

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

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Максаров Вячеслав Викторович

Официальные оппоненты:

Мнацаканян Виктория Умедовна
доктор технических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», кафедра горного оборудования, транспорта и машиностроения, профессор;

Дмитриев Сергей Иванович
кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Псковский государственный университет», отделение инженерных технологий Передовой инженерной школы гибридных технологий в станкостроении Союзного государства, руководитель.

Ведущая организация - федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **30 июня 2026 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 3321.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан **30 апреля 2026 г.**

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 аустенитной нержавеющей стали 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., Ванчури 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 коррозионноустойчивых 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 работы 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 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 коррозионноустойчивых 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 обработки при применении локального криогенного воздействия на шероховатость обработанной поверхности из коррозионностойких 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 коррозионностойких 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 $R_a = 1,3 \dots 1,4$ 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 $R_a = 1,3 \dots 1,4$ 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.).

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*, микротвердомер *ПМТ-3М*.

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 $R_a = 1,3...1,4$ 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 $R_a = 1,3...1,4$ 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; проведении экспериментальных исследований и создании 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, 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, на соискание ученой степени доктора наук (далее - Перечень ВАК), в 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получен 1 патент на изобретение.

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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, идея работы, научная ценность и задачи исследования.

В первой главе в первой главе представлен аналитический обзор по эксплуатации и современным методам механической обработки коррозионностойких жаропрочных аустенитных материалов; рассмотрены способы обработки деталей типа «тел вращения» с дроблением стружки, выявлены их особенности и варианты решения проблем. На основе анализа обоснованы объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи.

Во второй главе представлены теоретические и экспериментальные исследования по разработке способа механической обработки деталей типа «тел вращения» на основе локального криогенного воздействия и устройства для его осуществления; рассмотрены изменения структуры и свойств

поверхностного слоя заготовки, что является причиной, обеспечивающей устойчивое сегментирование и дробление стружки. Сформулированы выводы и даны рекомендации по использованию полученных результатов.

В третьей главе на основании разработанного технологического метода механической обработки деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса с локальным криогенным воздействием и устройства для его осуществления разработана динамическая модель ТСМО. Исследования проводили на аустенитной стали 08X18H10T.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния применяемого метода локального криогенного воздействия на качество эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследования.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

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 $R_a = 1,3...1,4$ мкм.

В результате теоретических и экспериментальных исследований разработан способ механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса с дроблением стружки на основе локального криогенного воздействия (рисунок 1).

Под воздействием низкой криогенной температуры жидкого азота (-196°C) в поверхностном слое происходит структурные мартенситные превращения на глубину от 0,3 до 0,5 величины

глубины резания t , которые приводят к значительным изменениям микроструктуры и физико-механических свойств обрабатываемого материала из аустенитной стали, следовательно, к изменениям условий резания (рисунок 2, 3).

При определении диапазона технологических параметров криогенного воздействия установлено, что параметры будут варьироваться: время контакта с жидким азотом $t_{кон} = 30-60$ с; подача $S = 0,12 - 0,2$ мм/об; частота вращения $n = 750-1250$ мин⁻¹; глубина резания $t = 0,15-0,5$ мм.

Разработанные способ и устройство реализованы на базе универсального токарно-винторезного станка *JET GHB 1340A DRO* (рисунок 4).

Предложенный способ способствует устойчивому сегментированию и равномерному дроблению сливной стружки, образующейся из-за высокой пластичной характеристики аустенитных сталей, а также позволяет удалять наростообразование во время резания. Применение способа ведет к уменьшению шероховатости поверхности до $R_a = 1,3...1,4$ мкм, снижению вредных факторов (автоколебаний, износа режущего инструмента), и т.д.), следовательно, к увеличению общей производительности.

В результате проведенных исследований были получены отрезки стружки с равной длиной в диапазоне от 150...200 мм, что соответствует ГОСТ 2787-75. Результаты применения метода механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия подтверждены и представлены на рисунках 5 и 6.

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 $R_a = 1,3...1,4$ мкм.

