверхностью предусмотрен зазор, величина которого обозначается Δ . Значение данного зазора должно быть минимально допустимым, что позволяет предотвратить растекание жидкого азота по поверхности и обеспечить требуемую ширину зоны локального криогенного воздействия (см. рисунок 2.13, б).

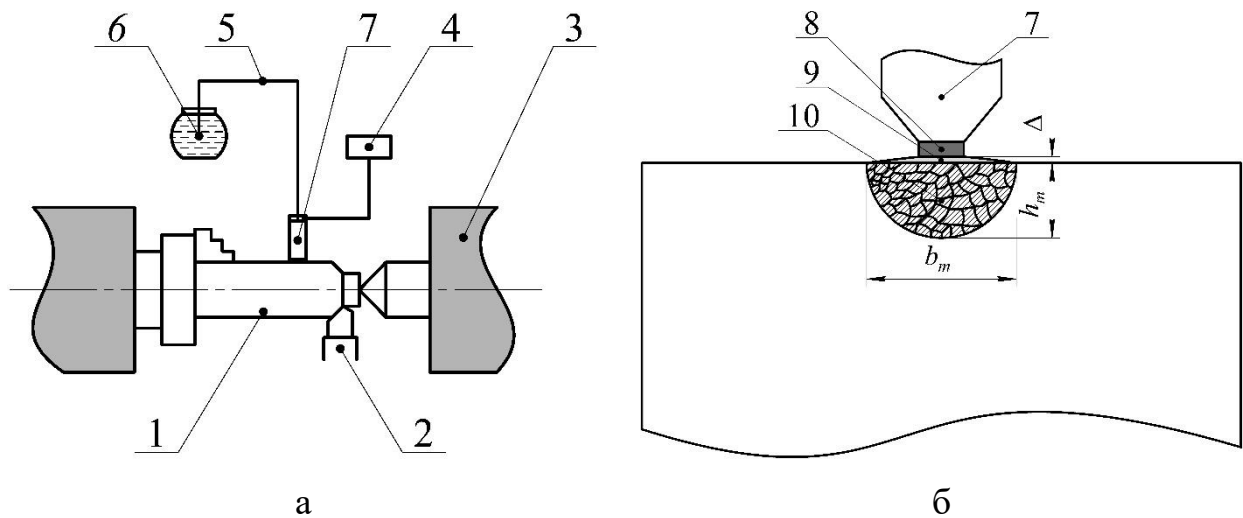


Рисунок 2.13 – Схема технологической установки с устройством подачи жидкого азота (составлено автором), где: а) 1 – заготовка; 2 – режущий инструмент; 3 – станок; 4 – баллон с сжатым воздухом; 5 – переливное устройство; 6 – сосуд Дьюара; б) 7 – устройство подачи жидкого азота; 8 – контактный элемент; 9 – жидкий азот; 10 – метастабильная структура

На следующем этапе механической обработки резанием заготовке 1 с упрочненной зоной метастабильной структуры сообщается вращательное движение, а режущему инструменту – движение продольной подачи. В результате осуществляется снятие слоя материала на заданную глубину резания, способствует устойчивому сегментированию сливной стружки и ее дроблению на равномерные элементы, следовательно, повышению качества обработанной поверхности получаемого изделия [43].

2.3 Исследование влияния режимов криогенного воздействия на геометрические размеры зоны с метастабильной структурой

Геометрические размеры упрочненной зоны с метастабильной структурой, а именно её ширина b_m и глубина h_m определяются продолжительностью контакта между поверхностью обрабатываемой заготовки и контактным элементом устройства подачи жидкого азота. Ширина b_m и глубина h_m , в свою очередь, зависит от технологических параметров ЛКВ, включающих скорость продольной подачи $V_{\text{ЛКВ}}$; давление подачи жидкого азота, P ; время ЛКВ, T). Глубина упрочненной зоны должна обладать определённым значением для стабильного

сегментирования и дробления образующейся сливной стружки. Однако, она не может превышать заданную глубину резания, поскольку это может привести к ухудшению качества следующего поверхностного слоя при выполнении черновой, получистовой и чистовой операций механической обработки.

Изменение глубины h_m рассматривается в диапазоне времени локального криогенного воздействия $T = 10$ с по 180 с, при постоянном давлении подачи жидкого азота $P = 1,0$ МПа и диаметре пятна контакта $d_{\text{п}} = 5$ мм. Экспериментальные данные приведены в таблице 2.3 и изображены на рисунке 2.14. Расхождение между расчетными и экспериментальными значениями глубины упрочненной зоны не превышает 10 %, что подтверждает адекватность разработанной модели.

Таблица 2.3 – Влияние времени локального криогенного воздействия на глубину и ширину упрочненной зоны (по данным автора)

№	Время ЛКВ T , с	b_m , мм – глубина упрочненной зоны	h_m , мм - ширина упрочненной зоны
1	10	0,15	4,4
2	15	0,27	4,5
3	20	0,36	4,7
4	25	0,43	4,9
5	30	0,51	5,0
6	35	0,74	5,0
7	40	1,12	5,1
8	45	1,29	5,2
9	50	1,57	5,4
10	55	1,82	5,4
11	60	2,0	5,5

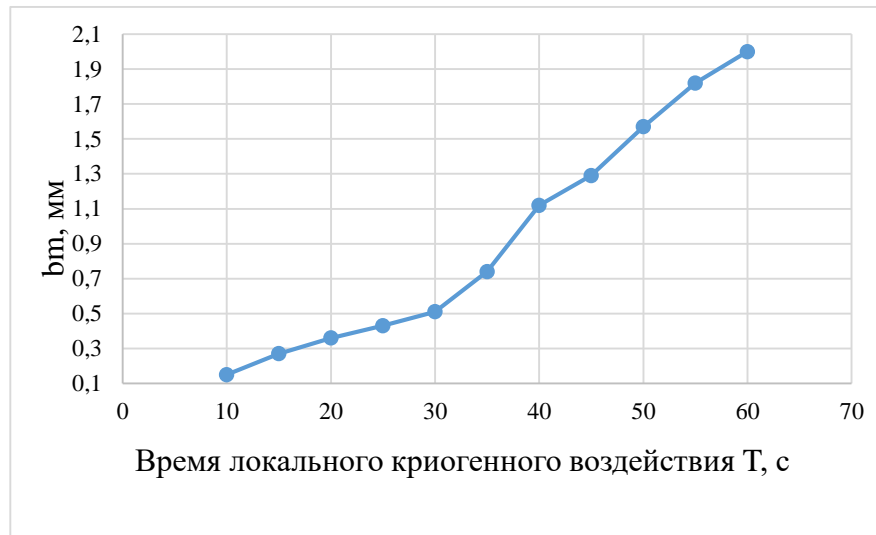


Рисунок 2.14 – Зависимость глубины упроченной зоны от времени локального криогенного воздействия при $P = 0,5$ МПа (составлено автором)

На следующем этапе исследований, выполненных с учетом ранее полученных результатов, анализировалось влияние давления подачи жидкого азота на геометрические характеристики упроченной зоны. Эксперименты проводились при фиксированном времени локального криогенного воздействия $T = 10$ с и диаметре пятна контакта $d_{\text{п}} = 5$ мм, что позволило выявить зависимость размеров упроченной зоны исключительно от изменения данного давления. Полученные результаты приведены в таблице 2.4 и изображены на рисунке 2.15.

Глубина данной зоны должна находиться в соответствии с оптимальным значением остаточных напряжений, что обеспечивает устойчивое сегментирование и дробление сливной стружки. На основе результатов экспериментов для определения глубины упроченной зоны следует принимать: для чистовой операции время ЛКВ $T = 30$ с и давление подачи жидкого азота $P = 0,5$ МПа; для получистовой операции $T = 60$ с и $P = 0,5$ МПа; и для черновой операции $T = 60$ с и $P = 1,0$ МПа.

Таблица 2.4 – Влияние давления подачи жидкого азота на глубину и ширину упроченной зоны (по данным автора)

№	P , МПа – давление подачи жидкого азота	b_m , мм – глубина упроченной зоны	h_m , мм – ширина упроченной зоны
1	0,1	0,12	4,5
2	0,2	0,27	4,6

Продолжение Таблицы 2.4

№	P , МПа – давление подачи жидкого азота	b_m , мм – глубина упрочненной зоны	h_m , мм – ширина упрочненной зоны
3	0,3	0,35	4,7
4	0,4	0,42	4,8
5	0,5	0,51	4,9
6	0,6	1,06	5,0
7	0,7	1,23	5,1
8	0,8	1,47	5,3
8	0,9	1,71	5,4
9	1,0	2,0	5,5

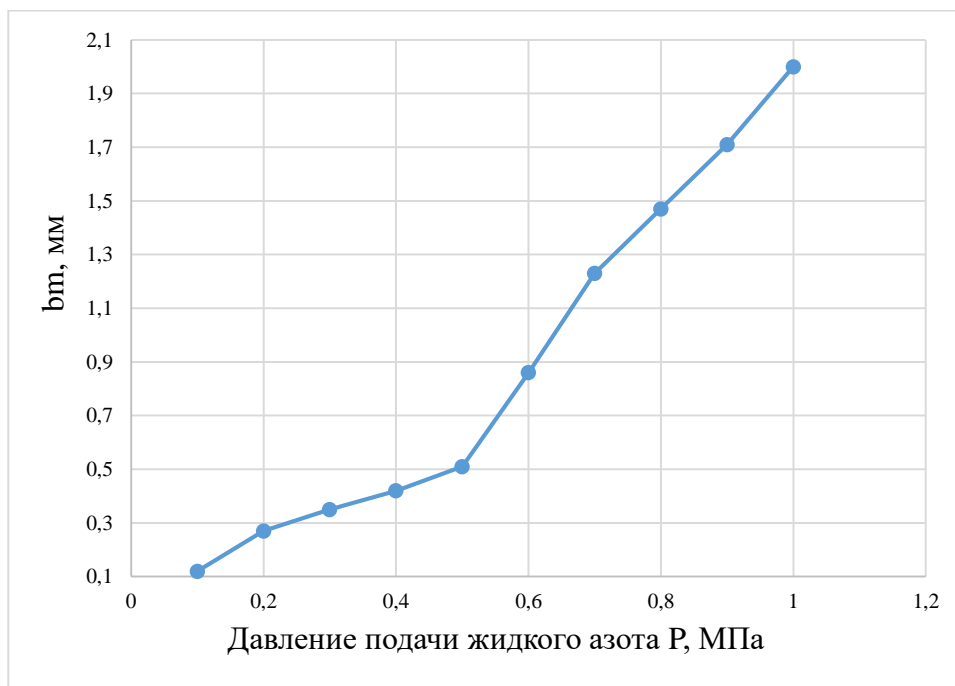


Рисунок 2.15 – Зависимость глубины упрочненной зоны от давления подачи жидкого азота (составлено автором)

Однако дополнительно исследовали влияния пластической деформации на структуру и свойства нержавеющей стали, захожденной в течение 30 с давлением осуществляли при помощи устройства для создания локального пластического деформирования на поверхностном слое детали с шариком диаметром 5 мм с усилием от 0,1 МПа по 1,0 МПа. Результаты приведены в таблицу 2.5 и на рисунке 2.16.

Таблица 2.5 – Влияние давления пластической деформации на глубину и ширину упрочненной зоны (по данным автора)

№	P_{II} , МПа – давление пластической деформации	b_m , мм – глубина упрочненной зоны	h_m , мм – ширина упрочненной зоны
1	0,1	0,14	4,5
2	0,2	0,3	4,6
3	0,3	0,36	4,7
4	0,4	0,45	4,8
5	0,5	0,62	4,9
6	0,6	1,09	5,0
7	0,7	1,25	5,2
8	0,8	1,51	5,3
8	0,9	1,75	5,5
9	1,0	2,05	5,6

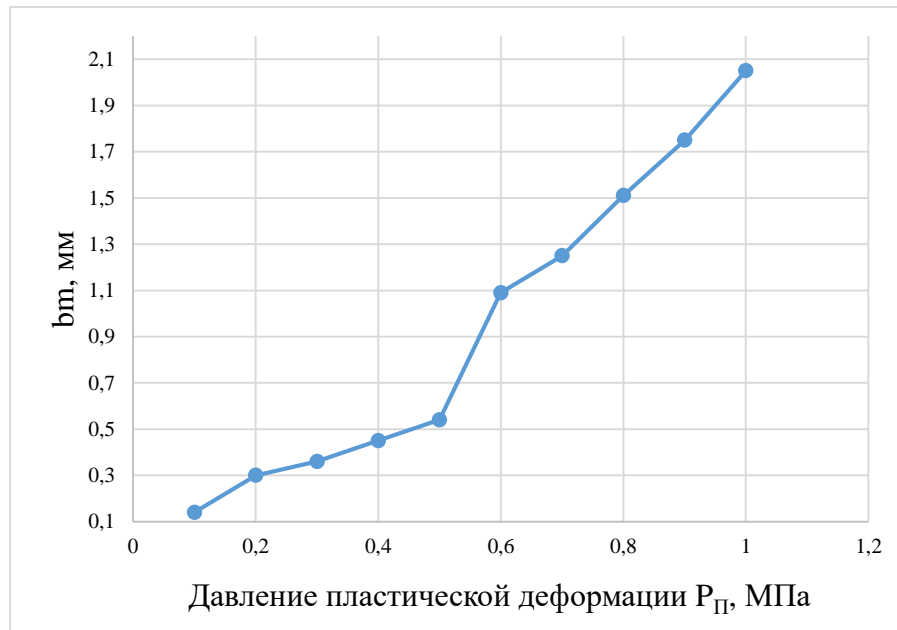


Рисунок 2.16 – Зависимость глубины упрочненной зоны от давления пластической деформации (составлено автором)

Таким образом, пластическая деформация не оказывает существенного влияния на глубину упрочненной зоны. Однако она приводит к увеличению твердости в данной зоне с 22,3 HRC до 30,6–30,7 HRC. Полученный прирост в 8,3–8,4 HRC является суммарным эффектом от упрочнения вследствие деформации и мартенситного превращения. На этом основании можно сделать вывод, что применение пластической деформации является перспективным для повышения

эффективности локального криогенного воздействия при механической обработке деталей типа «тел вращения» из аустенитной стали.

2.4 Способ механической обработке деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе предварительного локального криогенного воздействия

Вышеизложенный анализ подтверждает, что при воздействии пониженных температур и пластической деформации в структуре коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса осуществляется процесс структурного мартенситного превращения из γ -железа в α -железо [35, 91, 92]. В результате мартенситного превращения происходит изменение свойств материала, в частности, снижаются пластичность и ударная вязкость, следовательно, возрастает твёрдость, что приводит к повышению его хрупкости [42, 44, 71].

На этом основании предлагает применить способ механической обработки деталей типа «тел вращения» с устойчивыми сегментированием и дроблением сливной стружки на основе предварительного ЛКВ, который позволяет обеспечить повышение требуемого качества получаемых изделий из коррозионностойких и жаропрочных аустенитных материалов. Его сущность заключается в предварительном использовании устройства (см. рисунок 2.12), способствующего направленной подаче криоагента непосредственно на поверхность обрабатываемой заготовки [20, 60]. ЛКВ осуществляется в виде полосы контактного захолаживания, в пределах которой в поверхностном слое обрабатываемой заготовки протекает структурное мартенситное превращение с формированием метастабильной структуры, характеризующейся изменёнными физико-механическими свойствами. Сформированная локальная зона криогенного воздействия способствует созданию концентратора напряжений при пересечении с плоскостью резания, в результате, происходит устойчивое сегментирование и последующее равномерное дробление сливной стружки на отдельные элементы определенной длины [36, 45].

Основные этапы предлагаемого способа механической обработки резанием на основе предварительного ЛКВ представлены на рисунке 2.17 и описываются следующим образом.

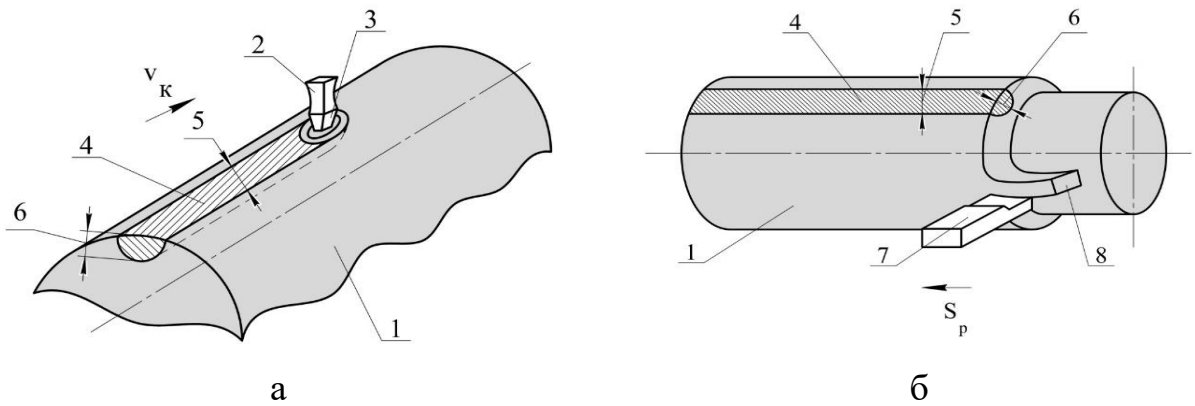


Рисунок 2.17 – Способ механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса (составлено автором): а – схема нанесения предварительного ЛКВ; б – схема процесса механической обработки с ЛКВ, где 1 – заготовка; 2 – устройство подачи жидким азотом; 3 – сопло устройства подачи жидкого азота; 4 – метастабильная структура; 5 – ширина упрочненной зоны; 6 – глубина упрочненной зоны; 7 – режущий инструмент; 8 – стружка

Первый этап способа определяется предварительной технологической подготовкой. Устройство подачи жидкого азота подводится под выбранным углом β° к локальной части поверхности обрабатываемой заготовки диаметром D_3 . Оно устанавливается на резцедержателе и настраивается таким образом, чтобы обеспечить необходимое расположение его контактного элемента с поверхностью обрабатываемой заготовки. В зависимости от геометрических параметров обрабатываемой заготовки и условий обработки локальная зона криогенного воздействия может формироваться различными способами с целью оптимизации процесса резания. При сообщении заготовке вращательного движения с частотой вращения шпинделя n и продольной подаче устройства подачи жидкого азота локальная зона обладает винтовой траекторией. При неподвижном шпинделе и продольной подаче устройства траектория зоны будет принимать прямую линию. Кроме того, для создания некоторых прямых линий локальной зоны криогенного воздействия необходимо после нанесения первой линии поворачивать шпиндель на заданный угловой шаг ω . Процесс нанесения воздействия повторяется последовательно для каждой новой позиции, что позволяет сформировать требуемое количество упрочнённых зон перед операцией резания.

Предварительная подготовка локальной поверхности обрабатываемой заготовки криогенным воздействием изображена на рисунке 2.17, *а*. Сопло устройства должно быть расположено на обрабатываемой поверхности с пятном контакта диаметром $d_{\text{п}}$ для обеспечения процесса структурного мартенситного превращения, глубина которого составляет от 0,3 до 0,5 величины глубины резания. Непрерывная подача криоагента осуществляется через сопло устройства посредством подаваемого давления (см. рисунок 2.13, *а*) на поверхностный слой обрабатываемой заготовки, что способствует формированию упрочненной зоны с метастабильной структурой шириной h_m и глубиной b_m , создавая в нём концентратор напряжений. Последующий этап называется процессом механической обработки резанием заготовки с созданной упрочненной зоной метастабильной структуры. При этом величина глубины резания t должна превышать глубину упрочненной зоны b_m . В результате формирует высокое локальное напряженно-деформационное состояние в упрочненной зоне при ее пересечении с режущей кромкой инструмента, что способствует устойчивому сегментированию и равномерному дроблению образующейся сливной стружки. Это позволяет предотвратить образование неконтролируемой длинной сливной стружки, которая усложняет эксплуатацию оборудования, её удаление, транспортировку и переработку. Формирование стружки контролируемой длины (в соответствии с ГОСТ 2787-75 – в диапазоне 100–200 мм) отвечает требованиям технологической эффективности и безопасности. Схема процесса механической обработки резанием обрабатываемой заготовки с предварительным (ЛКВ) показана на рис. 2.17, *б*.

Прохождение режущей кромки через упрочненную мелкозернистую зону приводит к сегментированию и дроблению сливной стружки на элементы равной длины L_B . Данный процесс представлен на рисунке 2.18.

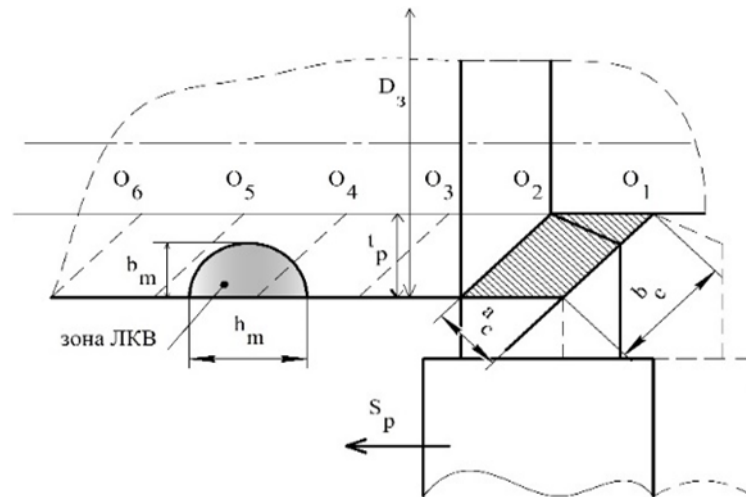


Рисунок 2.18 – Схема взаимного расположения зоны локального криогенного воздействия и области поперечного срезаемого слоя стружки (составлено автором), где S_p – подача резания; t – глубина резания; D_3 – диаметр заготовки; b_m – глубина упрочненной зоны; h_m – ширина упрочненной зоны; a_c – толщина срезаемого слоя; b – ширина срезаемого слоя

2.5 Кинематика процесса механической обработки аустенитной стали на основе предварительного локального криогенного воздействия

В процессе механической обработки резанием деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса с предварительно нанесенным ЛКВ для достижения технологической эффективности необходимо одновременное выполнение двух условий: обеспечения устойчивости процесса резания и получения стружки рациональной (контролируемой) длины [43, 45].

