

*На правах рукописи*

Горбунов Олег Игоревич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ СТАЛЕЙ  
АУСТЕНИТНОГО КЛАССА С ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫМ ЛОКАЛЬНЫМ  
КРИОГЕННЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ**

**Специальность 05.02.07 – Технология и оборудование механической и  
физико-технической обработки**

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

Санкт-Петербург – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
Максаров Вячеслав Викторович.

**Официальные оппоненты:**

Васильков Дмитрий Витальевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты» ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический университет "Военмех" им. Д.Ф. Устинова»

Кульчицкий Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» Санкт-Петербургского государственного горного университета

**Ведущая организация:** Федеральное государственное унитарное предприятие центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей"

Защита состоится 29 мая 2012 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.26 ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет", 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.29, в ауд. 41, I учебный корпус.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан 27 апреля 2012 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.26,  
доктор технических наук, профессор

Тисенко В.Н.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время в машиностроении можно выделить широкий класс изделий, совершенствование существующих технологических процессов обработки которых, требует особого подхода при решении задач по обеспечению качества поверхности детали, безопасности производства, снижения себестоимости и т.п. К данному классу относятся, прежде всего, изделия из коррозионно-стойких и жаропрочных сталей и сплавов, обрабатываемые на высокопроизводительном автоматизированном оборудовании. С технологической точки зрения желательно в процессе резания иметь сливную стружку, поскольку она является показателем устойчивости технологической системы, обеспечивает высокое качество обработанной поверхности и гарантированную стойкость инструмента, что особенно важно при автоматизации этого процесса. В реальных условиях обработки заготовок образование сливной стружки соответствует очень узкому диапазону состояния технологической системы в процессе резания, который не всегда совпадает с рекомендуемыми режимами резания и стойкостью инструмента для обеспечения необходимой производительности. Следует также отметить, что сливная стружка существенно затрудняет эксплуатацию технологического оборудования, работающего в автоматизированном цикле, является причиной преждевременного износа и аварий станков и приспособлений, может вызывать травмы обслуживающего персонала, затрудняет процесс комплексной механизации и автоматизации уборки стружки и ее последующей переработки. Таким образом, формирование отрезков стружки заданной длины является одной из важнейших в области лезвийной обработки, особенно при обработке изделий на автоматических станках, станках с ЧПУ и при использовании манипуляторов.

При чистовой лезвийной обработке сталей аустенитного класса одним из наиболее эффективных методов, позволяющих сегментировать стружку, и при этом увеличить скорость обработки, а также повысить стойкость инструмента и качество окончательной поверхности детали, является создание предварительного локального криогенного воздействия (ЛКВ) на внешней поверхности срезаемого слоя, производимое по определенным законам. Особенность процесса точения заготовок, подвергнутых такому воздействию, заключается в периодическом изменении условий резания по сравнению с исходным материалом. Данный метод дает возможность совершенствовать технологию тонкой лезвийной обработки в широком диапазоне

режимов резания, посредством улучшения количественных и качественных показателей технологической системы токарной обработки.

**Целью** диссертационной работы является повышение эффективности тонкой лезвийной обработки на станках автоматах и станках с ЧПУ за счет процесса стружкодробления на основе предварительного локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал аустенитного класса.

Для достижения этой цели требуется решить следующие **задачи**:

- исследовать кинематические характеристики процесса точения при локальном криогенном воздействии на обрабатываемый материал;
- разработать способ и устройства для осуществления локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал;
- разработать динамическую модель технологической системы, с учетом реологических особенностей стружкообразования и с использованием явления пластической деформации в металлах при локальном криогенном воздействии, для оценки стабильности и надежности сегментирования и дробления стружки в области неустойчивого процесса резания;
- создать программный комплекс для управления процессом стружкодробления на основе метода локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал, позволяющий в интерактивном режиме автоматизировать выбор параметров этого воздействия.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования проводились на специальных стендах с применением оригинальных методик, современной аппаратуры, измерительных преобразователей и систем. Моделирование и исследование процессов стружкообразования и стружкодробления осуществлялось с использованием современных вычислительных средств в экспериментально-лабораторном комплексе кафедры “Гибкие автоматические технологии” СПбГПУ и на базе механического производства ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез».

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

- предложена методика определения режимных параметров осуществления локального криогенного воздействия для широкого диапазона обрабатываемых материалов аустенитного класса;
- создана модель для определения области сегментирования стружки в зависимости от неточности формы и шероховатости поверхности, вызванных предыдущим методом получения заготовки;

- разработаны рекомендации по автоматизации технологического процесса механической обработки с целью обеспечения устойчивого отделения отрезков стружки в широком диапазоне обрабатываемых материалов и режимов резания для станков с ЧПУ.

**Практическая значимость работы** заключается в следующем:

- разработан метод для обеспечения сегментирования и дробления стружки в процессе точения при локальном криогенном воздействии на обрабатываемый материал;
- созданы эффективные устройства для нанесения локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал;
- разработаны и предложены технологические рекомендации по локальному криогенному воздействию на обрабатываемый материал в широком диапазоне режимов резания;
- определены параметры нанесения на исходную поверхность заготовки локального криогенного воздействия в зависимости от режимов последующей обработки для обеспечения устойчивого стружкодробления на станках с автоматическим циклом работы;
- создан программный комплекс для управления процессом стружкодробления на основе метода локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал и алгоритмы для автоматизации выбора параметров этого воздействия.