На основании решенных задач и проведенной аппроксимации, разработана эквивалентная математическая модель. Полученная модель позволяет описать поведение четырехконтурной модели.

Проведение экспериментальных работ при механической обработке резанием деталей из стали 08X18H10T с применением двухканального виброанализатора модели VIBXpert EX, обеспечило возможность через измерение показаний вибрационных ускорений оценить автоколебания системы, которые подтвердили наличие подавления колебательного процесса при механической обработке заготовки с локальным криогенным воздействием (рисунок 7).

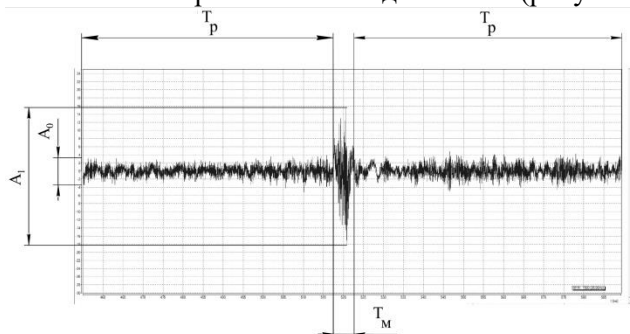


Рисунок 7 – Виброускорения при точении стали 08X18H10T, предварительно подвергнутой локальному криогенному воздействию: $V = 70$ м/мин; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,4$ мм; $n = 750$ мин⁻¹,

где T_p - процесс обработки в исходном материале; T_m - процесс обработки в упроченной зоне с мартенситной структурой по границам аустенитных зерен

В ходе экспериментальных исследований выявлено, что при внедрении инструмента в метастабильной зоне с измененными физико-механическими свойствами, в отличие от исходного материала, наблюдается резкое увеличение амплитуды A_1 в течение временного интервала T_m . 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 . Полученные результаты подтверждают, что метод локального криогенного воздействия не оказывает существенного влияния на динамическую устойчивость технологической системы механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса.

В процессе исследований, направленных на определение устойчивости технологической системы, была получена диаграмма области устойчивости при механической обработке изделий из аустенитной стали 08X18H10T в границах параметров скорости резания V и ширины срезаемого слоя $b_{рез}$.

Диаграмма (рисунок 8) содержит кривые распределения граничных условий, отражающие области устойчивости системы при традиционной токарной обработке и токарной обработке изделий из аустенитной стали 08X18H10T на основе локального криогенного воздействия.

При этом правая граница является отражением области параметров обработки, при которых система является нестабильной. Отсюда можно сделать вывод, что обработка за пределами данной области приводит к ухудшению качественных показателей обработанной поверхности детали, что является следствием возникающих вибраций.

Наряду с этим режимные параметры обработки левой границы представляют процесс как стабильный. Режимные параметры резания в точках K_1 и K_2 , где K_1 – произвольная точка, принятая для традиционного процесса резания; K_2 – точка для процесса механической обработки резанием на основе локального криогенного воздействия, обеспечивают абсолютную устойчивость системы. Тогда как в точке K_3 , расположенной за границей устойчивости, система идентифицируется как динамически неустойчивая.

Таким образом, можно подтвердить, что при механической обработке на основе локального криогенного воздействия в точке K_2 наблюдается снижение колебательного процесса, и она находится в устойчивой зоне резания, в то время как при обычной механической обработке эта точка лежит уже в неустойчивой зоне.