В зависимости от геометрии заготовки (в частности, диаметра D_3 , мм), скорости резания $V_{рез}$, м/мин и длины контролируемой стружки $L_{пр}$, мм, частота пересечения плоскостью резания с упрочненной зоной ЛКВ вычисляется по следующему соотношению (2.2):

$$f_p = \frac{\pi D_3 n}{60 L_{пр} \xi} = \frac{1000 V_{рез}}{60 L_{пр} \xi}, \text{Гц} \quad (2.2)$$

где ξ – коэффициент усадки стружки; n – частота вращения, мин^{-1} .

На рисунке 2.20 представлена разверстка заготовки, подвергнутой ЛКВ, траектория которого определяется линией A_1A_2 . А линии B_1B_2 , B_3B_4 и B_5B_6

отражают направление плоскости резания, которое в процессе резания последовательно пересекает линию ЛКВ A_1A_2 в точках $C_1, C_2, C_3, \dots, C_i$.

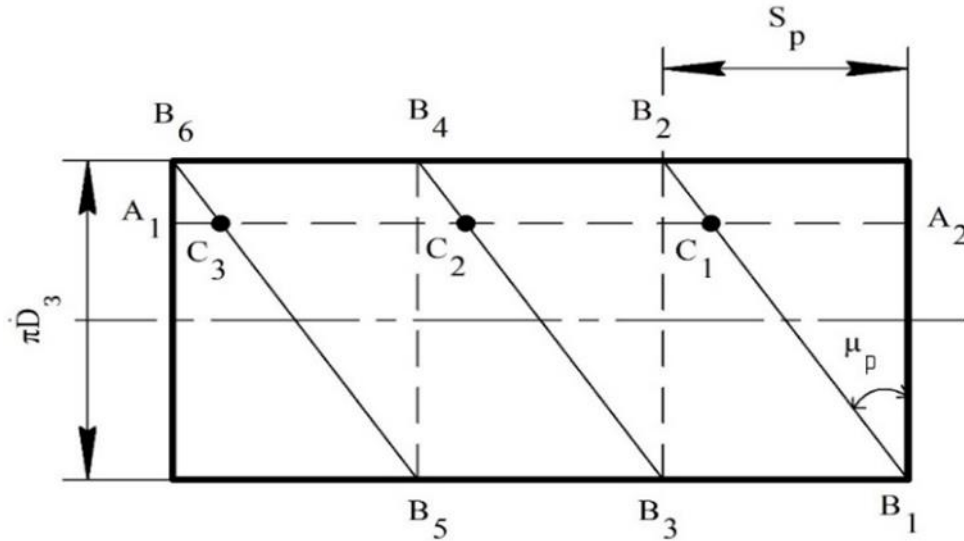


Рисунок 2.19 – Кинематическая схема процесса точения с локальным криогенным воздействием на обрабатываемый материал (составлено автором)

При этом длина отрезков образующейся стружки при ЛКВ будет равна (2.3):

$$L_{\text{пр}} = C_1B_2 + B_3C_2 = C_2B_4 + B_5C_3 = B_1B_2 = \frac{A_2B_2}{\sin \mu_p} = \frac{S_p}{\sin \mu_p}, \text{ мм} \quad (2.3)$$

Следовательно, частота f_p рассчитывается по формуле (2.4):

$$f_p = \frac{\pi D_3 n}{60 L_{\text{пр}} \xi} = \frac{\pi D_3 n \sin \mu_p}{60 S_p \xi}, \text{ Гц} \quad (2.4)$$

Длину отрезков витой стружки L_B , мм, рассчитывается по следующим образом (2.5):

$$L_B = \frac{L_{\text{пр}} h_c}{\pi d_c} = \frac{S_p h_c}{\pi d_c \sin \mu_p}, \text{ мм} \quad (2.5)$$

где h_c — шаг витка стружки, мм; d_c — диаметр витка стружки, мм.

В процессе механической обработки резанием плоскость резания пересекает срезаемый объем стружки с нанесенным объемом зоны ЛКВ, развертка которого представлена на рисунке 2.20.

В результате кинематического анализа было установлено, что поперечное сечение зоны ЛКВ аппроксимируется полуэллипсом с большой осью h_m и малой осью b_m . Исходя из этого площадь поперечного сечения зоны ЛКВ рассчитывается по формуле (2.6):

$$F_m = \frac{\pi b_m h_m}{4}, \text{ мм}^2 \quad (2.6)$$

Объем зоны ЛКВ за 1 оборот вращения заготовки рассчитывается по следующей зависимости (2.7):

$$W_m = F_m S_p = \frac{\pi b_m h_m S_p}{4}, \text{ мм}^3 \quad (2.7)$$

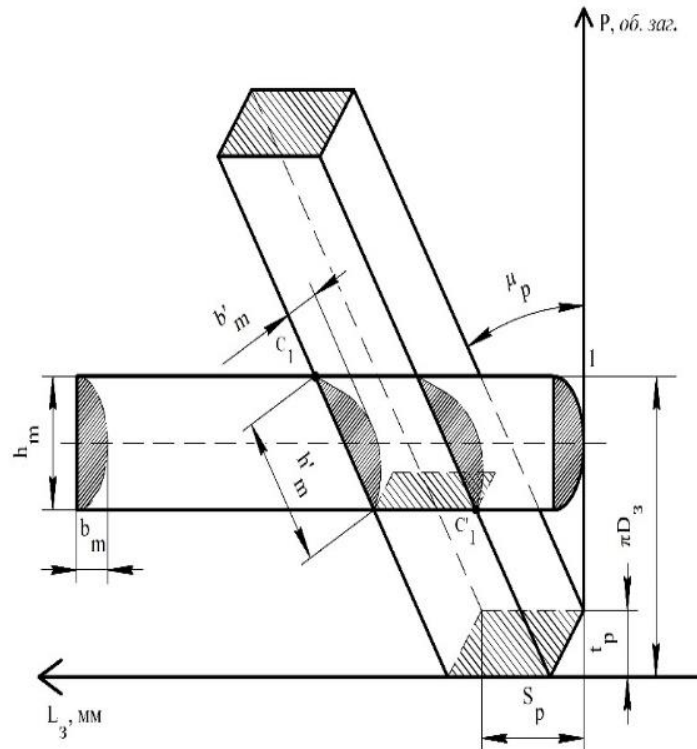


Рисунок 2.20 – Развертка процесса точения с локальным криогенным воздействием (составлено автором), где: L_3 – длина заготовки; b'_m – глубина объема зоны ЛКВ при пересечении с зоной срезаемой стружки; h'_m – ширина объема зоны ЛКВ при пересечении с зоной срезаемой стружки; C_1 – точка входа вершины режущей кромки в зону ЛКВ; C'_1 – точка выхода вершины режущей кромки из зоны ЛКВ

Процесс стружкообразование осуществляется при механической обработки резанием без ЛКВ с следующими режимными параметрами: скорость резания $V_{рез}$, м/мин, продольная подача S_p , мм и глубина резания t , угол в плане в плане φ . Срезаемый слой заготовки имеет толщину a_c и ширину b_c , которые определяются по следующими соотношениями (2.8 – 2.9):

$$a_c = S_p \sin \varphi, \text{ мм} \quad (2.8)$$

$$b_c = \frac{t}{\sin \varphi}, \text{ мм} \quad (2.9)$$

Площадь поперечного сечения срезаемого слоя определяется как произведение его толщины на ширину и рассчитывается по формуле (2.10):

$$F_c = a_c b_c = S_p t, \text{ мм}^2 \quad (2.10)$$

Объем срезаемого слоя (стружки) за один оборот определяется следующим выражением (2.11):

$$W_{\text{стр}} = \frac{F_c S_p}{\sin \varphi} = \frac{S_p^2 t}{\sin \varphi}, \text{ мм}^3 \quad (2.11)$$

В момент пересечения с плоскостью резания упрочненной зоны возникает концентратор напряжений для обеспечения дробления стружки. Соответственно, объём стружки с изменёнными по сечению свойствами в зоне ЛКВ представлен на рисунке 2.20

Глубина и ширина объема зоны ЛКВ при пересечении с зоной срезаемой стружки вычисляются по формулам (2.12 – 2.13):

$$b'_m = b_m \cos \varphi, \text{ мм} \quad (2.12)$$

$$h'_m = h_m \cos \mu_p, \text{ мм} \quad (2.13)$$

При этом объем зоны ЛКВ равен (2.14):

$$W'_m = \frac{\pi b_m h_m S_p}{4 \cos \varphi}, \text{ мм}^3 \quad (2.14)$$

Объем стружки с изменёнными свойствами $W'_{\text{стр}}$, образующийся при пересечении объема снимаемой стружки с объемом зоны ЛКВ, рассчитывается следующим образом (2.15):

$$W'_{\text{стр}} = \frac{F'_c S_p}{\sin \varphi} = \frac{a_c b'_m S_p}{\sin \varphi} = \frac{S_p \sin \varphi b_m \cos \varphi S_p}{\sin \varphi} = S_p^2 b_m \cos \varphi, \text{ мм}^3 \quad (2.15)$$

Соотношение между объемом зоны локального воздействия (2.14) и общим объёмом стружки (2.15) составляет (2.16):

$$\frac{W'_m}{W'_{\text{стр}}} = \frac{\frac{\pi b_m h_m S_p}{4 \cos \varphi}}{S_p^2 b_m \cos \varphi} = \frac{\pi h_m}{4 S_p (\cos \varphi)^2} \quad (2.16)$$

Соотношение между объемом исходного материала заготовки и объемом материала, подвергнутого ЛКВ, обеспечивает стабильное и эффективное периодическое изменение напряженно-деформированного состояния в зоне резания. Именно это изменение условий деформирования способствует устойчивому сегментированию и дроблению стружки при механической обработке деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе ЛКВ.

2.6 Выводы по Главе 2

1. Установлено, что при криогенной обработке в поверхностном слое обрабатываемой заготовки из стали 08X18H10T происходит структурное мартенситное превращение из γ -железа в α -железо, которое создает метастабильную структуру в области снимаемого припуска, позволяющую изменить механические свойства по сравнению с исходной структурой изделия.

2. Определены режимные параметры криогенной воздействия и пластической деформации на формирование зоны с метастабильной структурой в области снимаемого припуска, которые соответствуют оптимальным значениям остаточных напряжений, позволяющих обеспечить устойчивое сегментирование и дробление сливной стружки.

3. В соответствии с установленными закономерностями и параметрами криогенной обработки, и последующего пластического деформирования на структуру и свойства коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса был разработан способ механической обработки резанием деталей типа «тел вращения» с дроблением стружки на основе ЛКВ (патент на изобретение № 2804202).

4. Для реализации разработанного способа была создана специализированная установка ТСМО с регулируемым устройством подачи жидкого азота, предназначенное для осуществления ЛКВ, на снимаемый припуск поверхности по круговой и прямолинейной схеме, параллельной оси обрабатываемой заготовки, обеспечивающая формирование метастабильной структуры в поверхностном слое.

ГЛАВА 3 ДИНАМИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ТСМО ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ» ИЗ СТАЛИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА НА ОСНОВЕ ЛОКАЛЬНОГО КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Долговечность изделий из коррозионностойких и жаропрочных сталей аустенитного класса и их эксплуатационные характеристики в значительной мере определяются качеством поверхностного слоя, технологически достигаемым при их механической обработке. Качество поверхности изделия, и в первую очередь ее шероховатость, зависят существенно от формирования автоколебаний, возникающих в процессе механической обработки резанием. Автоколебания могут приводить к увеличению шероховатости и неравномерности поверхности, что непосредственно сказывается на качестве и соответствии техническим требованиям конечного продукта [29, 37, 73].

Автоколебания представляют собой нежелательные колебательные процессы, возникающие при взаимодействии компонентов технологической системы механической обработки (далее, ТСМО) (станков, режущих инструментов, заготовок) в ходе механической обработки изделий из аустенитной стали. Основными причинами возникновения автоколебаний в ТСМО могут являться: нестабильность движения режущего инструмента, недостаточная жесткость конструкции станка, динамическое взаимодействие между режущим инструментом и обрабатываемым материалом и другие факторы [28, 30, 69, 73]. Переход от автоколебаний к неустойчивому состоянию в системе ТСМО представляет собой сложное физическое явление, обусловленное взаимодействием внутренних и внешних сил системы. При достижении критической амплитуды колебаний энергия, необходимая для их поддержания, генерируется в результате работы отдельных элементов системы, формируя замкнутый контур. В отсутствие мер контроля такие колебания могут выйти за пределы управляемости, что приведет к дестабилизации системы и значительному ухудшению качества изделий.

Математические моделирования состояний эквивалентной ТСМО позволяют оценить качества поверхностного слоя получаемого изделия посредством

определения влияний неустойчивых автоколебательных процессов ТСМО деталей типа «тел вращения».

При построении математической модели ТСМО, основные задачи включают следующие этапы:

- в соответствии с координатными (внутренними) связями необходимо подобрать требуемую априорную модель ТСМО станка;
- экспериментально определить динамические параметры каждой подсистемы априорной модели ТСМО станка
- на основании полученных динамических параметров модели ТСМО станка выявить имеющую высокую чувствительность к автоколебательным процессам;
- установить взаимосвязь между подсистемами через процесс стружкообразования
- определить и аппроксимировать нелинейные дифференциальные уравнения, характеризующие динамический процесс ТСМО станка.

Формирование упрочнённой зоны с метастабильной структурой в поверхностном слое обрабатываемой заготовки за счёт применения способ криогенной обработки приводит к изменению физико-механических свойств материала и, как следствие, условий его резания, следовательно, снижению амплитуды автоколебательных процессов ТСМО деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса. В связи с этим, при разработке математических моделей ТСМО следует учитывать характеристики формируемой локальным криогенным воздействием упрочненной зоны с метастабильной структурой за счет изменения упругопластического состояния в рабочем процессе обработки, что обеспечивает управление периодическими изменениями механических свойств в области перехода от исходного материала в упрочненную зону метастабильной структуры и наоборот, а также переустановить «динамические настройки» системы ТСМО.

После построения эквивалентной математической модели ТСМО деталей типа «тел вращения» в условиях ЛКВ необходимо выполнить: подбор метода решение системы линейных дифференциальных уравнений и имитационное моделирование при помощи программной среды для реализации выбранного метода

Целью имитационного моделирования программной средой является получение виртуальных виброграмм, характеризующих динамические характеристики ТСМО деталей типа «тел вращения» с ЛКВ. Полученные виртуальные виброграммы позволяют построить границу области устойчивости процесса механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе ЛКВ и без него.

3.1 Построение математической модели эквивалентной технологической системы механической обработки деталей типа «тел вращения»

Согласно современным представлениям, отраженным в ряде отечественных и зарубежных исследований [37, 67, 75], ТСМО можно адекватно описать эквивалентной моделью и представить в виде парциальных инерционно-диссипативно-упругих элементов, которые взаимосвязаны между собой через рабочий процесс (стружкообразование). Наиболее значимыми элементами в замкнутой ТСМО, влияющие на автоколебательный процесс и соответственно качество поверхности изделия, являются подсистемы «режущий инструмент» – «заготовка». В качестве динамических показателей поведения ТСМО станка выступают амплитудно-частотные характеристик, которые определяются комплексом параметров, включая приведенные массы, упругие силы, силы сопротивления (демпфирования) каждой упругой подсистемы, а также связи между обобщёнными координатами системы с множеством степеней свободы [47, 48, 75].

Рабочий процесс является результатом силовых воздействий, возникающих при взаимодействии у подсистем ТМСО «станка – заготовки – инструмента – приспособление. Относительное смещение подсистем ТСМО, возникающее при любом силовом воздействии на упругий элемент подсистемы, формирует «подвижное соединение». Априорная модель является автономной и замкнутой из-за взаимодействия подсистем в рамках рабочего процесса, что способствует постоянной генерации механической энергии, обеспечивающей поддержание автоколебательного процесса ТСМО деталей типа «тел вращения».

Сила резания, вызываемая при процессе стружкообразования и сила трения, определяющаяся от дискретного характера протекания фаз процесса

стружкообразования, представляет собой параметры рабочего процесса ТСМО [12, 13, 41]. Однако, сила резания и сила трения является распределенными силами, а не сосредоточенными, следовательно, затрудняют решить задачи построения априорной математической модели ТСМО станка. Необходимо перевести существующую у взаимодействующих подсистем и рабочего процесса динамическую характеристику взаимодействия к соотношению действующих сил от перемещения тел (подсистем). Неустойчивое состояние ТСМО станка может возникать при изменении динамических характеристик системы за счет перераспределения энергии (рассеивания энергии, или концентрации энергии) в замкнутом цикле, которое является результатом изменения рабочих процессов ТСМО станка.

Наличие обобщенных координатных (внутренних) связей, вдоль которых воздействуют силы, представляет собой особенность имеющих множество степеней свободы упругих подсистем [37, 69]. Данные взаимосвязи отражаются в изменении толщины снимаемого слоя обрабатываемой заготовки посредством воздействия распределенной силы резания на режущий инструмент. Координаты перемещений в рассматриваемой системе одновременно выступают в качестве входных параметров рабочего процесса и выходных параметров упругих подсистем.

При построении эквивалентной модели ТСМО необходимо учитывать следующие основные виды взаимосвязей:

- статические взаимосвязи. Статические взаимосвязи проявляются при смещении сосредоточенной массы, которое складывается из деформаций связанных с ней упругих элементов. Эти связи возникают, когда направление вектора действующей силы не совпадает с главными осями жесткости упругой подсистемы.

- скоростные взаимосвязи обусловлены скоростью изменения обобщенных координат и рассматриваются как силы сопротивления. Их особенность заключается во взаимном влиянии: изменение силы сопротивления по одной обобщенной координате вызывает изменение силы неупругого сопротивления по

другой. Этот перекрестный эффект и приводит к образованию скоростных взаимосвязей в системе.

- динамические взаимосвязи, включающие инерционные. Инерционные взаимосвязи, определяющиеся второй производной координаты по времени, возникают в упругих системах из-за наличия множества инерционных элементов/масс и несовпадения точек приложения равнодействующей силы инерции и центра жесткости системы. Важной особенностью является то, что решение нелинейных дифференциальных уравнений имеющие инерционные динамические взаимосвязи рассчитываются как координатные [10, 28].

С учётом совокупности рассмотренных факторов априорная модель ТСМО станка представляет собой сложную многоуровневую структуру, включающую значительное число независимых обобщённых координат (степеней свободы) и совокупность взаимосвязанных упругих подсистем. Описание взаимосвязей подсистем осуществляется посредством параметров, включающих приведенную массу m , коэффициент жесткости c и коэффициент сопротивления b , представлено на рисунке 3.1.

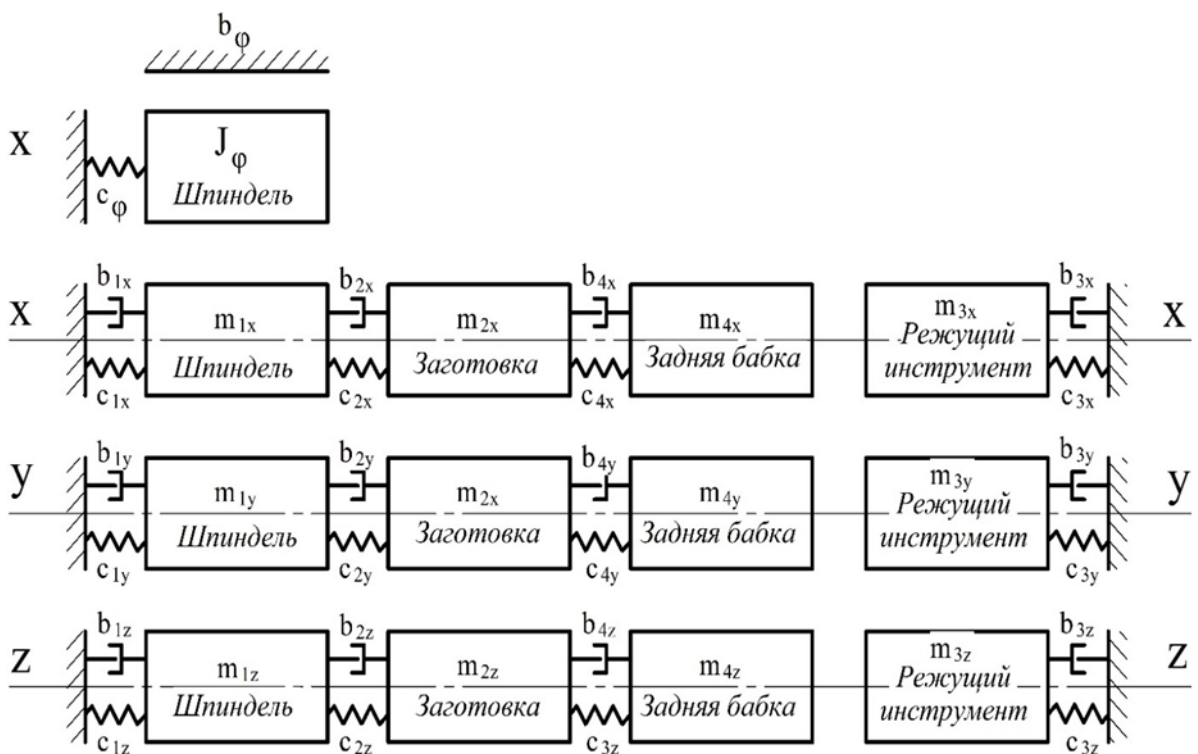


Рисунок 3.1 – Априорная модель технологической системы механической обработки станка (составлено автором)

В таблице 3.1 приведены параметры/характеристики упругих подсистем с целью последующего изучения, построения и упрощения априорной модели ТСМО токарно-винторезного станка модели *JET GHB 1340A DRO*, технические характеристики которого представлены в таблице Б.1 Приложения Б.

Сформированная априорная модель позволяет описывать замкнутую технологическую систему наличием большого числа независимых обобщённых переменных, соответствующих своей собственной парциальной частоте собственных колебаний. Ключевым этапом в анализе амплитуд автоколебаний является переход от априорной многокоординатной модели ТСМО к эквивалентной расчётной схеме. Этот переход основывается на выделении доминирующих колебательных контуров путём идентификации собственных парциальных частот. Степени свободы, чьи частоты лежат вне диапазона основных частот системы, могут быть исключены как не оказывающие существенного влияния на формирование автоколебательных режимов [37, 47].