**Научные положения и результаты**, выносимые на защиту:

- метод сегментирования и дробления стружки в процессе точения при локальном криогенном воздействии на обрабатываемый материал;
- кинематические характеристики процесса точения при локальном криогенном воздействии на обрабатываемый материал, позволяющие получать заданные в соответствии с технологическими параметрами отрезки стружки;
- динамическая модель технологической системы, с учетом реологических особенностей стружкообразования при локальном криогенном воздействии, для оценки стабильности и надежности сегментирования и дробления стружки в области неустойчивого процесса резания;
- методика определения режимных параметров нанесения локального криогенного воздействия для широкого диапазона обрабатываемых материалов аустенитного класса;
- модель для определения области сегментирования стружки в зависимости от неточности формы и шероховатости поверхности, вызванных предыдущим методом получения заготовки;

- рекомендации по автоматизации технологического процесса механической обработки с целью обеспечения устойчивого отделения отрезков стружки в широком диапазоне обрабатываемых материалов и режимов резания для станков с ЧПУ.

**Достоверность полученных результатов.** Достоверность полученных в работе положений, выводов и рекомендаций обеспечивается физической и математической корректностью постановки задач и методов их решения; использованием при исследовании современных методов теорий резания, динамики сложных систем, вычислительной техники; высокой сходимостью расчетных и экспериментальных данных; положительным опытом внедрения разработанных методик и рекомендаций в промышленных условиях.

#### **Реализация работы:**

- предложенный программный комплекс для управления процессом стружкодробления на основе метода локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал и алгоритмы для автоматизации выбора параметров этого воздействия интегрированы в программное управление токарных обрабатывающих центров GS-200 на ремонтно-механическом производстве ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез»;

- разработанный метод для обеспечения сегментирования и дробления стружки в процессе чистового точения применен для производства запасных частей к газовым горелкам технологических печей на ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез». Это позволило осуществить управление стружкообразованием в процессе чистовой лезвийной обработки, а также снизить машинное время для этой операции на 20 % и увеличить время стойкости резца на 27...30 %.

**Апробация работы.** Основные положения работы и результаты исследований докладывались и обсуждались на Всероссийских конференциях и на научно-технических семинарах: Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» (Санкт-Петербург, 15-17 мая 2007 г.); II Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» (Санкт-Петербург, 13-15 ноября 2007 г.); семинарах Северо-Западного государственного заочного технического университета (2006-2008 гг.); Санкт-Петербургского института машиностроения (2006-2007 гг.).

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 8 научных работ, в том числе одна работа в издании из Перечня, рекомендованного ВАК РФ.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа изложена на 212 страницах машинописного текста (из них 94 рисунка). Состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 102 наименования, и приложения.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена тема диссертации, обоснована ее актуальность, научная новизна и практическая значимость, сформулированы цель работы и задачи исследования.

**В первой главе** представлен анализ существующих методов и способов дробления стружки в автоматизированных производствах. Теоретические и экспериментальные исследования в области механической обработки металлов резанием позволили глубже понять многие явления в их взаимосвязи и тем самым способствовали совершенствованию технологии обработки металлов. Глубокие исследования в области механики процесса резания выполнены отечественными учеными: Ю.М. Бароном, А.М. Вульфом, Г.И. Грановским, Н.Н. Зоревым, Ю.Г. Кабалдиным, Т.Н. Лоладзе, Л.С. Мурашкиным, С.Л. Мурашкиным, В.Г. Подпоркиным, Н.И. Резниковым, А.Н. Резниковым, А.М. Розенбергом, Н.В. Талановым, М.А. Шатериным и др., а также зарубежными учеными И.Дж. Армарега, Д. Блеком и др. В этой главе выполнен анализ работ, посвященных изучению процессов стружкообразования и сегментированию стружки в технологической системе механической обработки резанием. В результате было установлено влияние методов и способов дробления стружки в процессе токарной обработки на основные физические закономерности процесса резания. В связи с этим были рассмотрены фундаментальные исследования в данной области, выполненные отечественными учеными: И.С. Амосовым, Б.П. Барминым, Д.В. Васильковым, В.Л. Вейцем, Н.А. Дроздовым, И.Г. Жарковым, А.И. Кашириным, В.А. Кудиновым, Л.К. Кучмой, В.В. Максаровым, В.Н. Подураевым, А.В. Пушем, В.Э. Пушем, А.П. Соколовским, Н.И. Ташлицким, М.Е. Эльясбергом и др., а также зарубежными учеными Е.М. Трентом, И. Тлустом и др. Исследования вышеперечисленных авторов позволяют сделать вывод: решение вопроса дробления стружки при обработке резанием имеет большое практическое значение, поскольку позволяет автоматизировать этот процесс на станках с автоматическим циклом работы и

автоматических линиях, а также повысить производительность труда, культуру производства и снизить затраты на последующую транспортировку и переработку стружки. Анализируя особенности механизма сегментации стружки, можно утверждать, что универсального метода, позволяющего надежно дробить стружку металлов аустенитного класса, в настоящее время не существует. Однако на основе предложенной классификации методов и способов стружкодробления выявлены наиболее перспективные из них. К этим методам относится метод предварительного локального криогенного воздействия (ЛКВ) на обрабатываемую поверхность срезаемого слоя заготовки. Данный метод позволяет обеспечить сегментацию стружки на этапе чистовой лезвийной обработки металлов аустенитного класса без существенного изменения в технологической системе и дополнительных источников энергии. На основании выполненного анализа и в соответствии с целью работы определены основные задачи исследования, представленные далее.

