

На правах рукописи

ЕФИМОВ Александр Евгеньевич



**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТИ ГИДРОЦИЛИНДРОВ ГОРНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО
ЛОКАЛЬНОГО ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

Максаров Вячеслав Викторович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Машиностроения» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

Официальные оппоненты:

Петров Владимир Маркович, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой «Механика» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Андреев Юрий Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры «Технология приборостроения» ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики».

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова».

Защита диссертации состоится 27 июня 2017 г. в 14-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.30 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29, лабораторно-аудиторный корпус, аудитория кафедры «ТКМ и М».

Отзыв на автореферат в двух экземплярах (заверенных печатью) просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО СПбПУ Петра Великого и на сайте www.spbstu.ru.

Телефон для справок 8(812) 552-95-30.

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, профессор



ПЕТКОВА
Ани Петрова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Особенность эксплуатации горно-шахтного оборудования на этапе проводимых подземных горных выработок обуславливается сложными условиями агрессивной окружающей среды, химической активностью шахтных вод, переменными динамическими нагрузками, взрывоопасностью атмосферы. В результате к машинам и элементам горного производства предъявляется целый комплекс специальных требований: возможность надежного и легкого монтажа - демонтажа узлов и механизмов; соблюдение жестких требований по безопасности; детали горных машин должны обладать достаточным запасом прочности.

Одним из видов механизированных комплексов, отвечающим всем выше перечисленным требованиям, является шахтная крепь, в которой ответственным элементом считаются гидроцилиндры. Основной их функцией служит поддержание пород кровли в пространстве очистного забоя, исполнение передвижения секций крепи, подъем основания.

Как показывает практика, в процессе эксплуатации гидравлического оборудования возникают непредвиденные отказы и поломки, нарушающие функциональные назначения гидроцилиндров. Проведенный анализ этих причин позволил установить, что основным фактором является разрушение уплотнительной системы детали штока.

В свою очередь, на разрушение уплотнительной системы влияют предварительно сформированные качественные показатели поверхности детали штока при шлифовальной операции, на этапе которой возникает эффект шаржирования, образуются концентраторы напряжения, снижающие износостойкость, а также усталостную прочность изготавливаемой детали.

Следовательно, поверхность штока, имеющая вкрапленные абразивные частицы, в совокупности с ударно-вибрационными нагрузками приводит к интенсивному износу уплотнений, нарушая герметизацию гидроцилиндра. По этой причине на трущиеся контактные поверхности попадают микрочастицы породы и пыли, образуя коррозионные и механические повреждения.

Устранить вышеописанные недостатки возможно за счет изменения технологической последовательности изготовления детали

шток посредством замены шлифовальной обработки. При этом качественные показатели стоит формировать на этапе механической обработки за счет динамической стабилизации технологической системы.

Наиболее перспективным методом, позволяющим осуществить технологическое обеспечение параметров шероховатости и точности формы изготовления за счет подавления интенсивности вибраций является применение локального лазерного воздействия на обрабатываемую поверхность с последующей механической обработкой. Использование данного метода также позволит повысить стойкость режущего инструмента, увеличить производительность, исключить шлифовальную операцию и решить задачу по сегментации стружки на станках с ЧПУ.

Объектом исследования является обеспечение геометрических параметров точности формы и шероховатости поверхности в технологическом процессе изготовления детали «шток» гидроцилиндра.

Предметом исследования является шероховатость поверхностного слоя и точность формы детали «шток» гидроцилиндра.

Цель работы заключается в технологическом обеспечении заданных показателей шероховатости поверхности и точности формы детали «шток» гидроцилиндра горного оборудования на основе подавления возникающих вибраций в технологической системе механической обработки посредством предварительного локального лазерного воздействия на поверхностный слой обрабатываемого изделия.

Методы исследования работы базировались на основных теоретических положениях технологии машиностроения, теории резания однолезвийным инструментом, теории колебаний. Экспериментальные исследования осуществлялись с применением современных средств компьютерного моделирования LabVIEW 2013, COMSOL Multiphysics 5.2a и высокоточных приборов VibxpertEx., SURFTEST SJ-210, MMQ 400 CNC.