Таблица 3.1 – Динамические параметры упругих подсистем ТСМО токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A* (по данным автора)

Подсистемы ТСМО станка	Параметры			
	Координаты	Приведенная масса	Коэффициент жесткости	Коэффициент сопротивления
Шпиндель	x	m_{1x}	c_{1x}	b_{1x}
	y	m_{1y}	c_{1y}	b_{1y}
	z	m_{1z}	c_{1z}	b_{1z}
Заготовка	x	m_{2x}	c_{2x}	b_{2x}
	y	m_{2y}	c_{2y}	b_{2y}
	z	m_{2z}	c_{2z}	b_{2z}
Режущий инструмент	x	m_{3x}	c_{3x}	b_{3x}
	y	m_{3y}	c_{3y}	b_{3y}
	z	m_{3z}	c_{3z}	b_{3z}
Задняя бабка	x	m_{4x}	c_{4x}	b_{4x}
	y	m_{4y}	c_{4y}	b_{4y}
	z	m_{4z}	c_{4z}	b_{4z}
Крутильная система	-	J	c_{φ}	b_{φ}

Измерительный комплекс на базе платформы NI CompactRIO (рисунок 3.2) предназначен для изучения собственных затухающих колебаний деталей типа «тел

вращения» в составе ТСМО. Измерения проводятся методом импульсного возбуждения с последующей регистрацией и обработкой сигнала. Комплекс включает в себя: контроллер; модули ввода-вывода CompactRIO; высокочувствительные пьезоэлектрические акселерометры для регистрации колебаний в диапазоне от 1 Гц до 25 кГц; персональный компьютер со специализированным ПО LabVIEW, обладающим расширенными возможностями приема, графической визуализации и обработки полученных данных о затухающих колебаниях [67].



Рисунок 3.2 – Измерительный прибор NI CompactRIO, соединённый с персональным компьютером с установленной средой LabVIEW для приема и обработки значения собственных затухающих колебаний (фото автора)

Компактные высокочувствительные пьезоэлектрические акселерометры устанавливались на измерительной подсистеме до начала выполнения измерительного процесса с магнитным способом крепления и обеспечивают снимать вибрационные перемещения в трех направлениях действия основных составляющих сил резания P_x , P_y , P_z .

Использование импульсного молотка позволило осуществлять ударное воздействие для измерения возбуждения колебательного процесса в каждой подсистеме ТСМО деталей типа «тел вращения», которое является входным сигналом у модулей ввода-вывода, при которых выполнялась их обработка с использованием специализированного программного обеспечения.

Для измерения собственных затухающих колебаний упругих подсистем ТСМО было проведено снятие в 5 последовательных раз. По результатам

измерений значение собственной затухающей частоты f_c определяется следующим образом (3.1):

$$f_c = \frac{N}{T} \quad (3.1)$$

где N – количество полных колебаний, T – период колебаний.

В таблице 3.2 представлены результаты измерений частот и логарифмических декрементов собственных затухающих колебаний токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A DRO* в определенных направлениях действия основных сил резания x , y и z .

Таблица 3.2 – Частота и логарифмический декременты собственного затухающего колебания упругих подсистем ТСМО токарно-винторезного станка JET GHB 1340A DRO (по данным автора)

Узлы станка	Координаты	f_c , Гц	$\pm f_c$, Гц	λ	$\pm \Delta \lambda$
Шпиндельный узел	x	161	5	0.36	0.03
	y	380	15	0.35	0.05
	z	155	4	0.40	0.04
Заготовка	x	316	10	0.39	0.04
	y	132	4	0.30	0.02
	z	125	5	0.35	0.02
Режущий инструмент	x	132	3	0.34	0.06
	y	86	3	0.42	0.05
	z	81	2	0.26	0.04
Задняя бабка	x	157	7	0.36	0.05
	y	368	10	0.33	0.06
	z	153	5	0.46	0.03
-	Частота вращения n, мин⁻¹	f_c, Гц	$\pm f_c$, Гц	λ	$\pm \Delta \lambda$
Привод главного движения	300	145	6	0.35	0.03
	460	132	4	0.49	0.04
	750	128	5	0.50	0.04
	1250	122	5	0.58	0.05
	2000	117	3	0.63	0.06

Также необходимо рассчитать значение логарифмического декремента λ (3.2):

$$\lambda = \frac{\ln \frac{A_i}{A_{i+N}}}{N} \quad (3.2)$$

где A_i и A_{i+n} – амплитуды колебаний, отстающих друг от друга на количество периодов, m .

Согласно ГОСТу 18097-93 с диаграммой «нагрузка – перемещение» жёсткости каждой упругой подсистемы ТСМО токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A DRO* измеряются статическим методом по направлениям трёх основных составляющих сил резания P_x , P_y , P_z . На рисунках 3.3 и 3.4 представлены схемы измерения жёсткости упругих подсистем «заготовка» и «режущий инструмент» ТСМО [10; 29, 74]

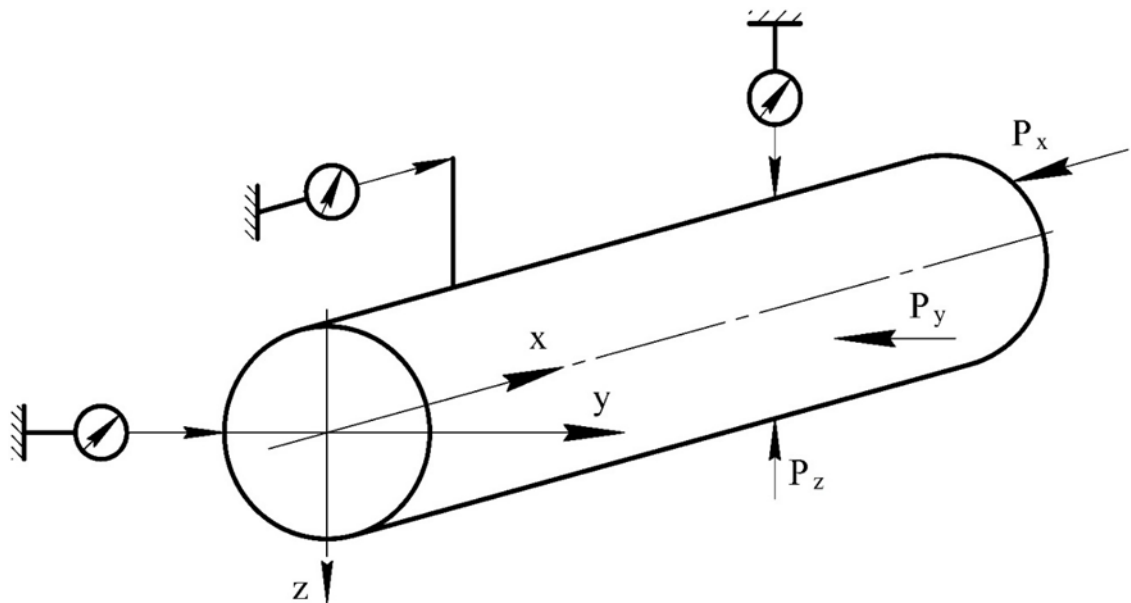


Рисунок 3.3 – Схема измерения по трём координатным осям жёсткости подсистемы «заготовка» (составлено автором)

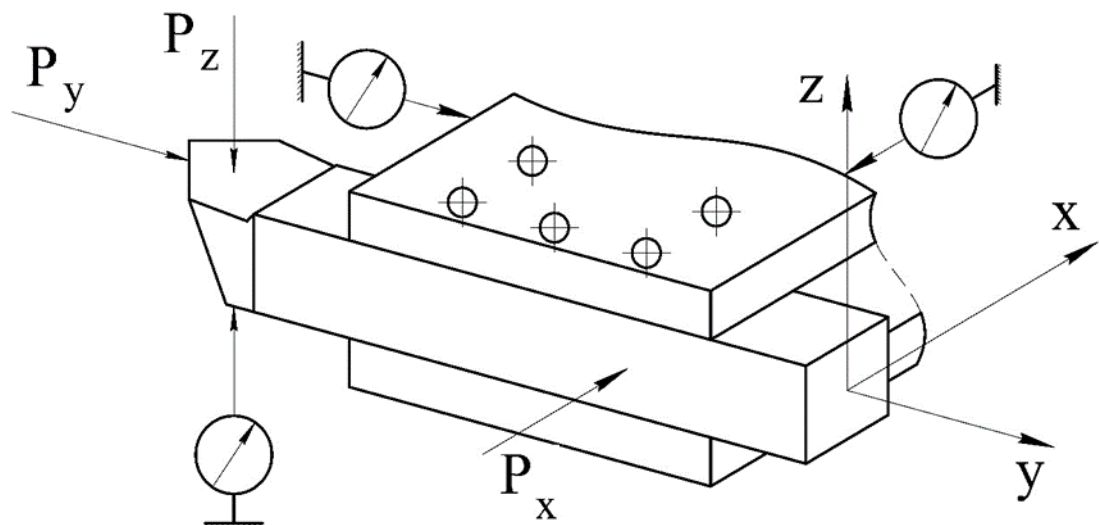


Рисунок 3.4 – Схема измерения по трём координатным осям жёсткости подсистемы «режущий инструмент» (составлено автором)

Таким образом, для определения значения коэффициента жёсткости упругих подсистем ТСМО станка c , МН/м, используется следующую формулу (3.3):

$$c = \frac{P}{\delta}, \quad (3.3)$$

где P – нагрузка, Н, δ – перемещение, м.

Измерение крутильной жёсткости привода главного движения проводится методом статического закручивания. При зафиксированном роторе электродвигателя на оправке закрепляется специальный поводок, а вращение шпинделя осуществляется в диапазоне от 300 до 2000 мин⁻¹ (рисунок 3.5).

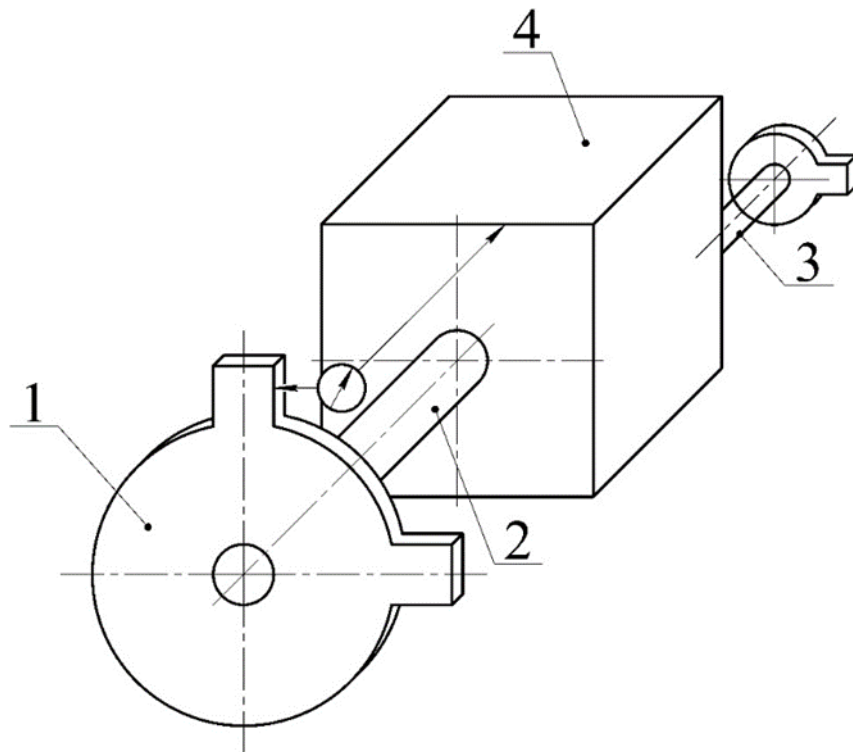


Рисунок 3.5 – Схема измерения крутильной жёсткости подсистемы «шпиндель», где: 1 –поводок; 2 – шпиндель; 3 – ротор двигателя; 4 – коробка скоростей (составлено автором)

Угол закручивания φ определяется по показаниям индикатора и рассчитывается по приведённой формуле (3.4):

$$\varphi = \sin^{-1} \frac{\mu}{L}, \quad (3.4)$$

где: μ – показания индикатора, L – плечо поводка.

Следовательно, коэффициент крутильной жёсткости c_φ , кН.м/рад, определяется по выражению (3.5):

$$c_{\varphi} = \frac{P - P_0}{\varphi}, \quad (3.5)$$

где c_{φ} – коэффициент крутильной жесткости, P_0 – нагрузка, Н.

Стоит отметить, что при оценке жесткости элементов станка учтено влияние температурного фактора окружающей среды. В связи с этим, все экспериментальные исследования выполнялись в условиях, максимально приближенных к реальной эксплуатации, на технологическом оборудовании, предварительно прогревом в течение трёх часов непрерывной работы.

В дальнейшем этапе рассчитывались значения приведенной массы m , кг и моменты инерции J , кг.м² по следующим соотношениям (3.6 – 3.7):

$$m = \frac{c}{(2\pi f_c)^2} \quad (3.6)$$

$$J = \frac{c_{\varphi}}{(2\pi f_c)^2} \quad (3.7)$$

Коэффициенты сопротивления каждой подсистемы b , кНс/м и крутильной системы b_{φ} , Н.м.с ТСМО станка определяются следующими выражениями (3.8 – 3.9):

$$b = 2 \cdot \lambda \cdot f_c \cdot m \quad (3.8)$$

$$b_{\varphi} = 2 \cdot \lambda \cdot f_c \cdot J \quad (3.9)$$

Рассчитанные величины коэффициента жесткости c , приведенной массы m , и коэффициента сопротивления b каждой подсистемы ТСМО токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A DRO* приведены в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Результаты измерения параметров упругих подсистемы ТСМО токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A DRO* (по данным автора)

Узлы станка	Координаты	Параметры		
		Жесткость упругих подсистем c , МН/м	Приведенная масса подсистем m , кг	Коэффициент сопротивления b , кНс/м
Шпиндельный узел	x	113,5	110,9	12,9
	y	270,3	47,4	12,6
	z	109,8	115,8	14,4
Заготовка	x	175,3	76,2	8,4
	y	52,4	44,5	7,8
	z	51,7	83,8	7,3

Продолжение Таблицы 3.3

Узлы станка	Координаты	Параметры		
		Жесткость упругих подсистем c , МН/м	Приведенная масса подсистем m , кг	Коэффициент сопротивления b , кНс/м
Режущий инструмент	x	66,7	96,9	8,7
	y	18,3	62,7	4,5
	z	20,1	77,6	3,2
Задняя бабка	x	140,1	144,0	16,2
	y	247,3	46,2	11,2
	z	119,5	129,3	18,2
-	Частота вращения n , мин ⁻¹	Крутильная жесткость c_φ , кНм/рад	Момент инерции J , кг.м ²	Коэффициент сопротивления b_φ , Нмс
Крутильная система	300	175,2	0,21	21,4
	460	80,5	0,12	15,1
	750	46,4	0,07	9,2
	1250	18,1	0,03	4,4
	2000	10,3	0,02	2,8

Анализ априорной модели ТСМО станка с учётом значений ранее определённых параметров показывает, что степень свободы по направлению оси x может быть исключена, поскольку величины приведенной массы m , коэффициента жесткости c и коэффициента сопротивления b всех упругих подсистем в этом направлении являются наибольшими, что способствует снижению их влияния на перемещение режущего инструмента.

Анализ полученных значений параметров собственных затухающих колебаний, а также логарифмического декремента крутильной подсистемы ТСМО свидетельствует о её выраженной демпфирующей способности в диапазоне рабочих частот шпинделя. В связи с этим влияние данной подсистемы на колебательную динамику станка для обработки деталей типа «тел вращения» признано пренебрежимо малым, что позволило исключить крутильный контур из модели. В результате была получена эквивалентная (упрощённая) динамическая схема ТСМО (рисунок 3.6).

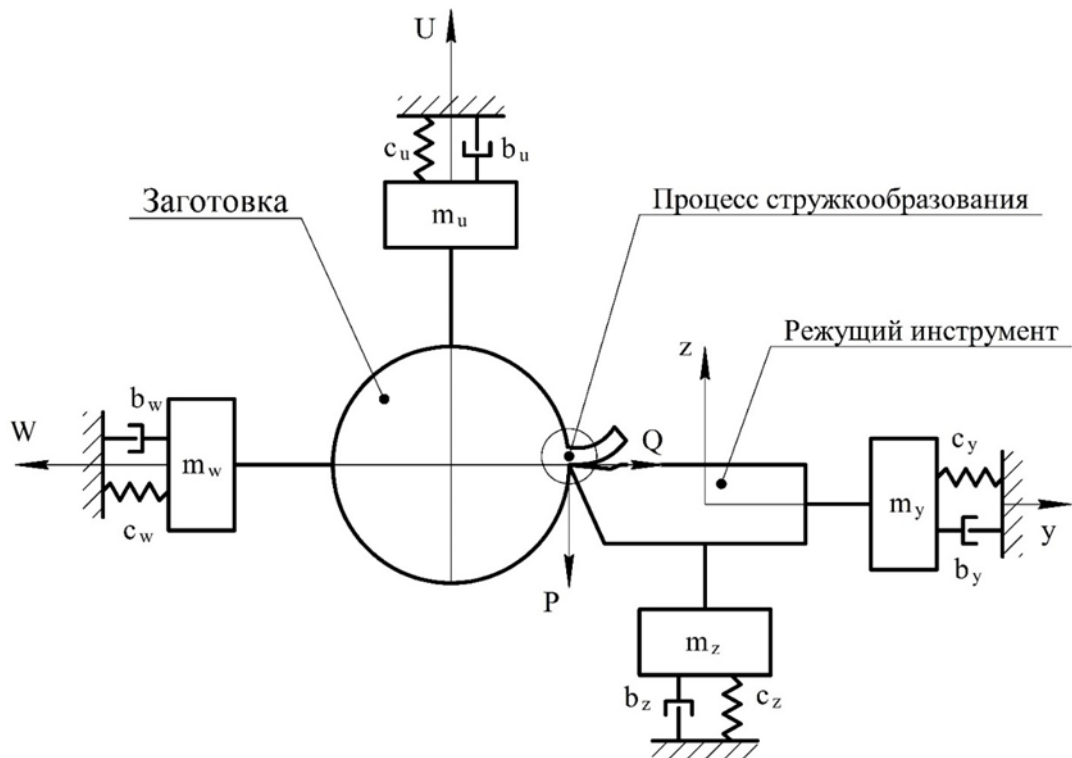


Рисунок 3.6 – Эквивалентная динамическая модель ТСМО деталей типа «тел вращения» (составлено автором), где P – силы резания, Н; Q – сила трения, Н; m_y, m_z – приведенные массы подсистемы «режущий инструмент», кг; m_u, m_w – приведенные массы подсистемы «заготовка», кг; c_y, c_z, c_u, c_w – коэффициенты жесткости, МН/м; b_y, b_z, b_u, b_w – коэффициенты сопротивления, кНс/м

Разработанная эквивалентная модель ТСМО деталей типа «тел вращения» характеризуется наличием четырёх степеней свободы, которые описывают динамическое поведение упругой подсистемы «режущий инструмент» и «заготовка». При этом взаимодействие указанных подсистем реализуется посредством рабочего процесса резания и координатных связей между соответствующими обобщёнными переменными.

3.2 Составление системы уравнений движения эквивалентной технологической системы механической обработки деталей типа «тел вращения» с учетом процесса стружкообразования

В целях осуществления корректного исследования динамических процессов в технологической системе станочного оборудования требуется выполнить два взаимосвязанных условия. Во-первых, необходимо окончательно сформировать

систему уравнений движения эквивалентной модели ТСМО. Во-вторых, требуется описать процесс упругопластической деформации стружки при обработке деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных аустенитных материалов с применением локального криогенного воздействия. Дополнительно при построении модели необходимо учесть запаздывание силы резания P_z относительно смещения инструмента и силы трения Q относительно силы P_z , а также постоянные времени и коэффициенты передачи соответствующих динамических звеньев [74].

Математическое описание пластической деформации срезаемого металла требует особого внимания, поскольку существующие модели [47, 48] представляют стружкообразование как установившийся процесс пластической деформации, что не позволяет адекватно оценить динамические характеристики ТСМО станка [12]. Изменение физико-механических свойств и структуры материала аустенитного класса при криогенном воздействии существенно оказывают влияние на динамические характеристики, что учитывается через процесс стружкообразования.

Для построения математической модели ТСМО деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия процесс стружкообразования может быть разделён на две стадии: формирование первичной упругопластической деформации и стадию интенсивной пластической деформации срезаемого слоя [74].

На рисунке 3.7 изображена стадия первичной упругопластической деформации, при которой взаимодействие режущего инструмента 3 с зоной стружкообразования 2 вызывает силу резания P_z по направлению оси z и силу трения Q по направлению оси y , следовательно, приводит к возникновению нормальных сжимающих σ_1 , σ_2 , и касательных τ_1 , τ_2 напряжений на соответствующих поверхностях OA и BO .

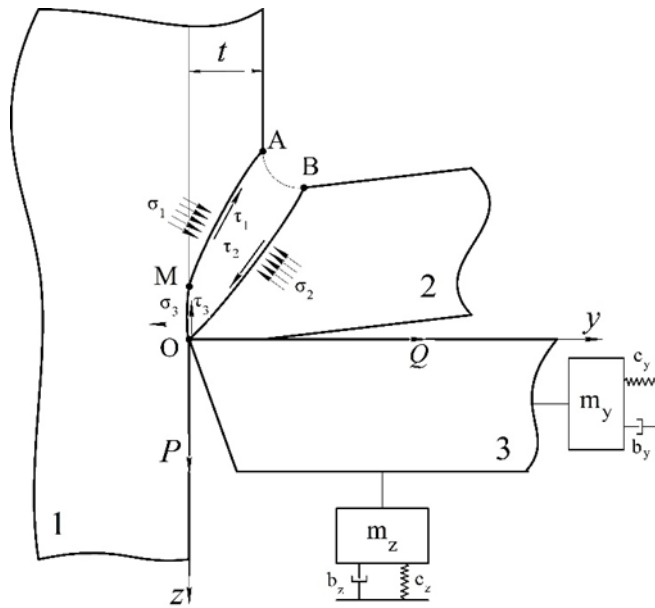


Рисунок 3.7 – Стадия первичной упругопластической деформации процесса стружкообразования при МО деталей типа «тел вращения», где: 1 – заготовка; 2 – стружка; 3 – режущий инструмент; t – глубина резания (составлено автором)

Напряжения τ_3 возникают за счет смещения режущего инструмента с расстоянием Δz вдоль оси z , и при достижении предела прочности материала ведет к образованию трещины. Дальнейшее движение инструмента вызывает ее раскрытие и формирование свободных от напряжений σ_3 и τ_3 поверхностей, что обеспечивает повышенную пластическую деформацию в зоне OAB под углом сдвига β_1 и β_2 . В результате зерна материала изменяют форму с округлой на эллиптическую под сдвиговыми деформациями, происходит отделение деформированного слоя и образование сливной стружки (рисунок 3.8).