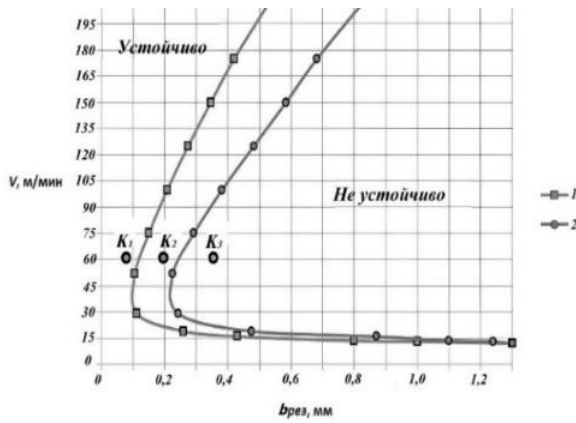


Рисунок 8 - Граница области устойчивости при обработке аустенитной стали 08X18N10T, где 1 – обработка традиционным методом; 2 – механическая обработка резанием на основе локального криогенного воздействия

Ряд проведенных экспериментальных и теоретических исследований по влиянию локального криогенного воздействия на динамическую устойчивость технологической системы показал, что данный способ способствует изменению условий виброактивности процесса механической обработки и приводит систему в устойчивое состояние.

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.

На основании разработанного технологического способа механической обработки изделий из коррозионноустойчивых и жаропрочных материалов аустенитного класса проводились экспериментальные исследования по влиянию варьируемых параметров на формирование качественных характеристик изделий: шероховатости эксплуатационных поверхностей R_a .

В ходе исследования установлено, что применение разработанного способа локального криогенного воздействия позволяет обеспечить шероховатость рабочих поверхностей $R_a = 1,3 \dots 1,4$ мкм.

На основании полиномиальных функций (рисунок 9), а также статистического анализа результатов экспериментов установлено, что на шероховатость поверхностей изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса наибольшее влияние оказывают время контакта с жидким азотом T и частота вращения n , затем глубина резания t и величина продольной подачи S .

По результатам проведения экспериментальных исследований выполнена статистическая обработка полученных данных, которая позволила получить регрессионные математические зависимости, учитывающие варьируемые технологические параметры локального криогенного воздействия и позволяющие получить значения шероховатости при механической обработке изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса:

Шероховатость поверхностей R_a , мкм (1):

$$R_a = 2,56 - 0,02T - 5,69S - 0,71t + 0,05TS - \quad (1)$$
$$-4,73 \cdot 10^{-6}Tn + 1,02 \cdot 10^{-3}Sn - 1,91 \cdot 10^{-4}nt +$$
$$+9,38S^2 + 0,48t^2$$

Таким образом, полученные результаты являются основой для технологического обеспечения качества эксплуатационных поверхностей деталей типа «тел вращения» при обработке изделий из коррозионностойких и жаропрочных материалов аустенитного класса на основе локального криогенного воздействия.

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 устройством 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 $R_a = 1,3 \dots 1,4$ 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.

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

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

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. 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/мо.2023.1.47.

2. 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/мо.2024.6.33.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. 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.

4. 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.

5. 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

Публикации в прочих изданиях:

6. **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.

7. **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.

8. **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.

9. **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.

Патенты/свидетельства на объекты интеллектуальной собственности:

10. 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.

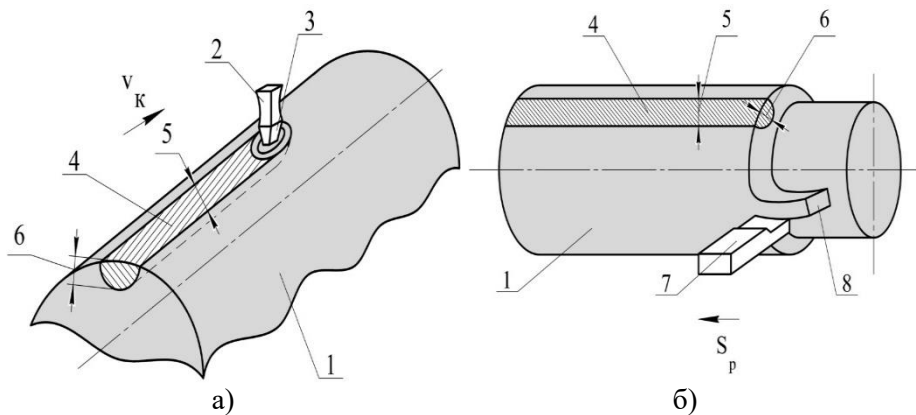


Рисунок 1 – Метод механической обработки деталей типа «тел вращения» из сталей аустенитного класса: а) предварительное ЛКВ на поверхности заготовки; б) процесс механической обработки с ЛКВ,