Достоверность полученных результатов и выводов в диссертационной работе обеспечиваются: точными физико–математическими постановками задач и методов их решения; применением в исследовательской части работы современных методов технологии ма-

шиностроения, теории резания материалов, динамики технологической системы и современных вычислительных приборов; высокими показателями сходимости теоретических и экспериментальных значений; положительным опытом внедрения разработанных методик и рекомендаций на предприятиях отечественного машиностроения.

Научная новизна заключается в решении актуальной задачи, направленной на выявление связей между заданными показателями качества поверхности изделия и динамическими свойствами технологической системы, позволяющих разработать новый технологический процесс изготовления детали «шток» гидроцилиндра за счет использования предварительного локального лазерного воздействия на поверхность изделия с последующей механической обработкой.

Составляющими научной новизны являются:

- выявление закономерностей, влияющих на возникновение и интенсивность автоколебаний при механической обработке в процессе изготовления детали «шток» гидроцилиндра;

- выявление подсистем, оказывающих доминирующее влияние на процесс возбуждения автоколебаний при изготовлении в технологическом процессе детали «шток» гидроцилиндра;

- разработка математической модели технологической системы с учетом механических свойств метастабильной структуры и процесса стружкообразования для оценки динамической устойчивости механической обработки при изготовлении деталей типа «тел вращения»;

- установление закономерностей влияния предварительно созданной метастабильной структуры в поверхностном слое изделия на технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхности и точности формы детали «шток» гидроцилиндра.

Практическая ценность работы:

- разработанный метод изготовления детали «шток» гидроцилиндра на основе предварительного локального лазерного воздействия по специальной траектории с обеспечением заданных геометрических показателей точности формы, размеров и шероховатости поверхности;

- предложенный технологический процесс изготовления ответственных поверхностей детали «шток» гидроцилиндра на основе метода предварительного локального лазерного воздействия на этапах

механической обработки с обеспечением дробления стружки и требуемых параметров шероховатости и точности формы поверхностного слоя (патент № 2578875 «Способ механической обработки с дроблением стружки»);

- рекомендации для выбора параметров предварительно создаваемой в поверхностном слое метастабильной структуры, положительно влияющей на снижение интенсивности автоколебаний при механической обработке, с последующим обеспечением шероховатости и точности поверхности детали «шток» гидроцилиндра в технологическом процессе.

На защиту выносятся следующие научные положения:

1. Способ технологического обеспечения параметров шероховатости и точности формы при изготовлении деталей типа «тел вращения» за счет предварительного воздействия на поверхность изделия локальным лазерным излучением с последующей механической обработкой.

2. Математическая модель, учитывающая влияние параметров метастабильной зоны, формируемой на этапе предварительного лазерного воздействия с последующим снятием этого припуска для обеспечения устойчивого процесса механической обработки и сегментирования витков стружки в диапазоне 150...200 мм при технологическом обеспечении параметров шероховатости и точности формы деталей типа «тел вращения».

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научно-практических конференциях: Всероссийская конференция – конкурс студентов выпускного курса (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); Международный форум – конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); 1-ая Региональная межвузовская научно - практическая конференция «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); 2-ая Международная научно - практическая конференция «Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); Международный молодежный научно – промышленный форум «ПРОРЫВ» (г. Екатеринбург, 2015 г.);

Международный форум – конкурс молодых ученых «Проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); 4-ая Международная научно - практическая конференция «Инновации на транспорте и в машиностроении» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.); Дом ученых им. М. Горького РАН секция «Технология машиностроения и приборостроения» (г. Санкт-Петербург, 2016 г.).

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на заседании кафедры «Машиностроения» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет» в 2017 г.

Основные положения работы и результаты исследований отражены в НИР в рамках выполнения проектной части государственного задания № 9-2642-2014/К от 11 июля 2014 г. Проект: «Разработка и исследование микроструктуры режущей керамики, ее влияние на управление работоспособностью инструмента и параметры качества обработки на станках с ЧПУ».