Запаздывание в изменение силы резания P_z обусловлено перемещением режущего инструмента в направлениях z и y на величины Δz и Δy , что в свою очередь, вызывает запаздывание силы трения Q . В итоге ведет к возникновению автоколебания в замкнутой системе.

Процесс механической обработки с несколькими фазами деформации описывается математически с использованием упрощающих допущений и аппроксимации, что позволяет рассматривать его как непрерывный [73]. При этом длины запаздывания l_p и l_q по направлениям Δz и Δy считаются постоянными

Расчёт равнодействующей силы резания выполняется по формуле (3.14):

$$P_{\text{рез}} = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad (3.14)$$

где $P_{\text{рез}}$ – равнодействующая сила резания, Н; P_x , P_y , P_z – составляющие силы резания в направлениях осей x , y , z , Н

Сила трения находится в прямой зависимости от силы резания и определяется следующим соотношением (3.15):

$$Q_{\text{тр}} = f P_{\text{рез}}, \quad (3.15)$$

где $Q_{\text{тр}}$ – сила трения, Н; f – коэффициент трения.

Существующее описание рабочих процессов требует уточнения, поскольку используемые формулы основаны на эмпирических данных. Для повышения адекватности модели их необходимо преобразовать к следующему виду (3.16 – 3.17):

$$\Delta P(t) = P_{\text{рез}} y(t), \quad (3.16)$$

$$\Delta Q(t) = f \Delta P(t), \quad (3.17)$$

С учётом временных сдвигов эти соотношения для произвольного момента времени принимают вид (3.18):

$$\begin{cases} P(t + \tau_P) = -P_{\text{рез}} y \equiv \Delta P(t) \\ Q(t - \tau_Q) = f P(t) \equiv \Delta Q(t) \end{cases} \quad (3.18)$$

Линейную составляющую системы (3.18) разложить в ряд Тейлора, что позволяет определить значения времени запаздывания τ_P и τ_Q через величины динамических составляющих сил ΔP и ΔQ (3.19 – 3.20) [74]:

$$\tau_P = \frac{\Delta P(t) - P(t)}{\dot{P}(t)} \quad (3.19)$$

$$\tau_Q = \frac{\Delta Q(t) - Q(t)}{\dot{Q}(t)} \quad (3.20)$$

Из уравнений (3.10), (3.11), (3.19) и (3.20) при математическом преобразовании получается следующая система уравнений (3.21):

$$\begin{cases} T_P \dot{P}_z + \left(1 + \frac{\dot{z}}{V_{\text{рез}}}\right) P_z + \alpha \left(1 + \frac{\dot{z}}{V_{\text{рез}}}\right) y = 0 \\ T_Q \dot{Q} + \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \dot{y}}{V_{\text{рез}}}\right) Q - f \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \dot{y}}{V_{\text{рез}}}\right) P_z = 0 \end{cases} \quad (3.21)$$

С учётом изложенных факторов, в виде системы дифференциальных уравнений описывается математическая модель динамических характеристик двухконтурной ТСМО станка, принимающая во внимание координатную связь упругой системы подсистемы «режущий инструмент» в направлениях осей z и y [74]. Таким образом, подсистема «заготовка» рассматривается как абсолютно жёсткое тело (3.22):

$$\begin{cases} m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y = Q \\ m_z \ddot{z} + b_z \dot{z} + c_z z = P_z \\ T_P \dot{P}_z + \left(1 + \frac{\dot{z}}{V_{\text{рез}}}\right) P_z + \alpha \left(1 + \frac{\dot{z}}{V_{\text{рез}}}\right) y = 0 \\ T_Q \dot{Q} + \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \dot{y}}{V_{\text{рез}}}\right) Q - f \left(1 + \frac{\dot{z} + \xi \dot{y}}{V_{\text{рез}}}\right) P_z = 0 \end{cases} \quad (3.22)$$

где m_y, m_z – приведенные массы подсистемы «режущий инструмент», кг; b_y, b_z – коэффициенты сопротивления, Н.с/м; c_y, c_z – коэффициенты жесткости, Н/м, T_P и T_Q – постоянные составляющие сила резания и сила трения, Н.

Применяя методику аппроксимации [74] была получена система линейных дифференциальных уравнений (3.23), описывающая динамику процесс стружкообразования при механической обработке:

$$\begin{cases} T_{y2}^2 \ddot{y} + T_{y1} \dot{y} + y = Q \\ T_{z2}^2 \ddot{z} + T_{z1} \dot{z} + z = P_z \\ T_P \dot{P}_z + P_z = -k_y y - T_{kz1} \dot{z} \\ T_Q \dot{Q} + Q = P_z - T_{ky} y - T_{kz2} \dot{z} \end{cases} \quad (3.23)$$

где T_{y2} и T_{z2} – постоянные времени, сек.; T_{y1} и T_{z1} – постоянные времени демпфирования, сек.; T_{kz1} и T_{kz2} – постоянные времени демпфирования от колебания скорости резания, сек.; k_y – коэффициент передачи замкнутого контура.

Однако, необходимо дополнительно учитывать также подсистему «заготовку» при переходе математической модели с двумя степенями свободы к

более сложной математической модели с четырьмя степенями свободы ТСМО. Динамика данной подсистемы описывается системой нелинейных дифференциальных уравнений, представляющей четырёхконтурную математическую модель следующего вида (3.24):

$$\begin{cases} m_y \ddot{y} + b_y \dot{y} + c_y y = Q \\ m_z \ddot{z} + b_z \dot{z} + c_z z = P_z \\ m_w \ddot{w} + b_w \dot{w} + c_w w = -Q \\ m_u \ddot{u} + b_u \dot{u} + c_u u = -P_z \end{cases} \quad (3.24)$$

где m_u , m_w – приведенные массы подсистемы «заготовка», кг; b_u , b_w – коэффициенты сопротивления, Н.с/м; c_u , c_w – коэффициенты жесткости, Н/м.

Для аппроксимации системы нелинейных дифференциальных уравнений (3.24) применяется методика, предложенная В.Л. Вейцем [13]. В результате получена упрощённая математическая модель динамики четырёхконтурной структуры ТСМО, которая имеет следующий вид (3.25):

$$\begin{cases} T_{y2}^2 \ddot{y} + (T_{y1} + T_{y3}) \dot{y} - T_{y3} \dot{w} + 2y - w = Q \\ T_{z2}^2 \ddot{z} + (T_{z1} + T_{z3}) \dot{z} - T_{z3} \dot{u} + 2z - u = P \\ T_{w2}^2 \ddot{w} + (T_{w1} + T_{w3}) \dot{w} - T_{w3} \dot{y} + 2w - y = -Q \\ T_{u2}^2 \ddot{u} + (T_{u1} + T_{u3}) \dot{u} - T_{u3} \dot{z} + 2u - z = -P \\ (T_P + T_{P1}) \dot{P} + P = -(k_y - k_{Py})(y - w) - \\ [T_{kz1} - k_{Pz}(T_P + T_{P2})](\dot{z} - \dot{u}) + k_{Pz}(z - u) \\ - [k_y T_{P1} - k_{Py}(T_P + T_{P2})] \dot{y} \dot{w} \\ T_Q \dot{Q} + Q = P - T_{ky}(\dot{y} - \dot{w}) - T_{kz2}(\dot{z} - \dot{u}) \end{cases} \quad (3.25)$$

где T_{y2} , T_{z2} , T_{w2} , T_{u2} – постоянные времени контуров, сек.; T_{y1} , T_{z1} , T_{w1} , T_{u1} , T_{y3} , T_{z3} , T_{w3} , T_{u3} – постоянные времени демпфирования контуров, сек.; k_{Py} , k_{Pz} , T_{P1} , T_{P2} – коэффициенты и постоянные времени, учитывающие особенности процесса стружкообразования, сек.

Система линейных дифференциальных уравнений (3.25) описывает динамику работы четырехконтурной ТСМО станка, учитывая переходные процессы, вызванные наличием упроченной зоны, механические свойства которой отличаются от исходных свойств, где не подвержено локальному криогенному воздействию.

3.3 Моделирование динамических характеристик ТСМО при обработке деталей типа «тел вращения» с локальным криогенным воздействием

Проведённые ранее исследования позволяют сформировать совокупность теоретических предпосылок, обеспечивающих выполнять математические расчёты для анализа влияния локальной упрочнённой зоны с метастабильной структурой на динамическую устойчивость ТСМО деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса с помощью программного обеспечения NI LabVIEW [67].

Динамическое поведение эквивалентной ТСМО, заданное системой линейных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами, было представлено через аппарат передаточных функций. Данный подход позволил интерпретировать каждое уравнение в форме стандартного динамического звена. Для анализа характеристик этих звеньев использовалось преобразование Лапласа. На основе проведённых преобразований и принципов теории управления была разработана замкнутая структурная схема эквивалентной ТСМО (рисунок 3.9) [14, 37, 74].

Контур u выступает в качестве центрального элемента замкнутой системы, при этом каждое типовое звено характеризуется собственной передаточной функцией. Процедура передач «сигнала» через связанные между собой звенья осуществляется следующим образом.

Внешний возмущающий «сигнал», обусловленный приращению глубины резания на величину $t + \Delta t$, вводится в систему через суммирующее звено 1. С учетом изменения глубины снимаемого припуска «сигнал» преобразуется и поступает в звено 2, описывающее запаздывание в изменении силы резания P_z . Далее «сигнал» с положительной обратной связью направляется через звено 3 в звено первого порядка 4, которое отвечает за запаздыванием в изменении силы трения Q . Получаемое приращение силы трения Q «сигналом» с положительной обратной связью поступает в колебательное звено 7 через звено 5. В суммирующем звене 9 осуществляется суммирование «сигнала» и направляет его в звено 5 через звено 10 по отрицательной обратной связи. В соответствии с третьим законом

Ньютона сила трения Q оказывает воздействие на парциальную систему в направлении оси y .

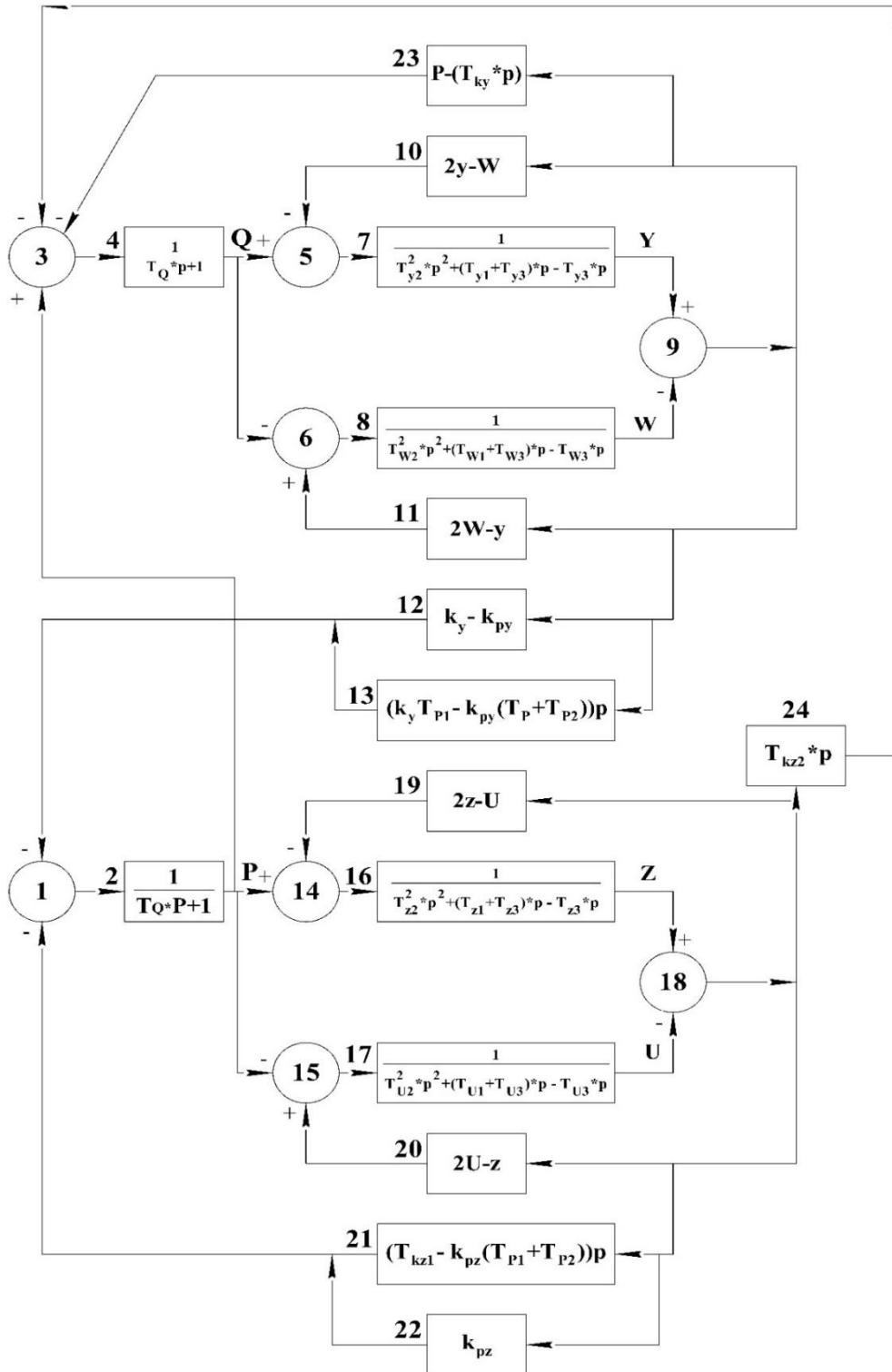


Рисунок 3.9 – Структурная схема четырёхконтурной ТСМО деталей типа «тел вращения» (составлено автором)

В последующем этапе, «сигнал» с отрицательной обратной связью от звена 4 передается в звено 6, далее через звенья 8, 9 и 11 обратно поступает к звену 6.

Запаздывания в изменении сил P_z и Q вызывает «сигнал» приращения в колебательных контурах, который направляется в звено 13, где осуществляется частичное рассеивание энергии колебательного процесса. Для дальнейшей передачи «сигнала» между объединёнными контурами $y - w$ и $z - u$ используется звено 12 с учетом изменённых механических характеристик процесса при варьировании рабочих нагрузок. Получаемый «сигнал» звеньями 12 и 13 поступает в звено 1 и через звено 2 с положительным значением совершает замкнутый контур z между звеньями 14 – 16 – 18 – 19 – 14. При этом, «сигнал», возвращающийся в звено 14, имеет отрицательное значение. Аналогично, «сигнал» от звена 2 с отрицательной обратной связью выполняет замкнутый контур u звеньев 15 – 18 – 20 – 15. Поступивший «сигнал» в звено 15 имеет положительное значение. Суммирующие «сигнал» контуров $z - u$ проходят через демпфирующее звено 21 и корректирующее звено 22 и подаются в звено 1. Дополнительный демпфирующий эффект в замкнутой системе обеспечивается звеньями 23 и 24.

Согласно полученной структурной схеме был разработан виртуальный комплекс имитационного моделирования амплитудно-временных характеристик ТСМО, параметры эквивалентной замкнутой которой приняты по данным таблицы 3.3 и приведены в таблицу 3.4.

Таблица 3.4. Параметры эквивалентной замкнутой четырёхконтурной ТСМО (по данным автора)

Подсистемы ТСМО станка	Координаты	Параметры		
		Жесткость упругих подсистем c , МН/м	Приведенная масса подсистем m , кг	Коэффициент сопротивления b , кНс/м
Заготовка	w	175,3	44,5	8,4
	u	51,7	83,8	7,3
Режущий инструмент	y	18,3	62,7	4,5
	z	20,1	77,6	3,2

Коэффициент усадки стружки, характеризующий изменение глубины деформируемой зоны в имитационной модели [34], является функцией режимов резания и материала инструмента. В исследовании рассматривалась обработка деталей типа «тел вращения» из аустенитной коррозионностойкой жаропрочной

стали 08X18H10T с предварительной локальной криогенной обработкой поверхности. Приняты следующие режимы резания:

- глубина $t = 1,0$ мм, частота вращения шпинделя $n = 750$ мин⁻¹, подача $S = 0,18$ мм/об.

Введение экспериментально полученных параметров в виртуальную программную среду с получением осциллограмм виброускорений подтверждено влияние локального криогенного воздействия из-за уменьшения уровня автоколебаний эквивалентной ТСМО деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса (рисунок 3.10).

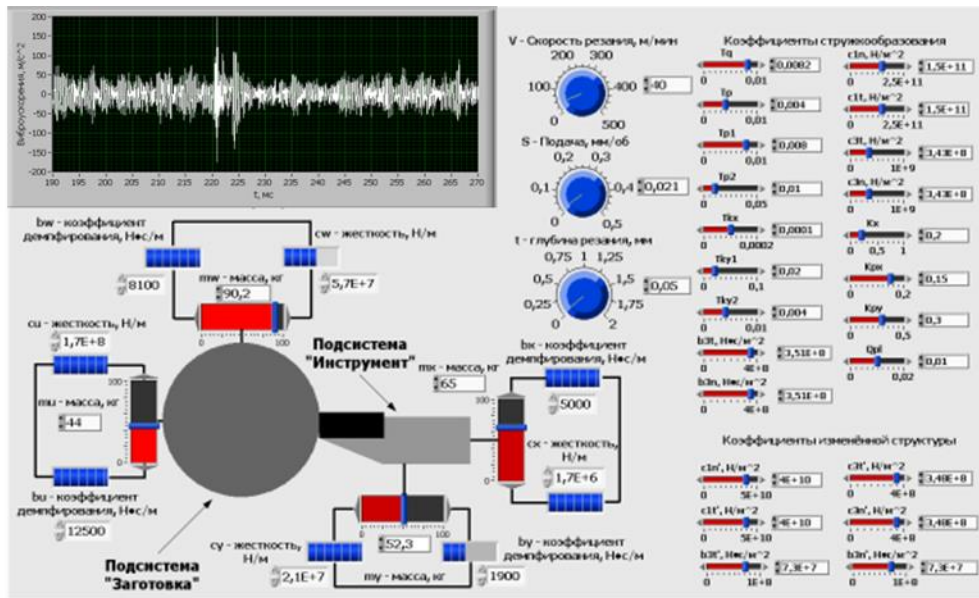


Рисунок 3.10 – Лицевая панель вибродиагностического стенда
(составлено автором)

На основании проведённого моделирования делается вывод, что применение способа механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса обеспечивает уменьшать суммарную амплитуду автоколебаний ТСМО и в результате повысить качество обработанной поверхности.

3.4 Исследования влияния параметров упрочненной зоны с мелкозернистой структурой на процесс динамической устойчивости ТСМО деталей типа «тел вращения»

Экспериментальные исследования направлены на изучение воздействия метастабильной структуры, обладающей изменёнными физико-механическими характеристиками по сравнению с основным материалом, которая формируется в локальной зоне поверхностного слоя заготовки, на ТСМО деталей типа «тел вращения». Полученные результаты дают возможность определить границы устойчивости и рациональные режимы обработки. Далее, путём варьирования скорости резания $V_{рез}$ и ширины срезаемого слоя $b_{рез}$, строится диаграмма области устойчивости для механической обработки аустенитной стали (рисунок 3.11). Диаграмма позволяет сравнить процессы с применением локального криогенного воздействия и без него.

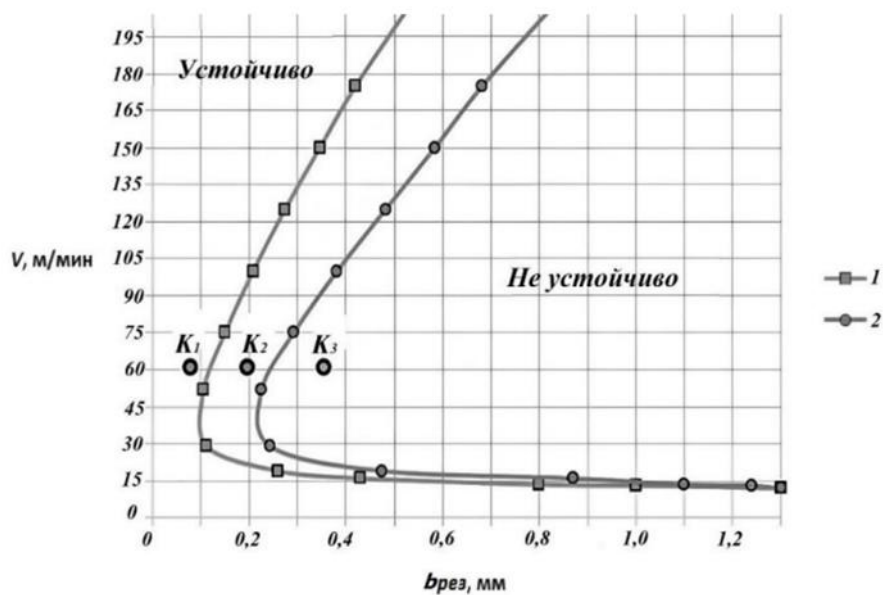


Рисунок 3.11 – Граница области устойчивости при механической обработке деталей типа «тел вращения» из стали 08X18H10T, где 1 – без ЛКВ, 2 – с ЛКВ (составлено автором)

Анализ графика позволяет сделать вывод, что правая граница соответствует диапазону параметров обработки, приводящих к неустойчивому состоянию системы. Следовательно, выход за пределы данной границы вызывает снижение качества и точности обработанной поверхности из-за возникновения вибраций. В

то же время параметры, соответствующие левой границе, обеспечивают стабильность процесса обработки [36, 46].