где: 1 – цилиндрическая заготовка; 2 – устройство с жидким азотом; 3 – сопло устройства с жидким азотом; 4 – метастабильная структура; 5 – ширина метастабильной структуры; 6 – глубина метастабильной структуры; 7 – режущий инструмент; 8 – стружка

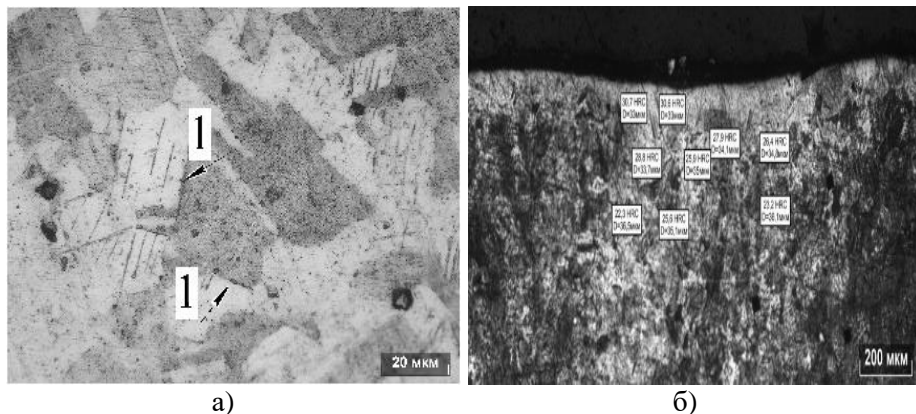


Рисунок 2 – Микроструктура аустенитной стали: а) после криогенного воздействия; б) после криогенного воздействия с пластическим деформированием

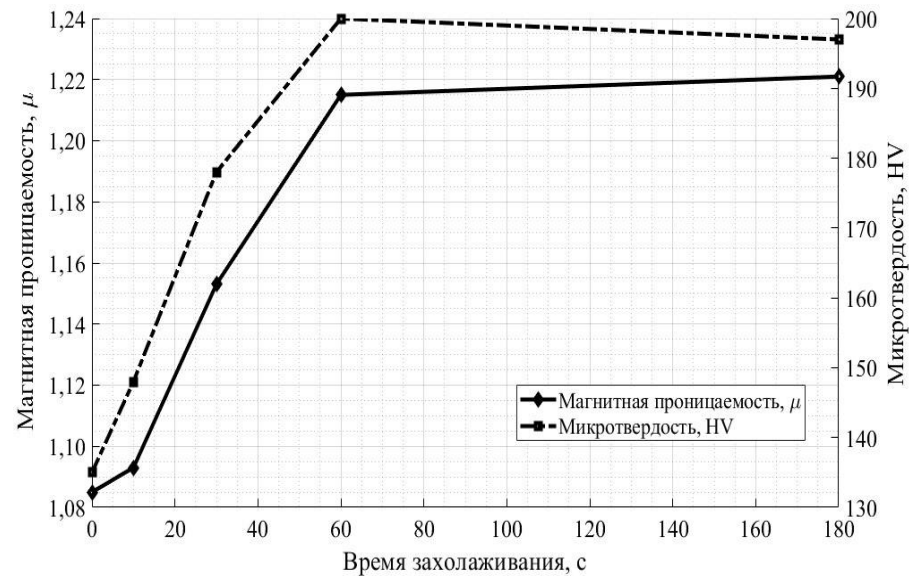


Рисунок 3 – Изменение свойств (магнитной проницаемости, твердости) аустенитной стали при криогенном воздействии в зависимости от времени криогенной обработки