**Во второй главе** рассмотрена сущность метода предварительного локального криогенного воздействия на обрабатываемую поверхность заготовки, который заключается в том, что в поверхностном слое материала заготовки ограниченной глубины остаточный аустенит переходит в мартенсит. Это приводит к перегруппировке атомов из одной аллотропической формы в другую, т. е. к искажению кристаллической решетки, образованию внутренних напряжений, изменению твердости и объема материала в локальной зоне воздействия.

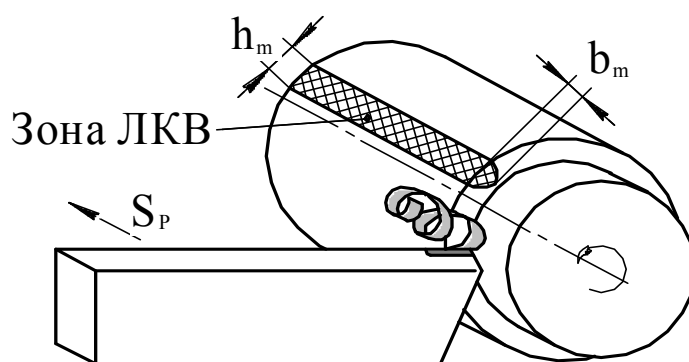


Рисунок 1 – Схема расположения зоны локальной метастабильности в обрабатываемом материале относительно движения режущего инструмента

( $h_m$  - ширина ЛКВ;  $b_m$  - глубина ЛКВ;  $S_p$  - подача резца)

Локальная метастабильность, оказывающая влияние на реологические параметры процесса стружкообразования, создается в области предполагаемого припуска срезаемого слоя материала на внешней поверхности заготовки (см. рисунок 1). Поскольку фазовым превращениям при криогенной обработке подвержены не все



материалы, была использована методика определения фазового состава сталей, который позволяет оценить степень воздействия холодом на обрабатываемую поверхность на основе наиболее распространенной структурной диаграммы А. Шеффлера (см. рисунок 2).