Значения режимных параметров в точках B_1 при обработке без ЛКВ и в точках B_2 при обработке с ЛКВ обеспечивают полную динамическую устойчивость ТСМО. Одновременно с этим, в точках B_3 за крайней правой границей ТСМО является неустойчивой.

Экспериментальные исследования процесса механической обработки стали 08X18H10T с использованием двухканального виброанализатора VIBXpert EX (рисунок 4.12) позволили зарегистрировать вибрационные ускорения и выявить автоколебания ТСМО, что утверждает наличие подавления колебательного процесса при механической обработке деталей типа «тел вращения» на основе ЛКВ.



Рисунок 3.12 – Установление двухканального виброанализатора модели VIBXpert EX при механической обработке деталей типа «тел вращения» из стали марки 08X18H10T (фото автора)

В ходе экспериментальных исследований, направленных на измерение виброускорений при механической обработке деталей типа «тел вращения» (рисунок 3.13), выявлено, что при внедрении инструмента в упроченной зоне с измененными физико-механическими свойствами, в отличие от исходного материала, наблюдается резкое увеличение амплитуды A_1 в течение временного

интервала T_M . Данное явление обусловлено взаимодействием инструмента с упрочненной структурой, при этом длительность периода соответствует характеристикам сформированной зоны структурных изменений. Результат эксперимента приведен на рисунке 3.13.

В течение периода T_M в зоне обработки происходит устранение наростообразования на режущей кромке инструмента, а также его свободное перемещение без удаления материала. В результате система переходит в устойчивое состояние с амплитудой A_0 и периодом T_P .

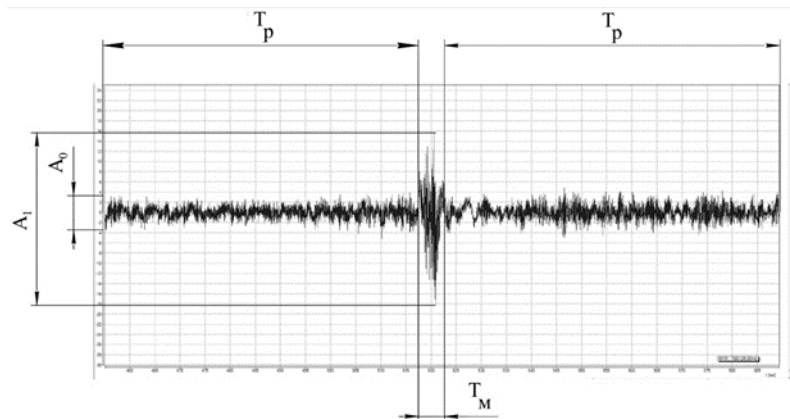


Рисунок 3.13 – Виброускорения при точении стали 08X18H10T, предварительно подвергнутой локальному криогенному воздействию: $V = 70$ м/мин; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,4$ мм; $n = 750$ об/мин, где T_P - процесс обработки в исходном материале; T_M - процесс обработки в упрочненной зоне с мартенситной структурой по границам аустенитных зерен (составлено автором)

Скачкообразное кратковременное изменение амплитуды по величине воздействия находится в области границ срезаемого припуска, и не смотря на незначимую величину скачка амплитуды позволяет в процессе обработки не допускать развития наростообразования на вершине режущего инструмента, что приводит к улучшению качества обработки по точности и шероховатости и обеспечивает эффективную утилизацию стружкообразующего дорогостоящего материала аустенитного класса.

3.5 Выводы по Главе 3

1. В ходе теоретических и экспериментальных исследований выявлены закономерности влияния динамического взаимодействия между режущим

инструментом и обрабатываемым материалом технологических параметров на этапах предварительной подготовки заготовки и при обработке деталей типа «тел вращения» из стали аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия.

2. На основе проведенной аппроксимации получена эквивалентная динамическая модель технологической системы с четырьмя степенями свободы, которая позволяет оценить шероховатость и точность обработки деталей типа «тел вращения» из стали аустенитного класса с использованием локального криогенного воздействия.

3. Предложена модель процесса стружкообразования с учетом изменений физико-механических свойств материала заготовки, в локальной области, осуществляемых на этапе предварительной подготовки и процесса обработки, позволяющая адекватно оценить динамические характеристики технологической системы.

4. На основе эквивалентной динамической модели технологической системы и модели процесса стружкообразования с учетом изменения физико-механических свойств материала заготовки предложена структурная схема четырехконтурной технологической системы, которая явилась основой для разработки виртуального вибродиагностического стенда.

5. Теоретические и экспериментальные исследования показали, что обработка нержавеющей аустенитной стали без локального криогенного воздействия не обеспечивает достижения требуемого значения шероховатости поверхности $R_a = 1,4 \text{ мкм}$, установленного действующим технологическим процессом. При этом применение способа механической обработки детали типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса с локальным криогенным воздействием является эффективным методом уменьшения общей амплитуды автоколебаний.

6. Скачкообразное кратковременное изменение амплитуды по величине воздействия находится в области границ срезаемого припуска, и не смотря на незначимую величину скачка амплитуды, позволяет в процессе обработки не

допускать развития наростообразования на вершине режущего инструмента, что приводит к улучшению качества обработки по точности и шероховатости и обеспечивает эффективную утилизацию стружкообразующего дорогостоящего материала аустенитного класса.

ГЛАВА 4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ЛОКАЛЬНОГО КРИОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ДЕТАЛЕЙ ТИПА «ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ»

Технологическое обеспечение качества поверхности деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса на основе предварительного ЛКВ достигается за счёт корректного выбора технологических параметров, обеспечивающих требуемую кинематику процесса обработки.

Применение способа механической обработки с ЛКВ создаёт новые условия резания вследствие формирования в локальной части поверхности обрабатываемой заготовки упрочненной зоны с метастабильной структурой и изменёнными физико-механическими свойствами, что позволяет получить устойчивое сегментирование и дробление сливной образующейся стружки. Моделирование позволило установить зависимость глубины упрочнённой зоны от времени ЛКВ, что является основой для выбора оптимальных режимов резания, необходимых для достижения заданного качества поверхности изделия.

Таким образом, основной задачей данной главы является разработка математических моделей и установление зависимостей шероховатости и точности обработанных поверхностей от основных технологических параметров.

4.1 Методика проведения экспериментальных исследований при механической обработке деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия

Для проведения основных экспериментальных исследований используются детали типа «тел вращения» из стали 08X18N10T длиной 210 мм и диаметром 50 мм.

Теория планирования эксперимента на основе метода центрального композиционного плана (ЦКП), позволяющего эффективно исследовать многомерные пространства и выявлять основные взаимодействия между факторами при сокращении общего числа проведенных экспериментов, была применена для

разработки математических моделей и выявления зависимостей шероховатости от технологических параметров [54, 66].

Основные технологические параметры могут быть классифицированы на варьируемые, постоянные и измеряемые. К варьируемым параметрам относятся время ЛКВ T , с; подача S , мм/об; частота вращения n , мин⁻¹ и глубина резания t , мм, значения которых приведены в таблицу 4.1. Статические параметры являются геометрией и свойствами обрабатываемой заготовки и режущего инструмента (таблица 4.2).

Таблица 4.1 – Варьируемые технологические параметры (по данным автора)

Варьируемые параметры	Обозначение	Уровень				
		-2	-1	0	+1	+2
Время ЛКВ, с	T	10	20	30	40	50
Подача, мм/об	S	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24
Частота вращения, мин ⁻¹	n	300	460	750	1250	2000
Глубина резания, мм	t	0,5	0,75	1,0	1,25	1,5

Таблица 4.2 – Статические технологические параметры (по данным автора)

Статические параметры	
Обрабатываемая заготовка	Деталь типа «тел вращения» из стали марки 08X18H10T длиной 210 мм и диаметром 50 мм
Режущий инструмент	Режущая пластина марки Т5К10 Геометрические параметры режущего инструмента: – радиус при вершине резца $r = 0,5$ мм; – главный угол в плане $\varphi = 60^\circ$; – вспомогательный угол в плане $\varphi_1 = 30^\circ$; – угол наклона режущей кромки $\lambda = 0^\circ$; – главный передний угол $\gamma = 5^\circ$; – задний угол $\alpha = 7^\circ$

Экспериментальные исследования осуществлялись на токарно-винторезном станке *JET GHB 1340A DRO*.

В качестве измеряемого параметра выступают значения шероховатость поверхности R_a , определение которого осуществляли профилометром *Mitutoyo Surftest SJ-210* (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Профилометр *Mitutoyo Surftest SJ-210* (фото автора)

Полученные результаты измерений шероховатости поверхности представлена на рисунке 4.2.

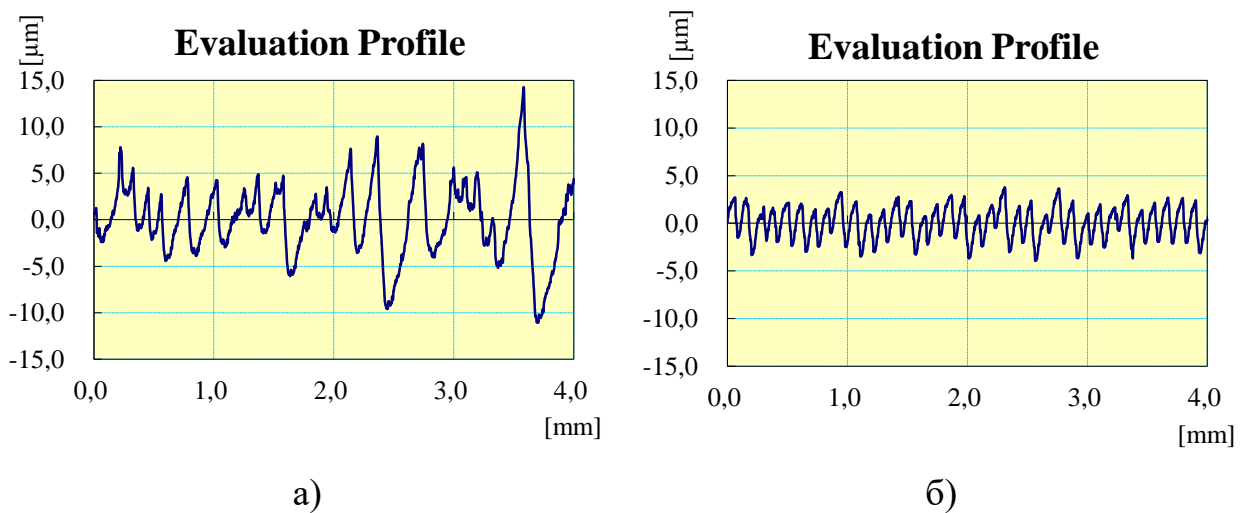


Рисунок 4.2 - Сравнение значений шероховатости обработанной поверхности при механической обработке: а) – без ЛКВ; б) с ЛКВ (составлено автором)

При этом среднее значение шероховатости определяется по формуле (4.1):

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ai}, \quad (4.1)$$

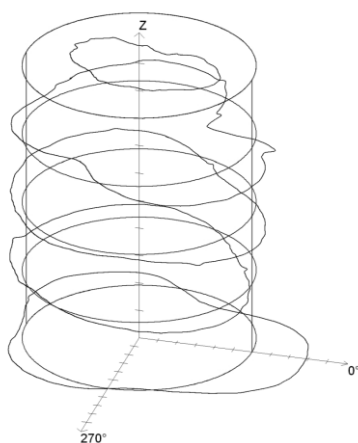
где n – общее количество измерений, i – номер измерения.

В качестве средства проведения измерений отклонения от цилиндричности была выбрана станция «ММQ 400 CNC» производства фирмы «МАНР» (Германия) (рисунок 4.3, а). Результаты измерения отклонений от цилиндричности при обработке заготовки из стали 08X18H10T осуществляли на станции «ММQ 400 CNC» после обработки изделия при обычном резании (рисунок 4.3, б) и после

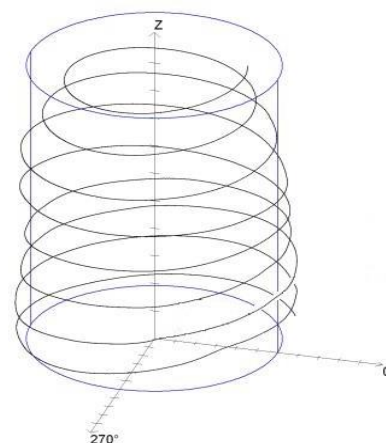
обработки изделия при использовании локального криогенного воздействия (рисунок 4.3, в).



а)



б)



в)

Рисунок 4.3 – Результаты измерения отклонений от цилиндричности при обработке заготовки из стали 08X18H10T, где а) станция «ММQ 400 CNC» производства фирмы «МАHR» (Германия); б) обработка без ЛКВ; в) обработка с ЛКВ (составлено автором)

Заготовка была разбита на пять сечений. Результаты измерений приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты измерения отклонений от цилиндричности при обработке заготовки из стали 08X18H10T (по данным автора)

Номер сечения	Отклонение при обработке, мкм	
	Обработка без ЛКВ	Обработка с ЛКВ
1	35,937	25,156
2	32,292	23,250

Продолжение Таблицы 4.3

Номер сечения	Отклонение при обработке, мкм	
	Обработка без ЛКВ	Обработка с ЛКВ
3	23,556	20,732
4	27,699	20,163
5	25,675	18,247

Во всех случаях при обработке заготовки из стали 08X18H10T с локальным криогенным воздействием точность формы получаемых изделий по параметру отклонения от цилиндричности выше на 26% по сравнению с обработкой без него.

4.2 Планирование эксперимента и разработка математических моделей при механической обработке деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия

Экспериментальные исследования требуют оптимизации объём испытаний с целью обеспечения технологической устойчивости и равномерной шероховатости поверхности деталей в ходе чистовой обработки. А также необходимо учитывать обоснованные процедуры и математические методы для получения результатов экспериментов и на их основании установления математических моделей при соблюдении критерий адекватности. Поскольку зависимость шероховатости поверхности от технологических параметров носит нелинейный характер. Следовательно, план второго порядка используется для адекватного описания этой зависимости.

Уравнение регрессии описывается следующим образом (4.2):

$$y = b_0 + \sum_{1 \leq i \leq n} b_i x_i + \sum_{1 \leq i < j \leq n} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq n} b_{ii} x_i^2 \quad (4.2)$$

где b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – коэффициенты уравнения регрессии; x_i, x_j – значение факторов; n – общее число факторов.

Общее количество опытов вычисляется следующим образом (4.3):

$$N = N_{\text{я}} + 2n + N_0, \quad (4.3)$$

где $N_{\text{я}}$ – количество опытов в ядре плана, n – количество факторов, $2n$ – количество опытов в звездных точках, N_0 – количество опытов в центре плана.

Достижение высокой точности прогнозирования отклика исследуемого объекта в любой точке факторного пространства обеспечивается равномерным распределением всех экспериментальных точек на одинаковом расстоянии от центра ЦКП. Такое свойство плана, называемое ротатабельностью [54], обеспечивается при выполнении условия с выбранным значением «звездного плеча» α (4.4):

$$\alpha = \begin{cases} 2^{0,25n}, n < 5 \\ 2^{0,25(n-1)}, n \geq 5 \end{cases} \quad (4.4)$$

Имеем $n = 4$, то получаем $\alpha = 2$

В таблице 4.4 представлены параметры ротатабельного ЦКП, которые способствуют созданию матрицы эксперимента.

Таблица 4.4 – Основные параметры РЦКП (по данным автора)

Параметры РЦКП	Значение
Количество факторов, n	4
Количество опытов в ядре плана, $N_{\text{я}}$	2^4 (ПФЭ)
«Звёздное плечо», α	2
Количество опытов в «звездных точках», $2n$	8
Количество опытов в центре плана, N_0	7
Общее количество опытов, N	31

Частота вращения n рассматривается с гибким интервалом варьирования, так как основные экспериментальные исследования проводились на основе станка *JET GNB 1340A DRO* и его технические характеристики обусловили ограничение в изменение данного фактора. Кроме того, на каждом уровне фактору присваивается соответствующее кодовое значение, фактические величины которого приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Уровни варьируемых факторов (по данным автора)

Факторы	Время ЛКВ T , с	Подача S , мм/об	Частота вращения n , мин ⁻¹	Глубина резания t , мм
Основной уровень (X_{i0})	30	0,18	750	1,0
Интервал варьирования (ΔX_i)	10	0,03	-	0,25
Верхний уровень ($x_i = +1$)	40	0,21	1250	1,25
Нижний уровень ($x_i = -1$)	20	0,15	460	0,75
Звездная точка $+\alpha$ ($x_i = +2$)	50	0,24	2000	1,5
Звездная точка $-\alpha$ ($x_i = -2$)	10	0,12	300	0,5

Полученные в ходе эксперимента данные были обработаны статистическими методами для определения коэффициентов уравнений регрессии и последующей проверки адекватности модели. Для построения ротатабельных планов следует подобрать соответствующие значения констант c из литературы по статистическим методам планирования эксперимента [54].

Расчёт коэффициентов регрессии выполнен на основе уравнений (4.5 – 4.8):

$$b_0 = c_1 \sum_{u=1}^N y_u - c_2 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u, \quad (4.5)$$

$$b_i = c_3 \sum_{u=1}^N x_{iu} y_u, \quad (4.6)$$

$$b_{ij} = c_4 \sum_{u=1}^N (x_i x_j)_u y_u, \quad (4.7)$$

$$b_{ii} = c_5 \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u + c_6 \sum_{i=1}^k \sum_{u=1}^N x_{iu}^2 y_u - c_2 \sum_{i=1}^k y_u, \quad (4.8)$$

где: y_u – экспериментальное значение.

Матрица планирования эксперимента представлена в таблице 4.6.

Расчет дисперсии воспроизводимости S_y^2 осуществлен в соответствии с приведенным уравнением (4.8) по формуле (4.9):

$$S_y^2 = \frac{1}{N_0 - 1} \sum_{j=1}^{n_0} (y_j - \bar{y})^2, \quad (4.9)$$

Таким образом, для каждого коэффициента регрессионной модели S_b была рассчитана его дисперсия S_b согласно выражениям (4.10 – 4.17):

$$S_{b_0}^2 = c_1 S_y^2 \quad (4.10)$$

$$S_{b_0} = c_7 S_y \quad (4.11)$$

$$S_{b_j}^2 = c_3 S_y^2 \quad (4.12)$$

$$S_{b_j} = c_8 S_y \quad (4.13)$$

$$S_{b_{ij}}^2 = c_4 S_y^2 \quad (4.14)$$

$$S_{b_{ij}} = c_9 S_y \quad (4.15)$$

$$S_{b_{jj}}^2 = (c_5 + c_6)S_y^2 \quad (4.16)$$

$$S_{b_{jj}} = c_{10}S_y \quad (4.17)$$

Таблица 4.6 – Матрица плана эксперимента (по данным автора)

Область	Номер опыта	Значение фактора				Код фактора				
		T, с	S, мм/об	n, мин ⁻¹	t, мм	x ₀	x ₁	x ₂	x ₃	x ₄
Ядро	1	40	0,21	1250	1,25	+1	+1	+1	+1	+1
	2	20	0,21	1250	1,25	+1	-1	+1	+1	+1
	3	40	0,15	1250	1,25	+1	+1	-1	+1	+1
	4	20	0,15	1250	1,25	+1	-1	-1	+1	+1
	5	40	0,21	460	1,25	+1	+1	+1	-1	+1
	6	20	0,21	460	1,25	+1	-1	+1	-1	+1
	7	40	0,15	460	1,25	+1	+1	-1	-1	+1
	8	20	0,15	460	1,25	+1	-1	-1	-1	+1
	9	40	0,21	1250	0,75	+1	+1	+1	+1	-1
	10	20	0,21	1250	0,75	+1	-1	+1	+1	-1
	11	40	0,15	1250	0,75	+1	+1	-1	+1	-1
	12	20	0,15	1250	0,75	+1	-1	-1	+1	-1
	13	40	0,21	460	0,75	+1	+1	+1	-1	-1
	14	20	0,21	460	0,75	+1	-1	+1	-1	-1
	15	40	0,15	460	0,75	+1	+1	-1	-1	-1
	16	20	0,15	460	0,75	+1	-1	-1	-1	-1
Звездные точки	17	50	0,18	750	1,0	+1	+2	0	0	0
	18	10	0,18	750	1,0	+1	-2	0	0	0
	19	30	0,24	750	1,0	+1	0	+2	0	0
	20	30	0,12	750	1,0	+1	0	-2	0	0
	21	30	0,18	2000	1,0	+1	0	0	+2	0
	22	30	0,18	300	1,0	+1	0	0	-2	0
	23	30	0,18	750	1,5	+1	0	0	0	+2
	24	30	0,18	750	0,5	+1	0	0	0	-2
Центр	25	30	0,18	750	0,15	+1	0	0	0	0
	26	30	0,18	750	0,15	+1	0	0	0	0
	27	30	0,18	750	0,15	+1	0	0	0	0
	28	30	0,18	750	0,15	+1	0	0	0	0
	29	30	0,18	750	0,15	+1	0	0	0	0
	30	30	0,18	750	0,15	+1	0	0	0	0
	31	30	0,18	750	0,15	+1	0	0	0	0

Ковариации коэффициентов cov_{bb} определяются выражениями (4.18 – 4.19):

$$cov_{b_0b_{ii}} = -c_2S_y^2 \quad (4.18)$$

$$cov_{b_{ii}b_{jj}} = c_6S_y^2 \quad (4.19)$$

Доверительные интервалы коэффициентов Δb_i рассчитывались по выражению (4.20):

$$\Delta b_i = t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i} \quad (4.20)$$

где $t_{\alpha; f_1}$ – критерий Стьюдента [54]; S_{b_i} – среднеквадратичная ошибка в определении коэффициента регрессии.

Имеем уровень значимости $\alpha = 0,05$ и число степени свободы $f_1 = 6$, принимаем критерий Стьюдента $t_{\alpha; f_1} = 2,45$ [54].

Статистическая значимость каждого коэффициента уравнения регрессии рассчитывается по соотношениям (4.21 – 4.24):

$$|b_0| \geq t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_0} \quad (4.21)$$

$$|b_i| \geq t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_i} \quad (4.22)$$

$$|b_{ii}| \geq t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_{ii}} \quad (4.23)$$

$$|b_{ij}| \geq t_{\alpha; f_1} \cdot S_{b_{ij}} \quad (4.24)$$

Дисперсия $SS_{\text{неад}}^2$, обусловленная неадекватностью математической модели, равна (4.25):

$$SS_{\text{неад}}^2 = \frac{SS_{\text{неад}}}{f_2}, \quad (4.25)$$

где $SS_{\text{неад}}$ – сумма квадратов, характеризующая неадекватность математической модели, f_2 – число степеней свободы.