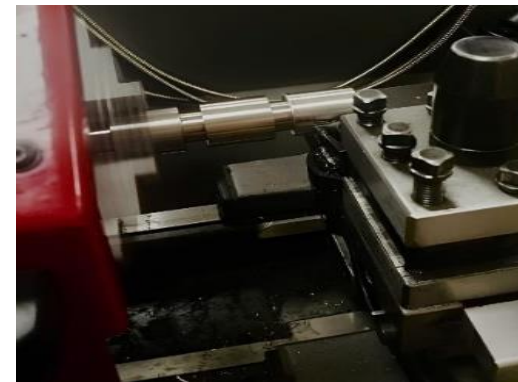
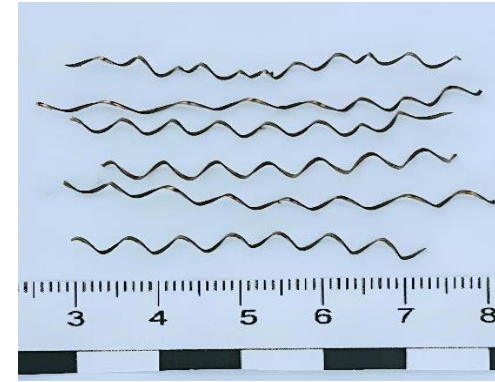


Рисунок 4 – Способ механической обработки деталей типа «тел вращения» с дроблением стружки на основе локального криогенного воздействия

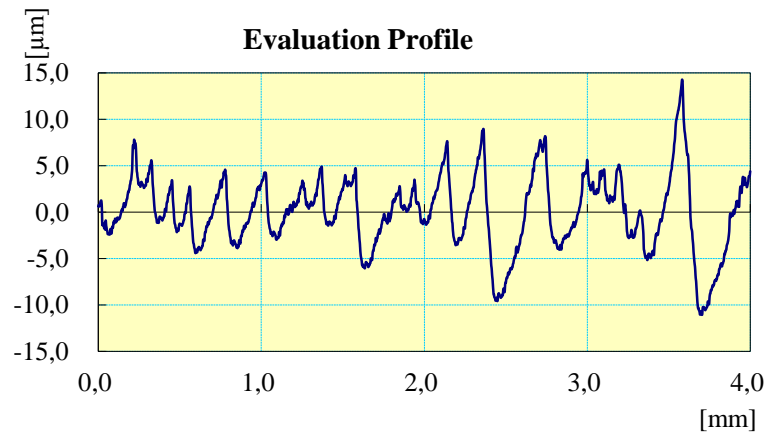


а)

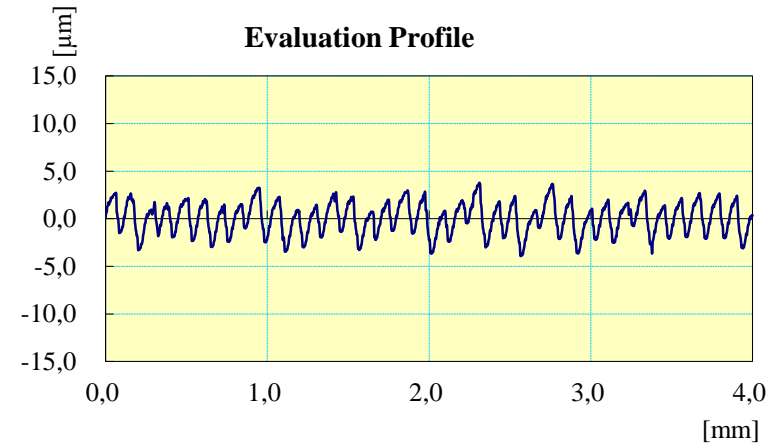


б)

Рисунок 5 - Стружка, образующая при механической обработке изделия из аустенитной стали 08X18H10T: а) обычное точение; б) точение на основе ЛКВ