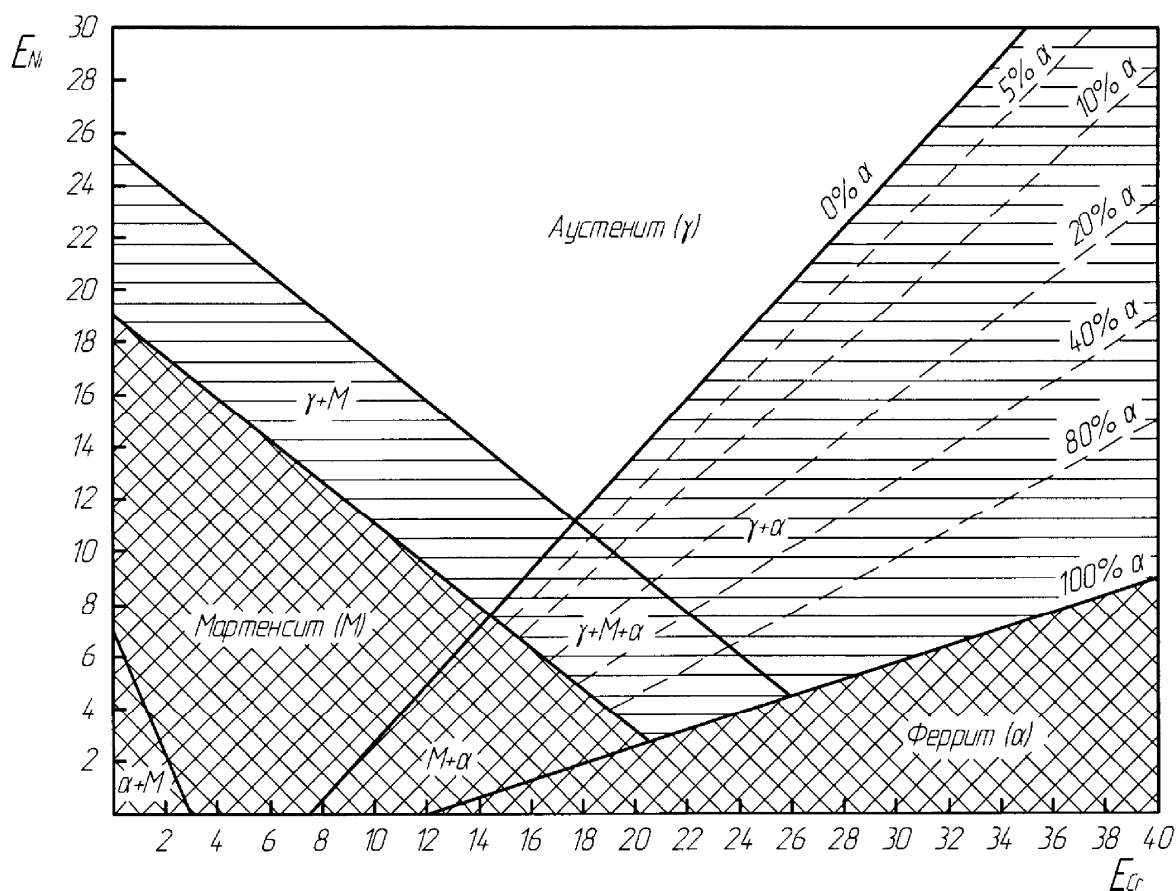

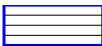



Рисунок 2 – Структурная диаграмма А. Шеффлера,

-  - зона устойчивого отделения отрезков стружки;
-  - зона неустойчивого отделения стружки;
-  - зона невозможности отделения стружки

Для того чтобы определить местоположение стали на диаграмме, подсчитываются её аустенитообразующие и ферритообразующие эквиваленты ( $E_{Ni}$  и  $E_{Cr}$ )

$$E_{Ni} = \%Ni + 30 \times \%C + 0,5 \times \%Mn;$$

$$E_{Cr} = \%Cr + 1,5 \times \%Si + 0,5 \times \%Nb + \%Mo + 0,8 \times \%V.$$

В последующем при лезвийной механической обработке режущая кромка инструмента в плоскости резания пересекается с зоной локального криогенного воздействия. Зона локального криогенного воздействия, находясь в метастабильном состоянии по сравнению с основным металлом, создает мгновенное изменение

напряженно-деформированного состояния с последующим отделением отрезков стружки от обрабатываемого материала. При этом необходимо совместить обеспечение устойчивости процесса резания, качества поверхности и одновременно получение отрезков стружки рациональной длины. Длина отрезков стружки  $L_{\text{ПР}}$ , которая образуется при пересечении зоны локального физического воздействия плоскостью резания, регламентируется в соответствии с ГОСТ 2787-75 и определяется по формуле, мм,

$$L_{\text{ПР}} = \frac{\pi \cdot D_3 \cdot n_p}{60 \cdot f_m \cdot \xi}, \quad (1)$$

где  $f_m$  - частота пересечения плоскостью резания зон локального криогенного воздействия, Гц;  $\xi$  - коэффициент продольной усадки стружки;  $n_p$  - частота вращения заготовки, об/мин;  $D_3$  - диаметр заготовки, мм.

Концепции стружкообразования с целью разработки обоснованных моделей для оценки устойчивости технологической системы и выявления возможностей управления этим процессом получили развитие в трудах В.Л. Вейца, В.В. Максарова, М.Е. Эльясберга и др.

**В третьей главе** разработана математическая модель технологической системы обработки заготовки, подвергнутой предварительному локальному криогенному воздействию. При управлении процессом стружкодробления методом предварительного локального криогенного воздействия следует обеспечить устойчивость технологической системы механической обработки. Устойчивость является необходимым условием эксплуатационной пригодности, а также главным динамическим критерием качества технологической системы. Для проведения качественного анализа динамических свойств технологической системы необходимо построить математическую модель системы, выбор схемы которой связан, прежде всего, с выделением подсистем и выявлением структуры связей между ними, определением числа степеней свободы и вида обобщенных координат, необходимых для полного описания процессов, происходящих в рассматриваемой системе. Адекватный переход к модели малой размерности осуществляется исходя из ограниченности частотного диапазона возмущений и слабодиссипативных свойств технологической системы. Обоснование по мере близости спектральных характеристик исходной и упрощенной модели осуществлялось по методике д-ра техн. наук, профессора В.Л. Вейца. Исходная и упрощенная системы считаются эквивалентными, при этом упрощенная модель является оптимальной, если выполняются два условия

$$\rho(W, W^{(m)}) \leq \varepsilon, \quad (2)$$

$$\rho(W, W^{(m)}) = \min \rho(W, W^{(m)}), \quad (3)$$

где  $W, W^{(m)}$  - матрицы частотных характеристик соответственно исходной и упрощенной модели;  $\rho(W, W^{(m)})$  - матрица, задающая расстояние между  $W$  и  $W^{(m)}$ ;  $\varepsilon$  - малая, наперед заданная величина допустимой ошибки.