Сумма квадратов $SS_{\text{неад}}$ вычисляется следующим образом (4.26):

$$SS_{\text{неад}} = N_0(y_0^p - \bar{y}_0)^2 + \sum_{u=1}^{24} (y_u^p - y_u^э)^2, \quad (4.26)$$

Число степеней свободы f_2 определяется по соотношению (4.27):

$$f_2 = N - \frac{(n+2)(n+1)}{2} \quad (4.27)$$

где N – общее количество опытов; n – число факторов.

Для проверки адекватности установленной математической модели следует использовать следующее отношение $F_{\text{расч.}} < F_{\text{табл}}$ [54], при этом $F_{\text{расч.}}$ определяется по формуле (4.28):

$$F_{\text{расч.}} = \frac{SS_{\text{неад}}^2}{S_y^2}, \quad (4.28)$$

4.3 Экспериментальные исследования влияния технологических параметров способа механической обработки на основе локального криогенного воздействия на шероховатость поверхности

Результаты, полученные в ходе экспериментальных исследований влияния технологических параметров способа механической обработки резанием на основе локального криогенного воздействия на шероховатость поверхности, систематизированы в таблице А.1 (Приложение А).

Значения коэффициентов регрессионной модели приведены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Коэффициенты регрессионного уравнения шероховатости (по данным автора)

Коэффициент	Значение	Среднее значение \bar{y}	Дисперсия опыта S_y^2	Дисперсия коэффициента, S_b^2	Среднеквадратичная ошибка, S_b	Доверительный интервал	
b_0	1,398	1.397	0,00025433	0,00003634	0,00602796	0,01476851	
b_1	-0,044			0,00001060	0,00325543	0,00797581	
b_2	-0,010						
b_3	-0,033						
b_4	0,024						
b_{12}	0,016			0,00001590	0,00398696	0,00976805	
b_{13}	-0,014						
b_{14}	0,006						
b_{23}	0,009						
b_{24}	-0,003			0,00000889	0,00298256	0,00730728	
b_{34}	-0,014						
b_{11}	0,009						
b_{22}	0,008						
b_{33}	0,005						
b_{44}	0,031						

На основе полученных коэффициентов регрессионная модель описывается следующим уравнением (4.29):

$$y_{Ra} = 1,398 - 0,044x_1 - 0,01x_2 - 0,033x_3 + 0,024x_4 + 0,016x_1x_2 - 0,014x_1x_3 + 0,006x_1x_4 + 0,009x_2x_3 - 0,003x_2x_4 - 0,014x_3x_4 + 0,009x_1^2 + 0,008x_2^2 + 0,005x_3^2 + 0,031x_4^2. \quad (4.29)$$

Расчетные значения приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Экспериментальные и расчетные значения отклика уравнения шероховатости (по данным автора)

Номер опыта	$R_{a\text{экс.}}$	$R_{a\text{расч.}}$	Δy_{Ra}^2	Номер опыта	$R_{a\text{экс.}}$	$R_{a\text{расч.}}$	Δy_{Ra}^2
1	1,417	1,38816782	0,00083129	13	1,421	1,40366874	0,00030037
2	1,423	1,46154992	0,00148610	14	1,443	1,44355084	0,00000030
3	1,346	1,36254436	0,00027372	15	1,425	1,40354528	0,00046031
4	1,523	1,50017646	0,00052091	16	1,519	1,50767738	0,00012820
5	1,475	1,4882144	0,00017462	17	1,339	1,3481655	0,00008401
6	1,532	1,5048465	0,00073731	18	1,501	1,5256797	0,00060909
7	1,503	1,49934094	0,00001339	19	1,402	1,41267106	0,00011387
8	1,587	1,58022304	0,00004593	20	1,428	1,45117414	0,00053704
9	1,337	1,36087216	0,00056988	21	1,342	1,34500102	0,00000901
10	1,494	1,45750426	0,00133194	22	1,437	1,46784418	0,00095136
11	1,337	1,3239987	0,00016903	23	1,563	1,56734326	0,00001886
12	1,481	1,4848808	0,00001506	24	1,438	1,46750194	0,00087036

Оценка адекватности построенной регрессионной модели проводилась с использованием F-критерия Фишера. Расчётное значение критерия составило $F_{расч} = 1,98$, тогда как при уровне значимости $\alpha = 0,05$ табличное значение равно $F_{табл} = 2,63$. Поскольку $F_{расч} < F_{табл}$, можно заключить, что модель статистически адекватна, может быть использована для прогнозирования исследуемых параметров, а также для исследования комбинированного влияния технологических параметров способа механической обработки резанием на основе локального криогенного воздействия на шероховатость.

Натуральные величины варьируемых факторов преобразуются в кодированные значения с помощью соотношения (4.30), которое устанавливает связь между натуральным и кодированным масштабами:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (4.30)$$

где X_{i0} – основной уровень фактора, принимающий значение в центре плана; ΔX_i – интервал варьирования значений фактора.

В результате раскодирования уравнения регрессии (4.30) была получена следующая модель (4.31):

$$R_a = 2,558 - 0,019T - 5,693S - 1,22 \cdot 10^{-5}n - 0,713t + 0054TS - 4,73 \cdot 10^{-6}Tn + 0,002Tt + 1,02 \cdot 10^{-3}Sn - 0,375St - 1,91 \cdot 10^{-4}nt + 9,69 \cdot 10^{-5}T^2 + 9,377S^2 + 2,29 \cdot 10^{-8}n^2 + 0,477t^2 \quad (4.31)$$

В результате проведения процедуры упрощения, которая заключалась в исключении членов уравнения с пренебрежимо малым влиянием, была получена математическая модель (4.32):

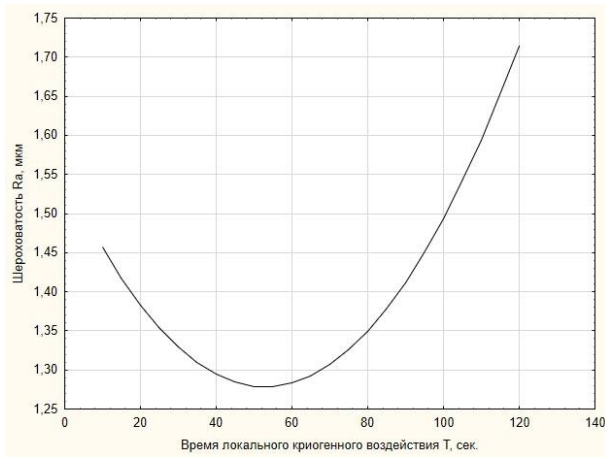
$$R_a = 2,56 - 0,02T - 5,69S - 0,71t + 005TS - 4,73 \cdot 10^{-6}Tn + 1,02 \cdot 10^{-3}Sn - 1,91 \cdot 10^{-4}nt + 9,38S^2 + 0,48t^2 \quad (4.32)$$

В результате установлены полиномиальные зависимости, описывающие влияние технологических параметров на формирование шероховатости обработанной поверхности (таблица 4.9).

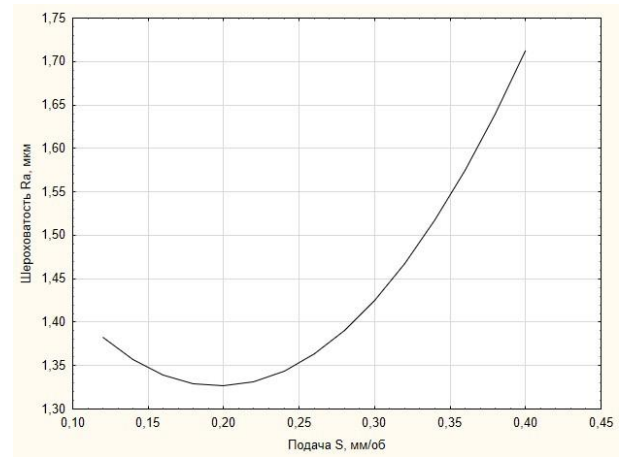
Таблица 4.9 – Математические модели влияния технологических параметров на шероховатость (по данным автора)

Технологический параметр	Математическая зависимость
Время ЛКВ, T	$R_a = 1,549 - 1,03 \cdot 10^{-2}T + 9,69 \cdot 10^{-5}T^2$
Подача, S	$R_a = 1,691 - 3,696S + 9,37S^2$
Частота вращения заготовки, n	$R_a = 1,419 - 1,37 \cdot 10^{-8}n + 2,29 \cdot 10^{-8}n^2$
Глубина резания, t	$R_a = 1,706 - 0,854t + 0,477t^2$

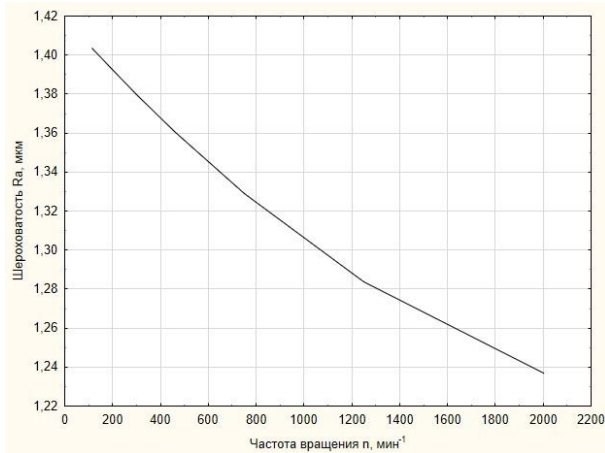
Графические изображения закономерностей изменения шероховатости поверхности от варьируемых технологических параметров представлены на рисунке 4.4.



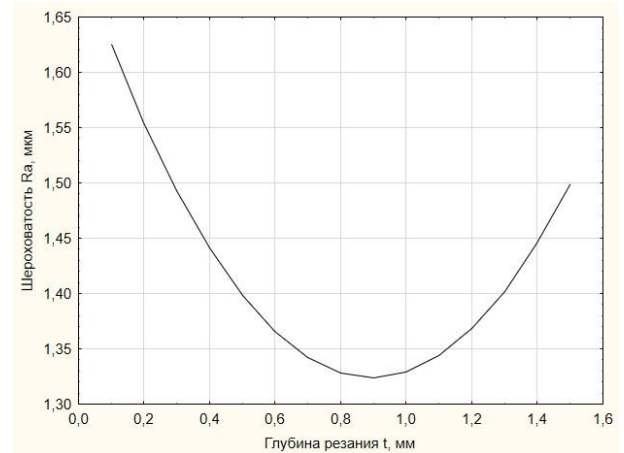
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.4 – Графики влияния: а) времени локального криогенного воздействия T ; б) подачи S ; в) частоты вращения n ; г) глубины резания t на шероховатость поверхности при механической обработке деталей типа «тел вращения» из стали 08X18H10T

Установлено, что оптимальные времени локального криогенного воздействия T для механической обработки резанием деталей типа «те вращения» из сталей аустенитного класса составляют от 20 сек. до 90 сек. (рисунок 4.5, а), обеспечивая шероховатость $R_a = 1,4$ мкм. При времени локального криогенного воздействия меньше 20 сек. и выше 90 сек. значение шероховатости поверхности составляет выше 1,4 мкм.

Для более точной оценки влияния технологических параметров ТСМО с локальным криогенным воздействием на шероховатость наружной поверхности (R_a) необходимо проанализировать их совместное воздействие. На основе

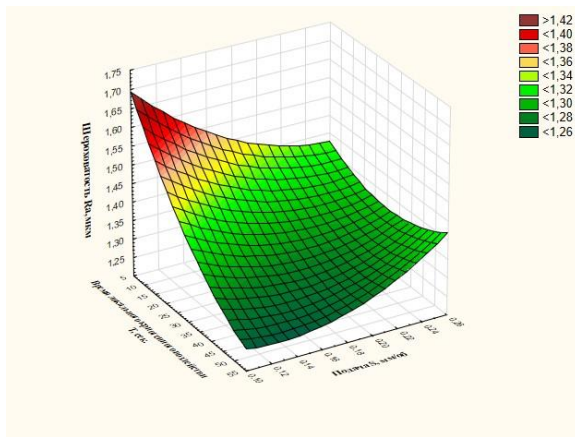
экспериментальных данных были получены математические модели, описывающие комбинированное влияние технологических параметров на формирование шероховатости, результаты которых приведены в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Математические модели комбинированного влияния технологических параметров на шероховатость (по данным автора)

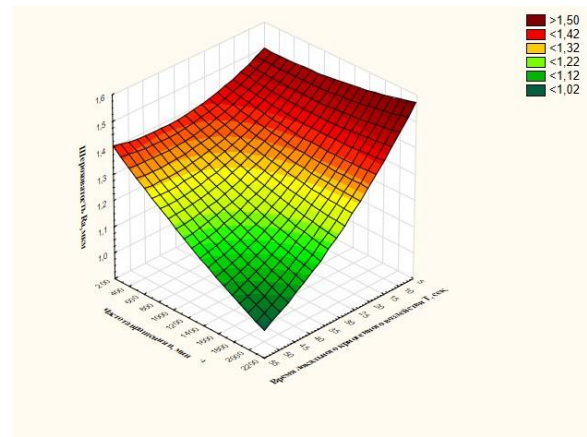
Комбинация технологических параметров	Математическая зависимость
Время ЛКВ + подача	$R_a = 2,2 - 0,02T - 5,303S + 0,054TS + 9,69 \cdot 10^{-5}T^2 + 9,38S^2$
Время ЛКВ + частота вращения	$R_a = 1,533 - 0,007T + 5,3 \cdot 10^{-6}n - 4,73 \cdot 10^{-6}Tn + 9,69 \cdot 10^{-5}T^2 + 2,29 \cdot 10^{-8}n^2$
Время ЛКВ + глубина резания	$R_a = 1,996 - 0,013T - 0,924t + 0,002Tt + 9,69 \cdot 10^{-5}T^2 + 0,477t^2$
Подача + частота вращения	$R_a = 1,918 - 4,462S - 3,21 \cdot 10^{-4}n + 0,001Sn + 9,38S^2 + 2,29 \cdot 10^{-8}n^2$
Подача + глубина резания	$R_a = 2 - 3,321S - 0,787t - 0,375St + 9,38S^2 + 0,477t^2$
Частота вращения + глубина резания	$R_a = 1,653 + 5,41 \cdot 10^{-5}n - 0,711t - 1,91 \cdot 10^{-4}nt + 2,29 \cdot 10^{-8}n^2 + 0,477t^2$

В ходе экспериментальных исследований для указанных режимов обработки удалось снизить значение шероховатости поверхности R_a с 3,082 мкм до 1,4 мкм. На рисунке 4.5 изображены графики комбинированного влияния технологических параметров на формирование шероховатости.

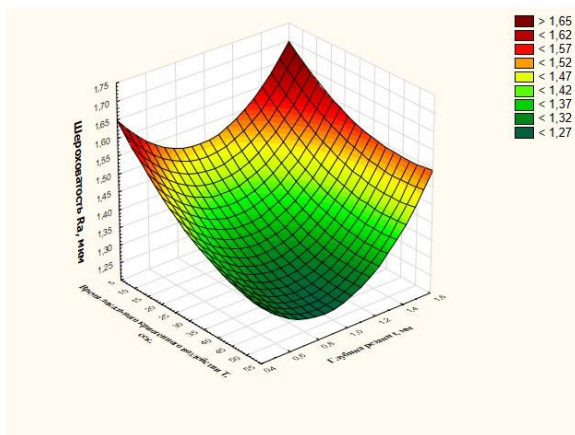
Анализ экспериментальных данных показал, что для обеспечения качества поверхности получаемого изделия с заданным значением шероховатости $R_a \leq 1,4$ мкм, время ЛКВ составляет $T \geq 30$ с и подача S находится в диапазоне от 0.12 по 0.24 мм/об (см. рисунок 4.5, а). Кроме того, $R_a < 1,4$ мкм возможно обеспечить при $T \geq 30$ с и $n \geq 750$ мин⁻¹ (рисунок 4.5, б). И так, при $T \geq 30$ с и $0,5$ мм $\leq t \leq 1,25$ мм, шероховатость обладает минимальным значением (рисунок 4.5, в).



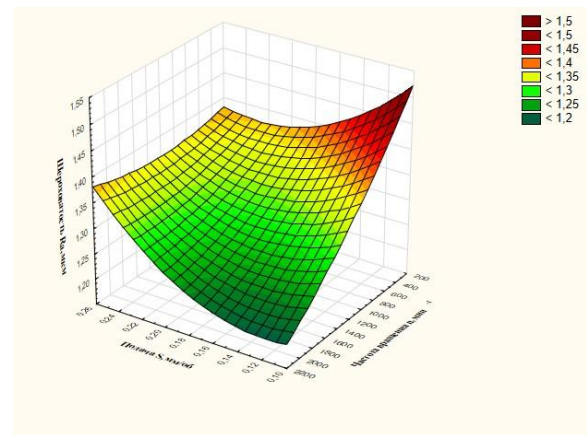
а)



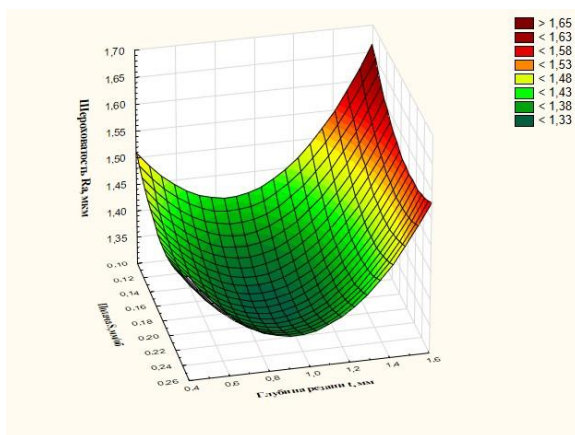
б)



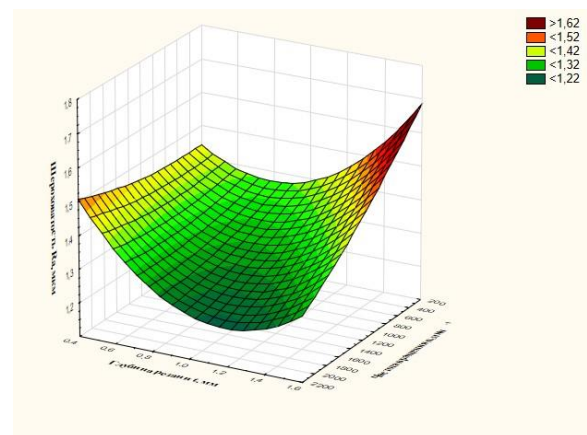
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4.5 – Комбинированное влияние на величину шероховатости: а) времени локального криогенного воздействия T и подачи резания S ; б) времени локального криогенного воздействия T и частоты вращения n ; в) времени локального криогенного воздействия T и глубины резания t ; г) подачи резания S и частоты вращения n ; д) подачи резания S и глубины резания t ; е) частоты вращения n и глубины резания t (составлено автором)

Таким образом, каждый из рассмотренных технологических параметров оказывает значимое влияние на формирование качества поверхности получаемого изделия. Минимальное значение шероховатости обеспечивается при: $30 \leq T \leq 60$ с, $0,18 \leq S \leq 0,24$ мм/об; $n \geq 750$ мин⁻¹ и $0,75 \leq t \leq 1,25$ мм.

4.4 Визуальная оценка состояния стружек, обращающихся при механической обработке деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия

Проведена визуальная оценка состояния обработанных поверхностей при обычном резании и при механической обработке резанием на основе локального криогенного воздействия с различными параметрами. При этом целью визуальной оценки является оценка равномерности обработки и качества поверхности. Механическая обработка деталей типа «тел вращения» из стали 08X18H10T диаметром $D_3 = 30$ мм, с режимными параметрами: скорость резания $V_{рез} = 70,65$ м/мин (частоте вращения $n = 750$ мин⁻¹), подача $S = 0,2$ мм/об и глубина резания $t = 1,0$ мм выполняется режущим инструментом с установленной режущей пластиной марки Т5К10, геометрические характеристики которой имеет следующую величину: $\gamma = 5^\circ$, и $\alpha = 7^\circ$. Пересечении в плоскости резания поверхностного слоя припуска с траекторией локальной метастабильной структуры обеспечивает сегментирование и последующее дробление сливной стружки. В соответствии с ГОСТом 2787-75 длина получаемой витой стружки находится в диапазоне от 100 мм до 200 мм. Визуальные результаты экспериментов по вопросу сегментирования и дробления сливной стружки представлены на рисунке 4.6.

По результатам экспериментальных исследований построена схема расположения допусков и припусков при механической обработке аустенитной стали 08X18H10T с учётом заданных глубин упрочненной зоны с метастабильной структурой, формируемой ЛКВ (рисунок 4.7).