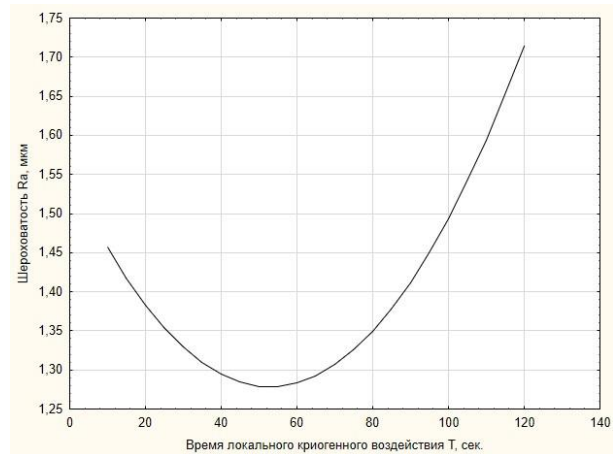


а)

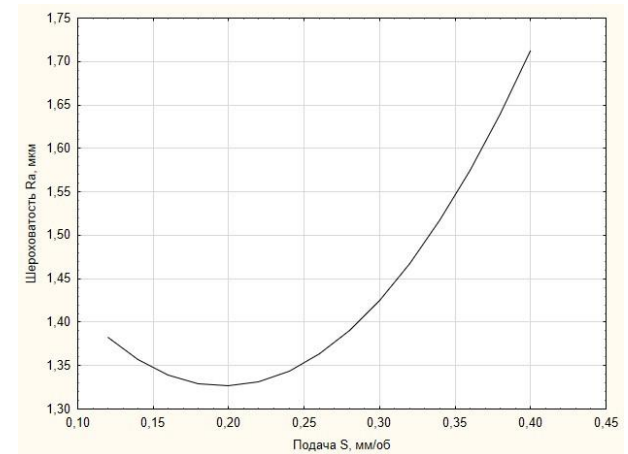


б)

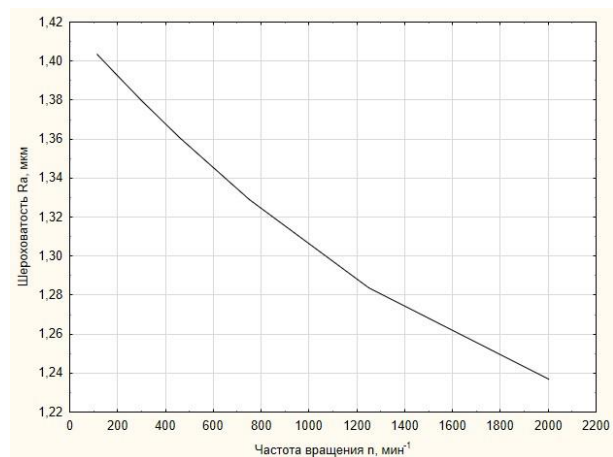
Рисунок 6 - Сравнение значений шероховатости обработанной поверхности при механической обработке: а) – без ЛКВ; б) с ЛКВ



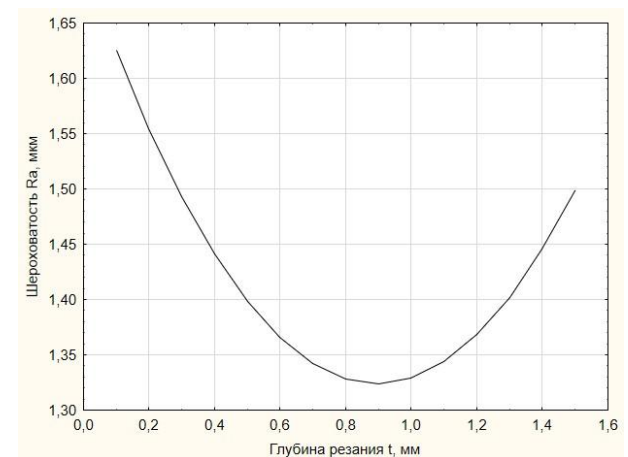
а



б



в



г

Рисунок 9 – Графики влияния: а) времени локального криогенного воздействия; б) подачи; в) частоты вращения; г) глубины резания на шероховатость Ra , мкм при механической обработке деталей типа «тел вращения» из стали 08X18H10T