Методика использования предварительного локального лазерного воздействия на этапе механической обработки опробована в производственном процессе предприятия ООО «Научно-производственный центр «ЛКТ».

Отдельные научные положения работы приняты к внедрению в учебный процесс подготовки бакалавров по направлению 15.03.01 – Машиностроение, профилю «Технология, оборудование и автоматизация машиностроительных производств» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, 4 из них входят в перечень журналов, рекомендованных ВАК Минобрнауки России. Получен патент на способ № 2578875 от 27.11.2014 г.

Структура и содержание. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Диссертационная работа изложена на 166 страницах машинописного текста, в том числе содержит 28 таблиц, 94 рисунка, 103 наименований литературы.

Работа соответствует паспорту специальности - 05.02.08 «Технология машиностроения». Согласно формуле специальности, в

ней «совершенствуются существующие и разрабатываются новые методы обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска» в соответствии с пунктом (4), а также «соблюдается технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин» в соответствии с пунктом (7).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена актуальность темы диссертационной работы, рассмотрен анализ состояния проблемы, обоснована цель научной работы и задачи исследования, сформулирована научная новизна и практическая ценность.

В первой главе приведен обзор состояния актуальной проблемы, направленной на обеспечение точности формы и шероховатости поверхности детали «шток» гидроцилиндра.

Проведенный анализ чертежа детали шток, позволил выделить поверхности, к которым в технологическом процессе предъявляются повышенные требования по шероховатости и геометрической точности формы. На основании назначенных требований рассмотрены существующие методы и способы, позволяющие обеспечить заданное качество высокоответственных поверхностей детали шток в технологическом процессе посредством подавления автоколебаний при механической обработке.

Изучением вопроса возникновения вибраций при точении занимались такие отечественные и иностранные ученые, как: И.С. Амосов, В.Л. Вейц, Н.А. Дроздов, И.Г. Жарков, А.И. Каширин, В.А. Кудинов, Л.С. Мурашкин, С.Л. Мурашкин, В.Н. Подураев, В.Э. Пуш, Б.М. Бржозовский, Д.В. Васильков, В.В. Максаров, С.А. Васин, С. Като, И. Тлустый, С. Тобиас, И. Дж. Армарего, В.Кениг, М. Мерчант, Е. Трент, Е. Херберт, положившие в свои труды ряд фундаментальных исследований, позволяющих сделать вывод о том, что решение вопроса снижения интенсивности автоколебательного процесса имеет важное практическое значение, так как динамически стабилизирует технологическую систему при изготовлении высокоточных поверхностей на этапе механической обработки.

На основании проведенного патентного и литературного анализа, связанного с динамической стабилизацией технологической системы, можно утверждать, что универсального метода на данный момент не существует. Одним из перспективных способов подавления автоколебаний является создание в поверхностном слое обрабатываемого изделия метастабильной структуры за счет лазерного излучения по специально заданной траектории.

Во второй главе рассматривается метод динамической стабилизации технологической системы в процессе изготовления деталей типа «тел вращения», за счет нанесения локального лазерного воздействия на поверхность заготовки с последующей механической обработкой. В качестве излучаемого комплекса выбрана лазерная установка модели ЛС-5 (Рисунок 1). Сущность данного метода заключается в темпера-

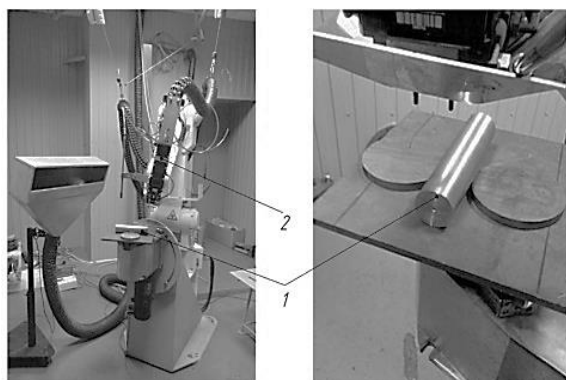


Рисунок 1 - Лазерная установка ЛС-5, где 1 – заготовка; 2 – лазерная оптическая головка

турном нагреве лазерным излучением обрабатываемой поверхности. В результате данного воздействия возникает дефектность в структуре, обусловленная усилением фазового наклепа, а также увеличением плотности дислокации и ростом напряженности в кристаллической решетке, позволя-

ющая сформировать метастабильную зону с отличными от основного металла механическими свойствами.