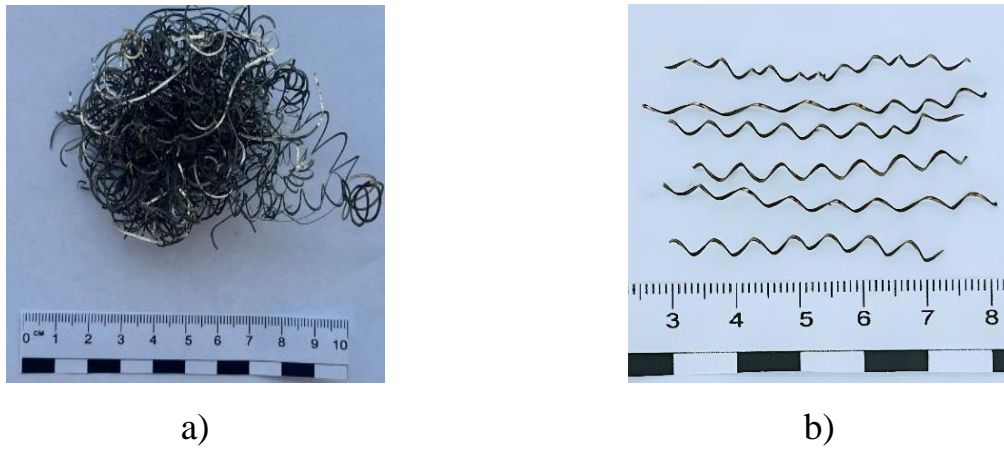


Рисунок 4.6 – Результаты экспериментов: а) стружки, образующиеся при резании без ЛКВ; б) стружки, образующиеся при резании с ЛКВ (составлено автором)

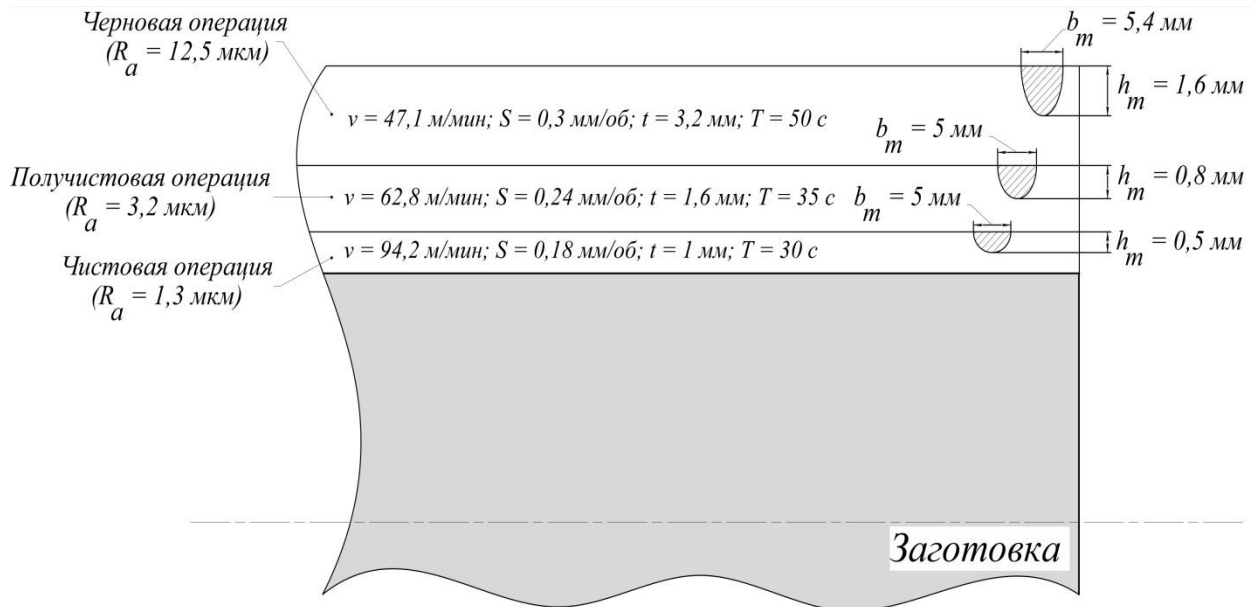


Рисунок 4.7 Схема расположения допусков и припусков с назначенными глубинами упрочненной мелкозернистой структуры (составлено автором)

4.5 Совершенствование технологического процесса механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса

Технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса является особой важной задачей в производственные процессы.

Обработка коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса сопряжена со значительными технологическими сложностями, обусловленными комплексом их специфических свойств. Высокая вязкость, склонность к налипанию и интенсивная пластическая деформация в зоне резания приводят к выраженному упрочнению (наклёпу) поверхностного слоя заготовки. Концентрация высокой температуры в зоне резания из-за низкой теплопроводности материалов в сочетании с их абразивными свойствами, приводит к быстрому износу режущего клина инструмента. Кроме того, способность этих сплавов сохранять прочность и твёрдость при нагреве создаёт экстремальные механические нагрузки на режущую кромку, повышая риск её повреждения. Процесс усугубляется пониженной виброустойчивостью, вызванной высокой прочностью и неравномерной деформацией материала, что провоцирует возникновение автоколебательного процесса. Наконец, высокая пластичность аустенитных сталей серьёзно затрудняет дробление и отвод стружки, дополнительно осложняя весь технологический процесс [51].

В технологическом процессе изготовления деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса завершающей операцией является шлифование (таблица 4.11). Процесс шлифования таких материалов сопряжен с существенными технологическими недостатками. К ним относятся: интенсивное тепловыделение, приводящее к риску термических повреждений и деформаций; склонность материала к налипанию и быстрому засаливанию абразивного круга, что снижает его режущую способность и стабильность процесса; низкая производительность и высокий удельный расход энергии; сложность обеспечения требуемого качества поверхности (отсутствия прижогов, трещин, остаточных напряжений) и точности размеров; повышенный расход специализированного абразивного инструмента; а также эксплуатационные и экологические проблемы, связанные с интенсивным применением смазочно-охлаждающих жидкостей [25].

Таблица 4.11 – Технологический процесс механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса (по данным автора)

Этапы технологического процесса	Основные операции
Получение заготовки	Выбор способа получения: литье, штамповка, прокат
	Термическая обработка (закалка, отпуск) для достижения требуемых свойств
Подготовительные операции	Правка
	Очистка
Механическая обработка (Токарная)	Токарная черновая обработка
	Токарная полужистовая обработка
	Токарная чистовая обработка
	Шлифование
	Полирование
Окончательная операция	Контрольная

Таким образом, для повышения общей производительности технологического процесса механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса (таблица 4.11) и получения необходимого показателя качества эксплуатационных поверхностей с заданным значением шероховатости целесообразно применять способ обработки на основе локального криогенного воздействия.

Механическая обработка резанием на основе локального криогенного воздействия позволяет повысить эффективность технологического процесса, гарантированно достичь требуемой шероховатости поверхности и значительно снизить трудоёмкость. Разработанный технологический процесс представлен в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Технологический процесс механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса на основе криогенного воздействия (по данным автора)

Этапы технологического процесса	Основные операции
Получение заготовки	Выбор способа получения: литье, штамповка, прокат
	Термическая обработка (закалка, отпуск) для достижения требуемых свойств
Подготовительные операции	Правка
	Очистка
Механическая обработка (Токарная)	Токарная черновая обработка с локальным криогенным воздействием
	Токарная получистовая обработка с локальным криогенным воздействием
	Токарная чистовая обработка с локальным криогенным воздействием
	Полирование
Окончательная операция	Контрольная

4.5 Выводы по Главе 4

1. В ходе экспериментов выявлены закономерности влияния технологических параметров механической обработки резанием на основе локального криогенного воздействия на шероховатость и точность обработанных поверхностей изделий.

2. Установлены математические модели зависимости шероховатости поверхности, как от отдельных технологических параметров, так и от их комбинаций.

3. На основании проведенного исследования установлена зависимость шероховатости поверхности R_a от варьируемых технологических параметров. Сделан вывод о взаимосвязи режимов обработки на основе локального криогенного воздействия и качества поверхности. Минимизация параметра R_a наблюдается при следующих значениях технологических параметров: время локального криогенного воздействия, $T = 30-60$ с; частота вращения шпинделя $n = 115-750$ мин⁻¹; глубина резания $t = 0,15-0,5$ мм и подача $S = 0,12 - 0,2$ мм/об.

4. Сочетания технологических параметров механической обработки резанием на основе локального криогенного воздействия оказывают влияние на качество поверхности деталей типа «тел вращения». Независимо от выбранных значений технологических параметров наблюдается положительная динамика в изменении шероховатости Ra .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. На основании проведенного анализа установлено, что не существует оптимального метода для обработки материалов аустенитного класса. Экспериментальные исследования позволили установить влияние криогенного воздействия с последующим пластическим деформированием на структуру и физико-механические свойства аустенитных сталей, что повысило эффективность технологического обеспечения качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» при обработке изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

2. На основании экспериментальных исследований разработан способ механической обработки стальной заготовки аустенитного класса с дроблением стружки и устройство для его осуществления (Патент на изобретение № 2804202), включающий в себя схему нанесения предварительного локального криогенного воздействия на поверхность цилиндрической заготовки и последующего процесса механической обработки заготовки с метастабильной структурой, конструкцию устройства подачи жидкого азота на поверхность обрабатываемой заготовки.

3. Получена эквивалентная математическая модель ТСМО деталей типа «тел вращения» с применением локального криогенного воздействия, позволяющая адекватно оценить динамическую устойчивость системы при различных технологических параметрах и подтверждающая повышение динамической стабильности изготовления изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

4. Получены регрессионные математические зависимости, позволяющие определить значения шероховатости поверхности и в зависимости от: времени контакта детали с жидким азотом, частоты ее вращения, глубины резания и подачи.

5. Экспериментально определено влияние технологических параметров ТСМО на основе локального криогенного воздействия на шероховатость обработанной поверхности. Также определено, что время локального криогенного

воздействия составляет 30 – 60 с, что позволяет обеспечить шероховатость поверхности $Ra = 1,3 \dots 1,4$ мкм.

6. Разработаны практические рекомендации применения способа механической обработки деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия с дроблением стружки в условиях реального производства с диапазоном технологических параметров обработки: $T = 30-60$ с; $S = 0,12 - 0,2$ мм/об; $n = 750-1250$ мин⁻¹; $t = 0,15-0,5$ мм.

8. Результаты проведенных исследований прошли промышленную апробацию на производственном предприятии ПК ЦНТУ «Прометей».

9. Перспективы дальнейшего развития диссертационного исследования заключаются в разработке технологии механической обработки коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адмакин, М.А. Обрабатываемость резанием маломагнитных высокомарганцовистых сталей / М.А. Адмакин, А.Д. Халимоненко, В.П. Захарова, **В.Д. Нгуен** // Черные металлы. – 2023. – № 2. – С. 82-87. – DOI 10.17580/chm.2023.02.12.
2. Амосов, И.С. Точность, вибрации и чистота поверхности при токарной обработке / И.С. Амосов, В.А. Скраган. – Л.: Машгиз, 1953. – 67.
3. Армарего, И. А. Обработка металлов резанием. Обработка металлов резанием / И. А. Армарего, Р. Х. Браун. – Москва: Машиностроение, 1977. – 325 с.
4. Артамонов, Е.В. Стружкодробление при автоматизированной обработке резанием труднообрабатываемых сталей путем комплексного применения стружколомающего инструмента и высокотемпературного охрупчивания / Е.В. Артамонов, Д.В. Васильев, М.О. Чернышов // Известия Юго-Западного государственного университета, 2020, Т. 24(1), 8-22. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-8-22.
5. Бармин, Б.П. Вибрации и режимы резания / Б.П. Бармин. - М.: Машиностроение, 1979. – 72 с.
6. Безъязычный, В.Ф. Расчет режимов резания: Учеб. пособие / В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов, А.В. Кордюков. – Рыбинск: РГАТА, 2009. – 185 с.
7. Благовский, О.В. Управление формированием остаточных напряжений в ответственных деталях при их изготовлении с использованием ультразвуковых колебаний / О.В. Благовский. - Дисс. канд. техн. наук - Ульяновск.: УГТУ, 2015. – 147 с.
8. Бобров, В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. - М.: Машиностроение, 1975. - 344 с.
9. Бородулин, Г. М., Мошкевич Е. И. Нержавеющая сталь. М.: Изд-во «Металлургия», 1973. 319 с.
10. Бржозовский, Б.М. Динамический мониторинг технологического оборудования / Б.М. Бржозовский, В.В. Мартынов, И.Н. Янкин и др.; СГТУ – Саратов: издательство СГТУ, 2008. – 312 с.

11. Ванчурин, А.Н. Автоматизация и управление процессом стружкодробления обрабатываемого материала при предварительном пластическом воздействии / А.Н. Ванчурин. – Дисс. канд. техн. наук – СПб.: СЗТУ, 2006. – 221 с.
12. Васильков, Д.В. Моделирование процесса стружкообразования на основе кусочно – линейной аппроксимации / Д.В. Васильков, В.Л. Вейц. // СПБИМаш – 1998. – №1. – С. 16 – 21.
13. Вейц, В.Л. Динамика и управление процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке / В.Л. Вейц, В.В. Максаров. – СПб.: СЗПИ, 2000. – 160 с.
14. Вейц, В.Л. Повышение устойчивости технологической системы при управлении реологическими параметрами процесса стружкообразования / В.Л. Вейц, В.В. Максаров. // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. Вып. 16. – СПб.: СЗПИ, 1999. – С. 19 – 29.
15. Волосатов, В.А. Ультразвуковая обработка. Ленинград, изд-вл "Лениздат", 1973 г., 248 с.
16. Галашев, В.А. Резание металлов. Краткий конспект обзорных лекций. - Ижевск: Изд-во Удм. ун-та, 1996 – 187с.
17. Ганзбург, Л.Б., Максаров В.В., Чулков К.С. Использование локального воздействия холодом при резании нержавеющей сталей // Машиностроение и автоматизация производства. Межвуз. сб. Вып. 11. – СПб.: СЗПИ, 1998. – С.87 – 91.
18. Ганзбург, Л. Б., Максаров В. В., Тимофеев Д. Ю. Процесс точения при предварительном локальном воздействии на обрабатываемый материал // Машиностроение и автоматизация производства: Межвуз. сб. Вып. 8. СПб.: СЗПИ, 1998. С. 87–94.
19. Горбунов, О.И. Автоматизация и управление процессом стружкодробления при тонком точении материала аустенитного класса / О.И. Горбунов. – Дисс. канд. техн. наук – СПб.: СЗТУ, 2009. – 199 с.
20. Горбунов, О.И., Максаров В.В., Ольт Ю. Автоматизация и управление процессом стружкодробления обрабатываемого материала аустенитного класса

при предварительном криогенном воздействии // *Металлообработка*. 2009. № 3(51). С. 48 – 54.

21. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – М.: Машиностроение, 1989. – 304 с.

22. Гуляев, А.П. *Металловедение* / А.П. Гуляев. - М.: *Металлургия*, 1986. - 544 с.

23. Гуляев, А.П., Кальнер В.Д., Козловский И.С., Лахтин Ю.М., Рахштадт А.Г., Юргенсон А.А. *Термическая обработка в машиностроении: Справочник/Под ред. Ю. М. Лахтина, А. Г. Рахштадта.* – М.: Машиностроение, 1980, 783 с., ил.

24. Гуревич, Я.Л. Режимы резания труднообрабатываемых материалов / Я.Л. Гуревич. // *Справочник 2 - е изд., перераб. и доп.* – Л.: Машиностроение, 1986. – 240 с.

25. Дальский, А. М. *Механическая обработка материалов* / А. М. Дальский, В. С. Гаврилюк, Л. Н. Бухаркин и др.: Учебник для вузов. – М.: Машиностроение, 1982. – 263 с., ил.

26. Ефимов, А.Е. Технологическое обеспечение шероховатости поверхностного слоя на основе моделирования переходных процессов / В.В. Максаров, Р.В. Вьюшин, А.Е. Ефимов // *Металлообработка*. – 2017. – №2. – С. 39–45.

27. Ефимов, А. Е. Технологическое обеспечение качества поверхности гидроцилиндров горного оборудования на основе предварительного локального лазерного воздействия: специальность 05.02.08 "Технология машиностроения": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ефимов Александр Евгеньевич, 2017. – 166 с.

28. Жарков, И.Г. *Вибрации при обработке лезвийным инструментом.* – Л.: Машиностроение. Ленингра. отделение, 1986. – 184.

29. Жесткость, точность и вибрации при механической обработке / под ред. В.А. Скрагана. – М. – Л.: Машгиз, 1956. – 194 с

30. Зарс, В.В. Вопросы самовозбуждения вибраций металлорежущих станков / В.В. Зарс. – Дис. докт. техн. наук – Л.: ЛПИ, 1972. – 238 с.

31. Ильницкий, И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий – М.: Машгиз, 1958. – 142 с.
32. Каширин, А.И. Исследование вибраций при резании металлов / А.И. Каширин. – М. – Л.: АН СССР, 1944. – 232 с.
33. Кедров, С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 200 с.
34. Кожевников, Д.В., Кирсанов С.В. Резание материалов: Учебник для вузов / Под общ. Редакцией С.В. Кирсанова. , 2006, 272 с. ил.
35. Костина, М.В., Ригина Л.Г., Кудряшов А.Э. и др. Фазовые превращения в азотсодержащих сталях на основе 13% Cr // Металлы, 2024, № 2, с. 52-63. DOI 10.31857/S0869573324025263.
36. Кошелева, Е.В. Технологическое обеспечение качества прецизионных поверхностей деталей типа «тел вращения» из титановых сплавов: специальность 05.02.08 «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кошелева Елена Викторовна, 2018. – 173 с.
37. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
38. Кузнецов, В. В., Рубцов Э. Р., Шкуряков Н. П. Материаловедение. Железоуглеродистые сплавы. Строение. Структура. Свойства: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 80 с.
39. Макаров, А.Д. Оптимизация процессов резания / А.Д. Макаров. – М.: Машиностроение, 1976. – 278 с.
40. Максаров, В.В. Применение высокочастотного волнового воздействия для технологического обеспечения качества расточных поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов / В.В. Максаров, А.О. Минин, Д.В. Васильков // Цветные металлы. – 2025. – № 1. – С. 76-83. - DOI: 10.17580/tsm.2025.01.11.
41. Максаров, В.В. Теория и методы моделирования и управления процессом стружкообразования при лезвийной механической обработке / В.В. Максаров. – Дисс. док. техн. наук – СПб.: ГТУ, 1999. – 340 с.

42. Максаров В.В. Технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса с применением локального криогенного воздействия / В.В. Максаров, **В.Д. Нгуен**, А.М. Щипачев, А. Е. Ефимов // *Металлообработка*. – 2024. – № 6(144). – С. 33-41. – DOI 10.25960/mo.2024.6.33.

43. Максаров, В.В. Технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей заготовки из сталей аустенитного класса / В.В. Максаров, **В.Д. Нгуен**, А.Е. Ефимов, И.А. Бригаднов // *Металлообработка*. – 2023. – № 1(133). – С. 47-54. – DOI 10.25960/mo.2023.1.47.

44. Максаров, В.В. Технологическое обеспечение качества поверхности заготовки на основе локального криогенного воздействия при обработке аустенитных сталей / В.В. Максаров, **В.Д. Нгуен**, А.Д. Халимоненко, П.В. Шишкин // *Черные металлы*. – 2024. – № 9. – С. 82-87. DOI: 10.17580/chm.2024.09.13.

45. Максаров, В.В. Технологическое обеспечение качества прецизионных поверхностей деталей типа "тел вращения" из титановых сплавов / В.В. Максаров, Е.В. Кошелева, А.Ю. Важенин // *Металлообработка*. - 2018. - № 4 (106). - С. 52 – 59.

46. Минин, А.О. Технологическое обеспечение качества растачиваемых поверхностей изделий из коррозионностойких алюминиевых сплавов на основе высокочастотного волнового воздействия: специальность 2.5.6. «Технология машиностроения»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Минин Александр Олегович, 2025. – 133 с.

47. Мурашкин, С.Л. Колебания и устойчивость движения систем станков с нелинейными характеристиками процесса резания / С.Л. Мурашкин. – Дис. докт. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1980. – 548 с.

48. Мурашкин, Л.С. Исследования динамики процесса резания / Л.С. Мурашкин. – Дис. докт. техн. наук – Л.: ЛПИ, 1958. – 348 с.

49. **Нгуен, В.Д.** Криогенная обработка и методы криогенной обработки нержавеющей аустенитных сталей / **В.Д. Нгуен** // *Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация: Материалы международной научно-*

практической конференции, Санкт-Петербург, 26 января 2024 года. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. – С. 36-39.

50. **Нгуен, В.Д.** Методы механической обработки аустенитной стали с дроблением стружки, их преимущества и недостатки / **В.Д. Нгуен** // От качества инструментов к инструментам качества: Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, Тула, 19–20 октября 2023 года. – Тула: Тульский государственный университет, 2023. – С. 138-142.

51. **Нгуен, В.Д.** Проблемы, возникающие при механической обработке. Требования, предъявляемые к обеспечению качества обрабатываемой поверхности / **В.Д. Нгуен** // Машиностроение: инновационные аспекты развития: Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 29 марта 2024 года. – Санкт-Петербург: НИЦ МС, 2024. – С. 49-53.

52. **Нгуен, В.Д.** Формирование метастабильной структуры в поверхностном слое заготовки из аустенитной стали / **В.Д. Нгуен** // Россия молодая: Сборник материалов XVII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых с международным участием, Кемерово, 22-25 апреля 2025 г. – Кемерово: КузГТУ, 2025. - С. 44207.1-4.

53. Некрасов, Р.Ю. Определение оптимальных режимов резания при обработке труднообрабатываемых материалов / Р.Ю. Некрасов, О.А. Темпель, Д.Е. Васьков// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2022. - № 4. - с. 484 – 489.

54. Новик, Ф.С., Арсов Я. Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

55. Патент № RU 2 578 875 C1 Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ механической обработки с дроблением стружки: № 2014148057/02: заявл. 27.11.2014; опубл. 27.03.2016 / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный".

56. Патент № RU 2 641 444 C1 Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ механической обработки стальной заготовки с дроблением стружки: № 2016126241: заявл. 29.06.2016: опубл. 17.01.2018 / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов, Р. В. Вьюшин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

57. Патент № RU 2 696 512 C1 Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ механической обработки стальной заготовки с дроблением стружки: № 2018118301: заявл. 17.05.2018: опубл. 02.08.2019 / В.В. Максаров, Д. Ю. Тимофеев, А.Ю. Важенин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

58. Патент № RU 2 699 469 C1 Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ механической обработки стальной заготовки с дроблением стружки: № 2019112216: заявл. 22.04.2019: опубл. 05.09.2019 / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов, А.И. Кексин; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

59. Патент № RU 2 764 449 C1 Российская Федерация, МПК В23В 1/00. Способ механической обработки стальной заготовки с дроблением стружки: № 2021121296: заявл. 19.07.2021: опубл. 17.01.2022 / В.В. Максаров, А. Е. Ефимов; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет".

60. Патент № 2804202 Российская Федерация, МПК В23В 1/00 (2006.01), СПК В23В 1/00 (2023.08). Способ механической обработки стальной заготовки аустенитного класса с дроблением стружки. Заявка № 2023101748: заявл. 27.01.2023: опубл. 26.09.2023 / В.В. Максаров, **В.Д. Нгуен**, А.Е. Ефимов; заявитель/патентообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет». – 14 с.: ил.

61. Подураев, В.Н. Обработка резанием с вибрациями / В.Н. Подураев. – М.: Машиностроение, 1970. – 351 с.