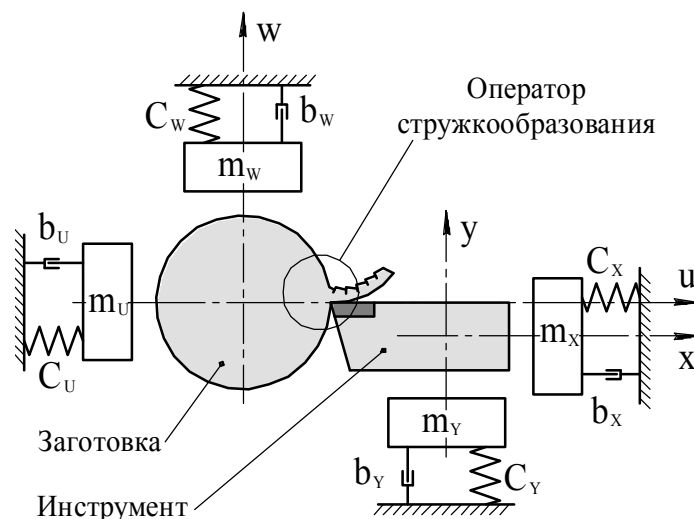


Рисунок 3 – Динамическая модель четырехконтурной технологической системы

На рисунке 3 представлена четырехконтурная динамическая модель технологической системы механической обработки малой размерности с диссипативными характеристиками ( $m_x, m_u, m_y, m_w$  – приведенные инерционные параметры;  $b_x, b_y, b_u, b_w$  – коэффициенты рассеивания энергии;  $c_x, c_u, c_y, c_w$  – коэффициенты жесткости), учитывающими конструктивное демпфирование и реологические процессы рассматриваемой глобальной модели, которой соответствуют две подсистемы с четырьмя обобщенными координатами: а) подсистема «заготовка» с координатами; б) подсистема «инструмент» с координатами.

Реологическая модель технологической системы механической обработки (см. рисунок 4) учитывает как процесс первичной пластической деформации в зоне срезаемого слоя, так и процессы вторичной деформации и трения при движении стружки по передней поверхности режущего инструмента. Моделирование на основе кусочно-линейной аппроксимации процесса стружкообразования позволило сформировать основы для построения дифференциальных уравнений, описывающих динамические свойства технологической системы механической обработки. Исходя из



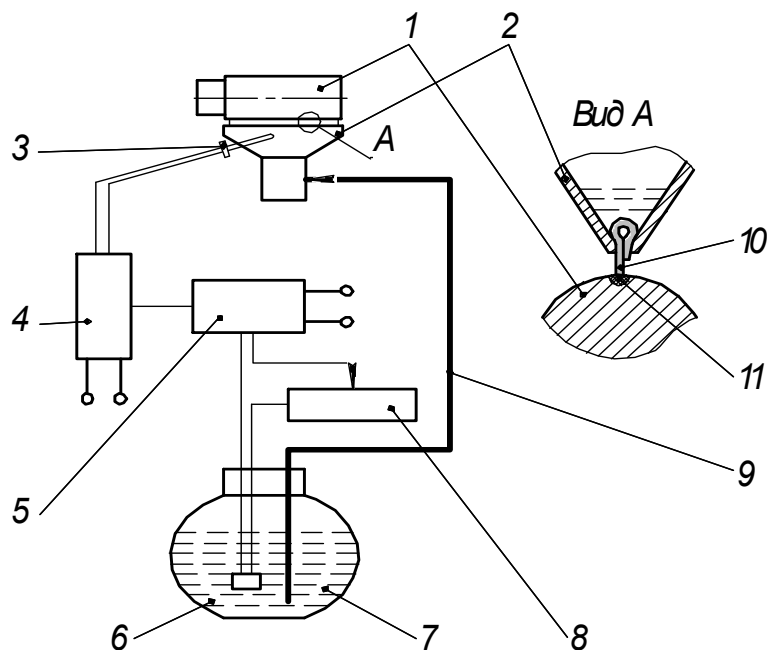


Рисунок 5 – Схема установки нанесения ЛКВ: 1 - заготовка; 2 – наконечник; 3 – термопара; 4 – потенциометр; 5 – магнитный пускатель; 6 – нагреватель; 7 – сосуд Дьюара; 8 – переменное сопротивление; 9 – трубопровод; 10 – контактный элемент; 11- зона ЛКВ

На первом этапе к заготовке 1 подводится наконечник установки 2, установленный в резцедержатель станка, до соприкосновения контактного элемента 10 с поверхностью заготовки. Контактный элемент 10, изготовленный из войлока по профилю поверхности заготовки, обеспечивает одновременное соприкосновение жидкого азота по всей необходимой длине ЛКВ. Термопара 3, расположенная во внутренней полости наконечника, подает сигнал на электрический потенциометр 4 с предельными контактами, который посредством магнитного пускателя 5 и переменного сопротивления 8 включает и регулирует работу низкотемпературного нагревателя 6. Нагреватель, изменяя температуру в полости сосуда Дьюара 7, обеспечивает подачу жидкого азота по трубопроводу 9 в зону наконечника установки. Таким образом, при необходимости можно нанести одну или несколько зон ЛКВ на поверхность заготовки, в зависимости от её диаметра и необходимой длины стружки.