Для определения геометрических параметров метастабильной структуры в сталях 40X и 45 (глубины t_m и ширины h_m), производилось имитационное моделирование в программной среде COMSOL Multiphysics при различных режимах лазерного излучения. Подтверждение полученных теоретических данных осуществлялось путем измерения микротвердости по глубине метастабильной зоны (Рисунок 2). На основании проведенных экспериментальных и теоретических

исследований построены графические зависимости влияния параметров лазерного воздействия на глубину метастабильной фазы (Рисунок 3). Разница между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 10%. Такой подход дает возможность оптимизировать режимы и обеспечить высокую производительность лазерного воздействия перед механической обработкой на базе высокоавтоматизированных станков с ЧПУ.

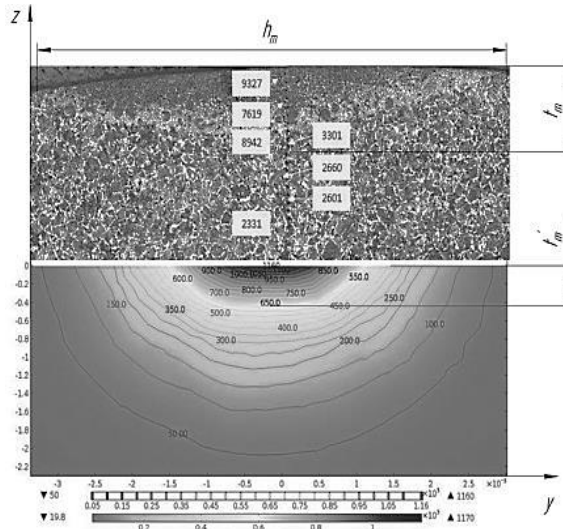


Рисунок 2 - Параметры глубины и ширины метастабильной структуры для стали 45: $P = 2.1$ кВт; $V_l = 2000$ мм/мин; $d_n = 4$ мм

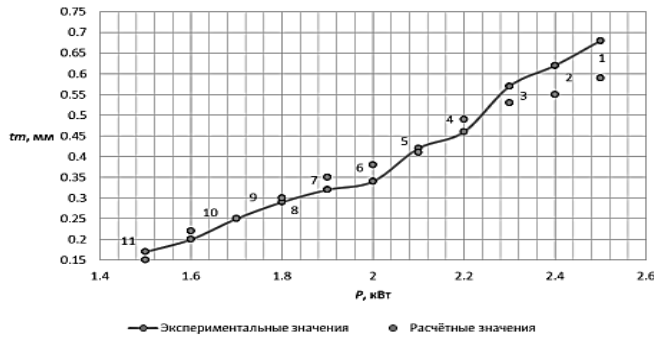


Рисунок 3 - Зависимость глубины метастабильности от мощности излучения при постоянной скорости обработки $V_l = 2000$ мм/мин для стали 45
В третьей главе разработана математическая модель технологической системы механической обработки деталей типа «тел враще-

ния», позволяющая описать динамические процессы в технологической системе с учетом особенностей переходного процесса, обусловленного метастабильной структурой.

На начальном этапе математического моделирования технологической системы важным условием является: выделение подсистем и выявление между ними взаимосвязей; определение числа степеней свободы, наглядно отображающих поведение динамической системы; проведение анализа чувствительности модели к изменению существенных параметров системы.

В целях проведения качественного динамического исследования свойств технологической системы необходимо произвести переход от сложной многомерной математической модели к упрощенной по методике д-ра техн. наук, проф. В.Л. Вейца. Исходя из этого, предлагается использовать четырехконтурную динамическую систему механической обработки с двумя подсистемами по координатам: U, W – заготовка; X, Y – инструмент.