62. Подураев, В. Н. Резание труднообрабатываемых материалов. Учебное пособие для вузов. М. «Высшая школа», 1974. 587с.
63. Попилов, Л.Я. Справочник по электрическим и ультразвуковым методам обработки материалов. «Машиностроение», 1971 г. 544 с.
64. Рыжкин, А. А. Обработка материалов резанием / А. А. Рижкин, К. Г. Шучев, М. М. Климов. Учебное пособие. – Ростов н/Д: Феникс, 2008, – 411 с.
65. Самохоцкий, А.И., Парфеновская Н.Г. Технология термической обработки металлов. Изд. 2-е, перераб. И доп. М., «Машиностроение», 1976, 311 с., с ил.
66. Сидняев, Н.И. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных: учебное пособие для магистров: учебное пособие для студентов и аспирантов вузов, обучающихся по специальности «Прикладная математика»: Магистр. Теория планирования эксперимента и анализ статистических данных / Н. И. Сидняев. – Москва: Юрайт, 2012. – 399 с.
67. Суранов, А.Я. Справочник по функциям LabView / А.Я. Суранов. - М.: ДМК Пресс, 2007. – 536 с.
68. Табаков, В.П. Основы теории резания металлов. Сборник лабораторных работ и практических занятий: учебно-методическое пособие / В.П. Табаков, Д.И. Сагитов. – Ульяновск: УлГТУ, 2022. – 67 с.
69. Тарасов, В. А. Методы анализа в технологии машиностроения. Аналитическое моделирование динамически процессов обработки материалов / В.А. Тарасов – Учебн. пособие для студентов ВУЗОВ. – М.: из-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 1996. – 188 с.
70. Ташлицкий, Н.И. Первичный источник энергии возбуждения автоколебаний при резании металлов / Н.И. Ташлицкий. // Вестник машиностроения. – 1960. – № 2.– С.45– 50.
71. Тимофеев, Д. Ю. Автоматизация и управление процессом стружкодробления на основе предварительного термического воздействия на обрабатываемый материал: специальность 05.13.06 "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям)": диссертация на

соискание ученой степени кандидата технических наук / Тимофеев Дмитрий Юрьевич. – Санкт-Петербург, 2004. – 238 с.

72. Фетников, Г. П., Карпман М. Н., Матюнин В. М., и др. Материаловедение и технология металлов. – М.: Высш. шк., 2001. — 638 с.

73. Шрубченко, И.В. Технологическое обеспечение качества: лабораторный практикум / И.В. Шрубченко, Т.А.Дуюн. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. – 33 с.

74. Эльясберг, М.Е. Автоколебания металлорежущих станков / М.Е. Эльясберг. // Теория и практика. – СПб.: Изд. ОКБС, 1993. – 180 с.

75. Эльясберг, М.Е. Упрощенная модель многоконтурной динамической системы для расчета станка на устойчивость при резании / М.Е. Эльясберг, В.А.Демченко. // Станки и инструмент, 1987. – №8 – С. 4 – 7.

76. Amresh Kumar, Rajesh Sharma, Santosh Kumar, Prajjawal Verma. A review on machining performance of AISI 304 steel. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 56(6), pp. 2945 - 2951, DOI: 10.1016/j.matpr.2021.11.003.

77. Aurich J.C., Patrick M., Benjamin K., Eifler D., Smaga M., Skorupski R. Characterization of deformation induced surface hardening during cryogenic turning of AISI 347 // *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014. 63(1). DOI: 10.1016/j.cirp.2014.03.079.

78. Artamonov E. V., Dmitriy Vasil'yev, Chernyshov M. O. Chip Breaking During Automated Processing by Cutting Hard-to-Work Steels by Integrated Use of Chip Breaking Tools and High-Temperature Embrittlement. *Mechanical engineering and machine science*. 2020. DOI: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-8-22.

79. Arzoo M.Z., Hassan M., Gupta N. A Comparison Study between Conventional and Cryogenic Machining // *Innovations in Mechanical Engineering*, 2022, pp. 329-337. DOI: 10.1007/978-981-16-7282-8_22.

80. Benjamin Kirsch, Hendrik Hotz, Ralf Müller, Steven Becker, Annika Boemke, Marek Smaga, Tilmann Beck. Generation of deformation-induced martensite when cryogenic turning various batches of the metastable austenitic steel AISI 347. *Production Engineering*, 2019, 13(3-4), с. 343-350, DOI: 10.1007/s11740-018-00873-0.

81. Che Haron, Shalina Sheik Muhamad, Jaharah A. Ghani. A review on future implementation of cryogenic machining in manufacturing industry. *Progress in Industrial Ecology an International Journal*, 2018, 12(3): ст. 260 - 283, DOI:10.1504/PIE.2018.10018040.
82. Deng X.T., Cheng M., Zhang S.H., Song H.W., Taha Mohamed Adel. Residual stresses and martensite transformation in AISI 304 austenitic stainless steel. *Materials Research Express*, 2018, 6(1), 016503, DOI: 10.1088/2053-1591/aae292.
83. Hendrik Hotz, Benjamin Kirsch. Influence of tool properties on thermomechanical load and surface morphology when cryogenically turning metastable austenitic steel AISI 347. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 52: pp. 120-131, DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.01.043.
84. Jun-Hwan Kim, Eun-Jung Kim, Choon-Man Lee. A study on the heat affected zone and machining characteristics of difficult-to-cut materials in laser and induction assisted machining. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 57(5): pp. 499-508, DOI: 10.1016/j.jmapro.2020.07.013.
85. Lara Vivian Fricke, Gregory Gerstein, Bernd Breidenstein, Hai Nam Nguyen, Marc-André Dittrich, Hans Jürgen Maier, David Zaremb. Deformation-induced martensitic transformation in AISI304 by cryogenic machining. *Materials Letters*, 2020, 285, DOI: 10.1016/j.matlet.2020.129090.
86. Lara Vivian Fricke, Gregory Gerstein, Andreas Kotzbauer, Bernd Breidenstein, Sebastian Barton, Hans Jürgen Maier. High Strain Rate and Stress-State-Dependent Martensite Transformation in AISI 304 at Low Temperatures. *Metals - Open Access Metallurgy Journal*, 2022, 12(5):747, DOI: 10.3390/met12050747.
87. Litovchenko Yu., Akkuzin S.A., Polekhina N.A., Almaeva K.V., Moskvichev E.N., Tyumentse A.N. v. Effect of liquid nitrogen and warm deformation on the microstructure and mechanical properties of 321-type metastable austenitic steel. *Materials Science and Engineering A*, 2021, 824(12):141525, DOI: 10.1016/j.msea.2021.141525.
88. Maksarov, V.V. Machining of Austenite Steels Using the Method of Preliminary Local Cryogenic Treatment / V.V. Maksarov, **V.D. Nguyen** // *International*

Journal of Engineering, Transactions B: Applications. – 2026. – Vol. 39, Issue 5. - pp. 1267-1274. DOI: 10.5829/ije.2026.39.05b.18.

89. Moritz Glatt, Hendrik Hotz, Patrick Kölsch, Avik Mukherjee, Benjamin Kirsch, Jan C. Aurich. Predicting the martensite content of metastable austenitic steels after cryogenic turning using machine learning. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2021, 115(3), pp. 749-757, DOI: 10.1007/s00170-020-06160-6.

90. Patrick Mayer, Benjamin Kirsch, Christopher Müller, Hendrik Hotza, Ralf Müller, Steven Becker, Erik von Harbou, Robert Skorupski, Annika Boemke, Marek Smaga, Dietmar Eifler, Tilmann Beck, Jan C. Aurich. Deformation induced hardening when cryogenic turning. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2018, 23, DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.10.003.

91. Vologzhanina S., Igolkin A., Peregudov A., Baranov I., Martyushev N. Effect of the deformation degree at low temperatures on the phase transformations and properties of metastable austenitic steels // *Obrabotka Metallov*, 2022, 24(1), pp. 73-86. DOI: 10.17212/1994-6309-2022-24.1-73-86.

92. Vologjanina S.A., Igolkin A.F., Petkova A., Study of effect of low temperature and deformation on properties of austenitic steel 12KH18N10T, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 2019, 25 (04), pp. 83–93. DOI: 10.18721/JEST.25407.

93. Yansong Zhang, Huan Xue, Yongchun Li, Xuelin Wang, Xinli Jiang, Chongwen Yang, Kewei Fang, Wenqian Zhang, Hui Jiang. Effects of Multi-Pass Turning on Stress Corrosion Cracking of AISI 304 Austenitic Stainless Steel, 2022, *Micromachines* 13(10):1745, DOI: 10.3390/mi13101745.

94. Yingshuai Xu, ZhihuiWan, Ping Zou, Qinjian Zhang. Experimental study on chip shape in ultrasonic vibration–assisted turning of 304 austenitic stainless steel. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(8), DOI: 10.1177/1687814019870896.

95. Yu Su, Guoyong Zhao, Yugang Zhao, Jianbing Meng, Chunxiao Li. Multi-Objective Optimization of Cutting Parameters in Turning AISI 304 Austenitic Stainless

Steel. Metals - Open Access Metallurgy Journal, 2020, 10(2):217, DOI:
10.3390/met10020217.

ПРИЛОЖЕНИЯ А

Планирование экспериментального исследования и его результаты

Таблица А.1 – Результаты экспериментального исследования по определению влияния технологических параметров обработки на шероховатость внутренней поверхности Ra , мкм

Системы опытов	Номер опыта	T, с	S, мм/об	n, мин ⁻¹	t, мм	x0	x1	x2	x3	x4	x1x2	x1x3	x1x4	x2x3	x2x4	x3x4	x1x1	x2x2	x3x3	x4x4	Ra
ПФЭ	1	40	0,21	1250	1,25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,417
	2	20	0,21	1250	1,25	1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1,423
	3	40	0,15	1250	1,25	1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1,346
	4	20	0,15	1250	1,25	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1,523
	5	40	0,21	460	1,25	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1,475
	6	20	0,21	460	1,25	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1,532
	7	40	0,15	460	1,25	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1,503
	8	20	0,15	460	1,25	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1,587
	9	40	0,21	1250	0,75	1	1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	1	1	1	1	1,337
	10	20	0,21	1250	0,75	1	-1	1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1,494
	11	40	0,15	1250	0,75	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	1	1,337
	12	20	0,15	1250	0,75	1	-1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	1	1	1,481
	13	40	0,21	460	0,75	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1,421
	14	20	0,21	460	0,75	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	1	1	1,443
	15	40	0,15	460	0,75	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1,425
	16	20	0,15	460	0,75	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,519

Продолжения Таблицы А.1

Системы опытов	Номер опыта	T, сек	S, мм/об	n, мин ⁻¹	t, мм	x0	x1	x2	x3	x4	x1x2	x1x3	x1x4	x2x3	x2x4	x3x4	x1x1	x2x2	x3x3	x4x4	Ra
Опыт в звездных точка	17	50	0,18	750	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1,339
	18	10	0,18	750	1	1	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1,501
	19	30	0,24	750	1	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1,402
	20	30	0,12	750	1	1	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	1,428
	21	30	0,18	2000	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1,342
	22	30	0,18	300	1	1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	1,437
	23	30	0,18	750	1,5	1	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,563
	24	30	0,18	750	0,5	1	0	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	1,438
Опыт в центре плана	25	30	0,18	750	0,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,4
	26	30	0,18	750	0,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,403
	27	30	0,18	750	0,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,412
	28	30	0,18	750	0,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,411
	29	30	0,18	750	0,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,385
	30	30	0,18	750	0,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,367
	31	30	0,18	750	0,15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,401

ПРИЛОЖЕНИЕ Б**Технические характеристики станка, приборов**Таблица Б.1 – технические характеристики станка токарно-винторезного *JET GHB-1340A DRO* (составлено автором)

Параметр	Значение
Напряжение, В	400
Диаметр обточки над станиной, мм	330
Конус шпинделя	МК-5
Ширина станины, мм	187
Мощность двигателя, кВт	2
Масса, кг	650
Максимальный размер резца, мм	16×16
Количество метрической резьбы	23
Диапазон метрической резьбы, мм	0,45 – 10
Длина, мм	1905
Ширина, мм	762
Высота, мм	1200

Таблица Б.2 – Технические характеристики профилометра SURFTEST SJ-210 (составлено автором)

Модель	SJ-210 P
№	178930 -2D
Назначение	Измерение шероховатости
Диапазон измерений	
По оси Z	360 мкм
Блок привода	
Скорость измерения	0,25 мм/с; 0,5 мм/с; 0,75 мм/с
Датчик	
Метод измерения	Дифференциальная индуктивность
Щуп	Алмазный наконечник
Радиус опоры	40мм
Измерительное усилие	0,75мН
Дисплейный блок	
Профили	Профиль шероховатости (R); R-Motif; DF-Профиль и др.
Стандарты шероховатости	ENISO; VDA; JIS; ANSI и Пользовательские
Длина оценки (L)	0.08мм; 0,25мм; 0,8мм; 2,5мм
Допуск	Цветная индикация
Интерфейс	USB; Digimatic
Источник питания	Блок или аккумулятор

Таблица Б.3 – Технические характеристики инвертированного микроскопа *Leica DM 2500* (составлено автором)

Параметр	Характеристика
Метод контрастирования	Проходящий свет: светлое/темное поле, фазовый контраст, поляризация, интерференционный контраст. Отраженный свет: флуоресценция.
Оси проходящего света	Осветитель в отдельном корпусе
Оси отраженного света	Флуоресцентный осветитель отраженного света, для окуляров с полем зрения до 22, включает: 5-позиционный револьвер для фильтров центрируемые апертурную и полевую диафрагмы заслон для подавления излишнего света. Серый фильтр и заслонка светового пучка, переключаемые.
X/Y столик	С держателем конденсора Телескопическая ручка перемещения столика, устанавливаемая справа или слева Право/левостороннее управление
Револьверная турель смены объективов	Ручная 6-ти/7-ми позиционная для объективов с резьбой M25 пластина призмы объектива
Фокусировка	Колесо фокусировки для грубой/точной фокусировки Регулировка высоты Скорость включения (дополнительно) Два режима установки шага точной фокусировки (1 и 4 мкм)
Максимальный размер резца, мм	16×16
Количество метрической резьбы	23
Диапазон метрической резьбы, мм	0,45 – 10
Длина, мм	1905
Ширина, мм	762
Высота, мм	1200

Таблица Б.4 – Технические характеристики двухканального виброанализатора модели Pruftechnik VibXpert EX (составлено автором)

Параметр	Значение
Измерительные каналы	2 аналоговых канала (А и В), настраиваемые: – Напряжение (АС/DC, ± 30 В max.) – Ток (АС/DC, ± 30 мА max.) – ICP® сигнал (2 мА, 24 В max.) – LineDrive сигнал (10 В, 10 мА max.) 1 аналоговый канал: датчик температуры (NiCrNi) 1 цифровой канал: 1+импульсный вход (скорость вращения, триггер, фазовая отметка). Импульсный и АС сигналы: 0В...26В или -26В ... 0В
Параметры – аналоговый измерительный канал (А и В)	Частотный диапазон 0.5 Гц до 40 кГц Динамический диапазон (измеренный/общий) 96 дБ / 136 дБ Частота дискретизации < 131 кГц на канал
Выходы	На стробоскоп: TTL На наушники и для обработки сигнала
Память	RAM, внутренняя 64 МБ Флеш-карта (CompactFlash) 1 ГБ
Дисплей	LCD, с подсветкой, 480×320 пикселей (1/2 VGA)
Пределы измерений/точность	Колесо фокусировки для грубой/точной фокусировки Регулировка высоты Скорость включения (дополнительно) Два режима установки шага точной фокусировки (1 и 4 мкм)
Максимальный размер резца, мм	Скорость вращения 10..200000 об/мин / $\pm 1\%$ / ± 1 об/мин Температура -50...+1000°C (NiCrNi) / $\pm 1\%$ / ± 1 °C Ускорение зависит от подсоединенного датчика
БПФ	Fmin 0.5 Гц ... 10 Гц, настраиваемая Fmax 200 Гц ... 51.2 кГц, настраиваемая Число линий 400 ... 102400 Окна Rectangular, Hanning, Flattop, Hamming, Blackman, Bartlett, Kaiser

Продолжение Таблицы Б.4

Параметр	Значение
Режимы работы	<p>Многорежимный (без маршрута)</p> <ul style="list-style-type: none"> – Значения величин: вибрация (ускорение, скорость, смещение), ток, напряжение (АС / DC), ударные импульсы (состояние подшипников), температура, скорость вращения – Сигналы: спектр (амплитуда, огибающая), временной сигнал, кепстр, фаза (cross-channel), орбиты, измерения при выбеге, определение собственных частот. Сбор данных (по маршруту) – Навигация посредством «дерева», списка или графиков – Оптимизация процесса для быстрого сбора данных. Балансировка (дополнительно) – Динамическая балансировка в 1 или 2 плоскостях. Запись (дополнительно) – Запись общих значений и спектра – Триггер по времени/событию – История записей
Питание	Литий-ионный аккумулятор (7.2В / 4.8Ач). Перезаряжаемый. Время зарядки < 5 часов
Температурный диапазон	Хранения -20°C .. +60°C Рабочий -10°C .. +50°C Зарядки 0°C .. +50°C
Класс защиты	IP65, пылезащищенный и водонепроницаемый
Взрывобезопасность	EXII 2 G Ex ib IIC T4
Размеры	250 x 220 x 37 мм (Д x Ш x В)
Вес	2,3 кг

Таблица Б.5 – Технические характеристики Магнитометра Magnetoscop 1.070
(составлено автором)

Параметр	Значение
Диапазон измерений	От 0,1 нТ до 50 мТ μг от 1,0 до 2,0
Погрешность измерений, полевые измерения	1,5% диапазона измерений
Погрешность измерений, измерение проницаемости	5% измеренного значения
Разрешение	24 бит ADC
Размеры контрольного прибора	221 x 102 x 41 мм
Вес вместе с батареями	0,62 кг
Степень защиты	IP 54
Температура окружающей среды	0 ... +40°C
Тип батареи	Mignon, AA, LR6 - 4 штук

ПРИЛОЖЕНИЕ В**Патент на способ механической обработки стальной заготовки
аустенитного класса с дроблением стружки**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2804202**СПОСОБ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА
С ДРОБЛЕНИЕМ СТРУЖКИ**

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
"Санкт-Петербургский горный университет" (RU)*

Авторы: *Максаров Вячеслав Викторович (RU), Нгуен Ван
Дао (RU), Ефимов Александр Евгеньевич (RU)*

Заявка № 2023101748

Приоритет изобретения 27 января 2023 г.

Дата государственной регистрации
в Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 26 сентября 2023 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 27 января 2043 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(19) **RU** ⁽¹¹⁾ **2 804 202** ⁽¹³⁾ **C1**(51) МПК
B23B 1/00 (2006.01)**(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ**

Статус: действует (последнее изменение статуса: 03.05.2024)
 Пошлина: учтена за 3 год с 28.01.2025 по 27.01.2026. Установленный срок для уплаты пошлины за 4 год: с 28.01.2025 по 27.01.2026. При уплате пошлины за 4 год в дополнительный 6-месячный срок с 28.01.2026 по 27.07.2026 размер пошлины увеличивается на 50%.

(52) СПК
B23B 1/00 (2023.08)

(21)(22) Заявка: [2023101748](#), 27.01.2023

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
27.01.2023

Дата регистрации:
26.09.2023

Приоритет(ы):
(22) Дата подачи заявки: 27.01.2023

(45) Опубликовано: [26.09.2023](#) Бюл. № 27

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: RU 2641444 C2, 17.01.2018. SU 1583216 A1, 07.08.1990. SU 1161251 A1, 15.06.1985. US 20180043504 A1, 15.02.2018. DE 4290891 T0, 13.05.1993.

Адрес для переписки:
190106, Санкт-Петербург, В.О., 21 линия, 2,
ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский горный университет", Патентно-лицензионный отдел

(72) Автор(ы):
Максаров Вячеслав Викторович (RU),
Нгуен Ван Дао (RU),
Ефимов Александр Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский горный университет" (RU)

(54) СПОСОБ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ АУСТЕНИТНОГО КЛАССА С ДРОБЛЕНИЕМ СТРУЖКИ**(57) Реферат:**

Изобретение относится к области механической обработки и предназначено для обработки сталей аустенитного класса. Способ механической обработки стальной заготовки с дроблением стружки включает предварительную подготовку обрабатываемой поверхности путем термического воздействия на глубину снимаемого припуска. Предварительную подготовку осуществляют по прямой траектории параллельно оси заготовки под прямым углом к обрабатываемой поверхности путем локального криогенного непрерывного воздействия жидким азотом под давлением от 0,2 МПа до 0,5 МПа и температуре от - 120 до - 130°C. Пятно контакта диаметром d_n обеспечивает структурные превращения и фазовые переходы в аустенитной стали на глубину от 0,3 до 0,5 величины снимаемого

ПРИЛОЖЕНИЕ Г**Акт о промышленном внедрении результатов диссертации**

Утверждаю
Директор ООО "Техноконсалтинг"
Рыбин Д.А.

Дата «02» декабря 2025 г.

АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертации на тему
«Технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей
деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе
локального криогенного воздействия по научной специальности 2.5.6.
«Технология машиностроения» Нгуен Ван Дао

Комиссия в составе:

Председатель: Рыбин Дмитрий Александрович

Члены комиссии: Комаристый Александр Михайлович

составили настоящий акт (справку) о том, что результаты диссертации на тему «Технологическое обеспечение качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия», представленной на соискание ученой степени кандидата наук, использованы в производственном процессе ООО "Техноконсалтинг" при разработке технологии обработки поверхности изделия из коррозионных и жаропрочных материалов аустенитного класса.

Обработка эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» с применением локального криогенного воздействия по предлагаемому способу позволила достигнуть заданного качества поверхности, повысить эксплуатационные характеристики изделия.

Результаты диссертационного исследования Нгуен В.Д. могут быть использованы в технологических процессах финишного изготовления изделия из коррозионных и жаропрочных материалов аустенитного класса.

Благодаря применению предлагаемого способа для обработки деталей типа «тел вращения» из аустенитного класса, возможно повысить эффективность процесса обработки вышеуказанных изделий.

Председатель: Рыбин Дмитрий Александрович

Члены комиссии: Комаристый Александр Михайлович