Кроме получения отрезков стружки рациональной длины необходимо также обеспечить стабильность стружкодробления вне зависимости от процессов, происходящих в технологической системе во время обработки заготовки, подвергнутой локальному криогенному воздействию. При проведении качественного анализа динамического процесса в технологической системе при обработке заготовок с

локальным воздействием использовалась динамическая модель (3) (см. рисунок 3), в которой функция управления  $\Psi$ , обеспечивающая введение в систему локального воздействия, реализовывалась условием

$$\psi(G_i) = \begin{cases} G_1 \text{ при } m \cdot T_{pm} \leq t < m \cdot T_{pm} + T_p, \\ T_p = \text{const}, T_{pm} = \text{const}; \\ G_2 \text{ при } m \cdot T_{pm} + T_p \leq t < (m+1) \cdot T_{pm}, \\ T_{pm} - T_p = T_m = \text{const}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $G_1\{c_1, c_2, \beta_2\}$  и  $G_2\{c_1, c_2, \beta_2\}$  - параметры состояния, отражающие процесс стружкообразования в исходном материале и в зоне локального изменения свойств материала после криогенного воздействия;  $T_{pm}$  - период локального воздействия;  $T_p$  - период резания в исходном материале;  $T_m$  - период резания в зоне локального воздействия;  $m$  - число локальных воздействий.

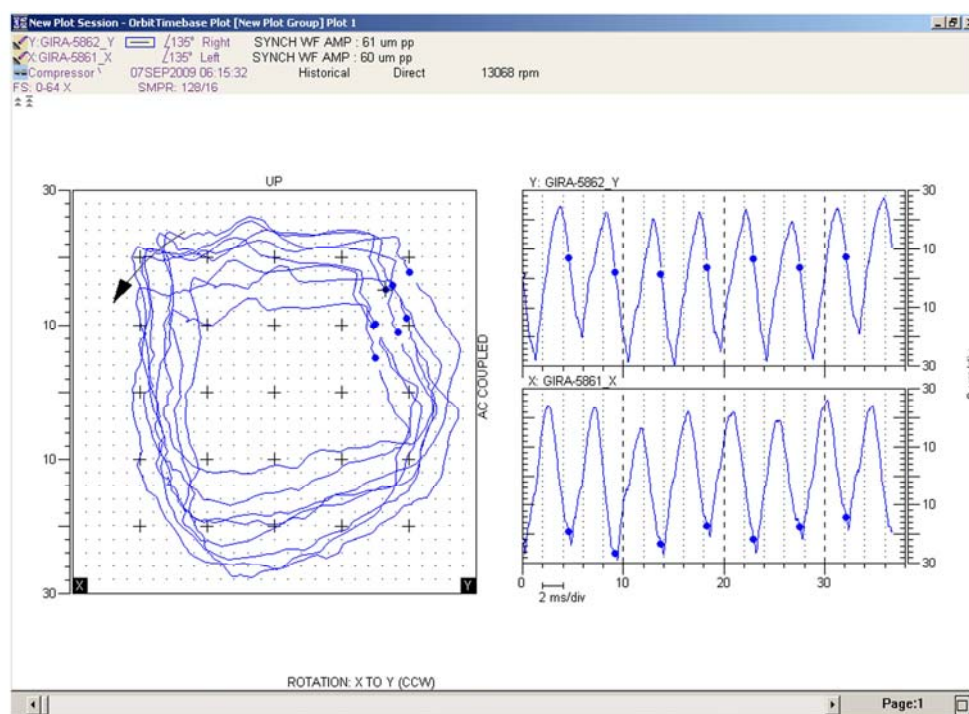


Рисунок 6 – Экспериментальные виброперемещения  $x$  и  $y$  по нормали к обрабатываемой поверхности для подсистемы инструмента при лезвийной обработке заготовки из стали 45X14H14B2M на станке мод. МК6046М РЭ,  $V_s = 60$  м/мин,  $S = 0,1$  мм/об,  $b_c = 0,8$  мм, предварительно подготовленной методом ЛКВ

Расчетные виброперемещения для подсистемы инструмента при обработке заготовки с локальным криогенным воздействием, проводившиеся в области автоколебательного процесса, показали стабильность стружкодробления. Проводившиеся в этой области экспериментальные исследования виброперемещений при обработке заготовки из стали 45X14H14B2M подтвердили правильность теоретической модели и доказали, что автоколебательный процесс не оказывает влияния на стружкодробление (см. рисунок 6).

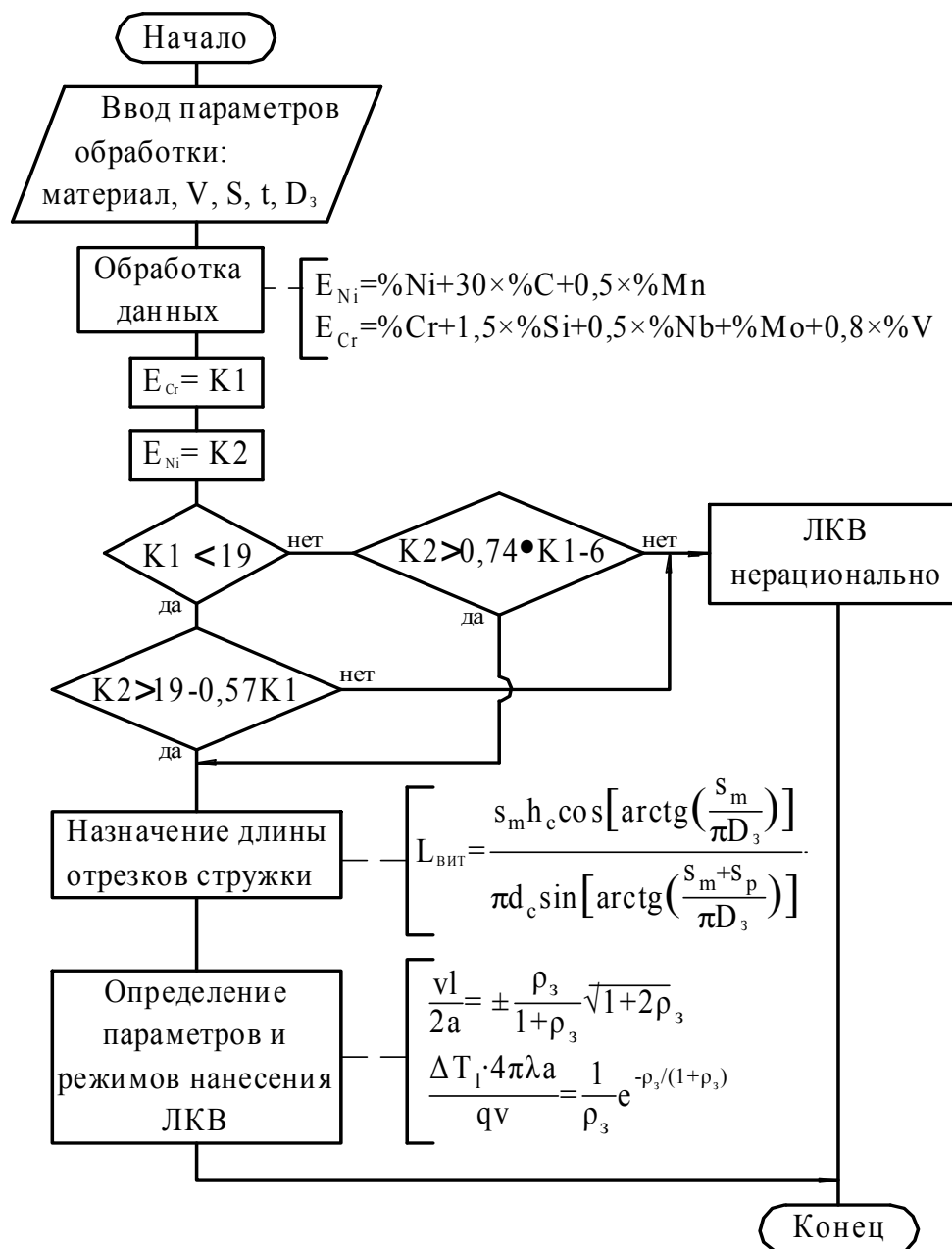


Рисунок 7 – Блок-схема алгоритма выбора параметров криогенного воздействия на заготовку при обработке на станке с ЧПУ

Автоматизация выбора параметров локального воздействия в зависимости от режимов обработки и состояния поверхности заготовки осуществляется программно-методическим комплексом в два этапа: на первом этапе определяется целесообразность криогенного воздействия; на втором производится расчет параметров криогенного воздействия и затем процесс точения заготовки. При этом обеспечивается устойчивое отделение отрезков стружки в коррозионно- и жаростойких сталях с аустенитной структурой в условиях автоматизированной чистовой и получистовой механической лезвийной обработки (см. рисунок 7).

Для определения зависимости параметров криогенного воздействия от режимов резания последующей обработки, при которых осуществляется стружкодробление у различных материалов, были проведены эксперименты с учетом взаимного влияния режимных параметров на ширину и глубину локального криогенного воздействия.

На основании повторных экспериментов построены графики зависимостей времени локального криогенного воздействия от режимов последующей обработки (см. рисунок 8).

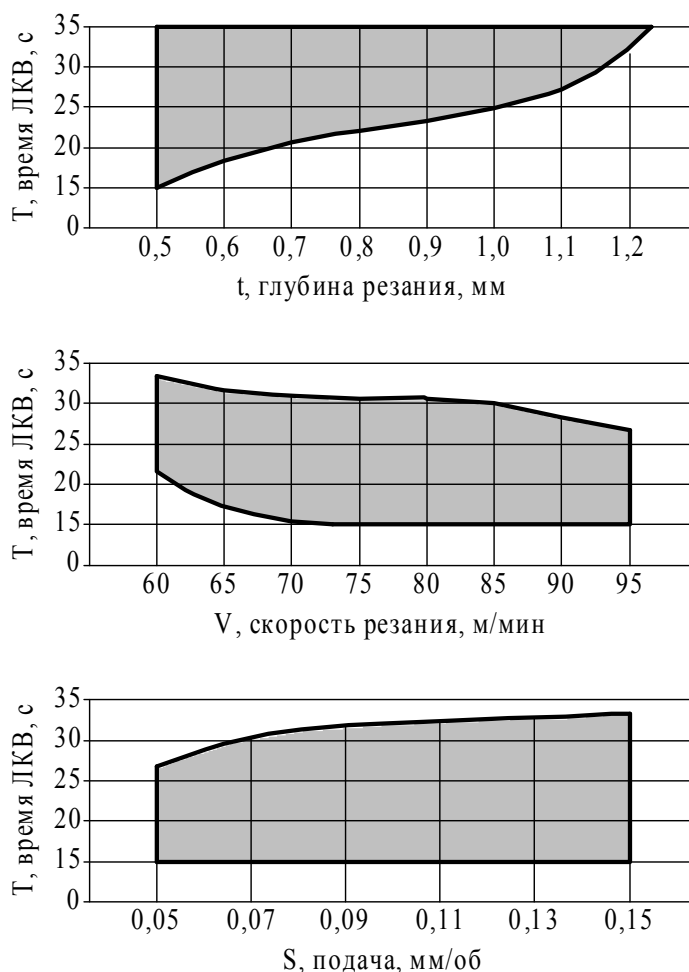


Рисунок 8 – Границы области устойчивости дробления стружки в зависимости от параметров резания и времени ЛКВ



## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Предложено решение вопроса об управлении процессом стружкодробления при тонкой лезвийной обработке материалов аустенитного класса, которое позволяет автоматизировать этот процесс на станках с автоматическим циклом работы и автоматических линиях, а также повысить производительность труда, культуру производства и снизить затраты на последующую транспортировку и переработку стружки.
2. Разработан метод стружкодробления, основанный на использовании явления изменения упругодиссипативных свойств в жаропрочных и коррозионно-стойких сталях аустенитного класса при локальном криогенном воздействии на обрабатываемую поверхность заготовки, позволяющий обеспечить при последующей обработке периодическое изменение условий резания по сравнению с исходным материалом. На основании полученных кинематических характеристик созданы устройства для предварительного нанесения линии локального криогенного воздействия.
3. Предложена обобщенная математическая модель процесса стружкообразования, позволяющая описать процесс с учетом упруго-пластических свойств в динамике контактного взаимодействия инструмента с заготовкой и реологических особенностей в зоне локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал.
4. Предложена математическая модель технологической системы механической обработки, позволяющая описывать динамические процессы с учетом упругопластических свойств и реологических особенностей процесса стружкообразования при чередовании срезаемого слоя исходного материала и материала, подверженного локальному криогенному воздействию, необходимая для анализа поведения технологической системы механической обработки в процессе сегментирования и дробления стружки.
5. Реализовано имитационное моделирование динамических процессов технологической системы механической обработки при локальном криогенном воздействии, которое позволило оценить влияние автоколебательного процесса на устойчивость сегментирования и дробления стружки. Теоретические и экспериментальные исследования с использованием предложенных моделей подтвердили стабильное и надежное сегментирование и отделение отрезков стружки в области неустойчивого процесса резания.

6. Выполнен комплекс экспериментальных исследований в области параметров криогенного воздействия в зависимости от режимов последующей обработки для широкого диапазона материалов, позволивший получить методом нелинейной аппроксимации модель для определения оптимальных параметров локального криогенного воздействия при заданных режимах резания.
7. Разработаны методики определения упругодиссипативных коэффициентов реологической модели чистового точения на основе метода локального криогенного воздействия на обрабатываемый материал и алгоритмы для автоматизации выбора способа и параметров ЛКВ, основанные на комплексе аналого-цифровой аппаратуры под управлением системы LabVIEW 8.6.
8. Результаты научных исследований и промышленных испытаний включены в учебный процесс на кафедре «Гибкие автоматические комплексы» СПбГПУ, а также внедрены в технологический процесс производства запасных частей из материалов аустенитного класса на ООО «ПО «Киришинефтеоргсинтез».

Основные положения и научные результаты опубликованы в следующих работах:

1. 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
2. Максаров В.В., Горбунов О.И. Кинематика процесса точения при предварительном локальном криогенном воздействии на материал заготовки // *Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. Вып. 41.* – СПб.: СЗТУ, 2011. – С.232 – 237.
3. Горбунов О.И., Максаров В.В. Выбор сталей с мартенситным переходом, обеспечивающих сегментацию стружки при предварительном криогенном воздействии // *Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. Вып. 39.* – СПб.: СЗТУ, 2009. – С.170 – 174.
4. Горбунов О.И., Максаров В.В. Металлографические исследования материалов аустенитного класса при криогенном воздействии // *Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. Вып. 39.* – СПб.: СЗТУ, 2009. – С.149 – 155.
5. Горбунов О.И. Выбор материалов, претерпевающих фазовые превращения при криогенной обработке // *Актуальные проблемы управления техническими, информационными и транспортными системами: сб. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы*

управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» 13-15 ноября 2007 г., – СПб.: СЗТУ, 2008. – С.96 – 97.

6. Горбунов О.И. Влияние локального криогенного воздействия на процесс течения // Актуальные проблемы управления техническими, информационными и транспортными системами: сб. тр. Всероссийской науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы управления техническими, информационными, социально-экономическими и транспортными системами» 15-17 мая 2007 г. – СПб.: СЗТУ, 2007. – С.7 – 8.

7. Максаров В.В., Горбунов О.И. Анализ операции отрезки чугунных заготовок большого диаметра. // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. Вып. 36. – СПб.: СЗТУ, 2006. – С.155 – 159.

8. Максаров В.В., Горбунов О.И. Отрезное устройство с повышенной виброустойчивостью // Проблемы машиноведения и машиностроения: Межвуз. сб. Вып. 36. – СПб.: СЗТУ, 2006. – С.160 – 163.