Проведенная аппроксимация системы нелинейных дифференциальных уравнений, описывающей динамические свойства четырехконтурной системы, представляется в следующем виде:

$$\begin{cases} T_{x2}^2 \cdot \ddot{x} + (T_{x1} + T_{x3}) \cdot \dot{x} - T_{x3} \dot{U} + 2x - U = Q \\ T_{y2}^2 \cdot \ddot{y} + (T_{y1} + T_{y3}) \cdot \dot{y} - T_{y3} \dot{W} + 2y - W = P \\ T_{U2}^2 \cdot \ddot{U} + (T_{U1} + T_{U3}) \cdot \dot{U} - T_{U3} \dot{x} + 2U - x = -Q \\ T_{W2}^2 \cdot \ddot{W} + (T_{W1} + T_{W3}) \cdot \dot{W} - T_{W3} \dot{y} + 2W - y = -P \\ (T_p + T_{p1}) \cdot \dot{P} + P = -(k_x - k_{px}) \cdot (x - u) - \\ - [T_{ky1} - k_{py} \cdot (T_p + T_{p2})] \cdot (\dot{y} - \dot{W}) + k_{py} \cdot (y - W) - \\ - [k_x \cdot T_{p1} - k_{px} \cdot (T_p + T_{p2})] \cdot (\dot{x} \cdot \dot{U}) \\ T_Q \dot{Q} + Q = P - T_{kx} \cdot (\dot{x} - \dot{U}) - T_{ky2} \cdot (\dot{y} - \dot{W}) \end{cases}, \quad (1)$$

где $T_{x2}, T_{y2}, T_{U2}, T_{W2}$ – постоянные времени контуров; $T_{x1}, T_{y1}, T_{U1}, T_{W1}, T_{x3}, T_{y3}, T_{U3}, T_{W3}$ – постоянные времени демпфирования контуров; $k_{px}, k_{py}, T_{p1}, T_{p2}$ – коэффициенты и постоянные времени, учитывающие особенности процесса стружкообразования; Q – сила резания; P – сила резания.

В правой части системы уравнений (1) сила резания P и сила трения Q имеет вид:

$$P = 520 \cdot t^{1,01} \cdot S^{0,81} \cdot V^{-0,31}, \quad (2)$$

$$Q = f_i \cdot 520 \cdot t^{1,01} \cdot S^{0,81} \cdot V^{-0,31} \cdot K_i, \quad (3)$$

где f_i – коэффициент трения, учитывающий значения метастабильного и основного слоя; t – глубина резания; S – подача; V – скорость резания; K_i – поправочный коэффициент, учитывающий механические свойства.

Решение представленной системы дифференциальных уравнений (1) производится в программной среде NI LabVIEW 2013 SP1 через передаточные функции. Ввод параметров метастабильной структуры в математическую модель осуществляется за счёт переключателя (4):

$$\Omega(G_i) = \begin{cases} G_1 & \text{при } n \cdot T_{Mn} \leq t < n \cdot T_{Mn} + T_p, \\ & T_M = \text{const}, T_p = \text{const}, \\ G_2 & \text{при } n \cdot T_{Mn} + T_p \leq t < (n+1)T_{Mn}, \\ & T_{Mn} - T_p = T_M = \text{const}. \end{cases} \quad (4)$$

где G_i - параметр, отражающий механические свойства в исходном материале и в зоне лазерного воздействия; T_{Mn} - период локального воздействия; T_p - период обработки в исходном материале; T_M - период резания в зоне с локальным воздействием; n – число локальных воздействий.

В процессе моделирования это приведет к смене коэффициентов и механических свойств с одного уровня $G_1\{K_M, l_P, l_Q, f\}$ на другой $G_2\{K'_M, l_{P1}, l_{Q1}, f_1\}$. При этом регулирование глубины метастабильной структуры происходит через коэффициент усадки стружки ξ_i .

Полученные значения выводятся на лицевую панель виртуального прибора в виде расчетных виброускорений. В качестве примера на рисунке 4 представлен результат, где зафиксировано снижение уровня амплитуды колебательного процесса при механической обработке с метастабильной структурой.

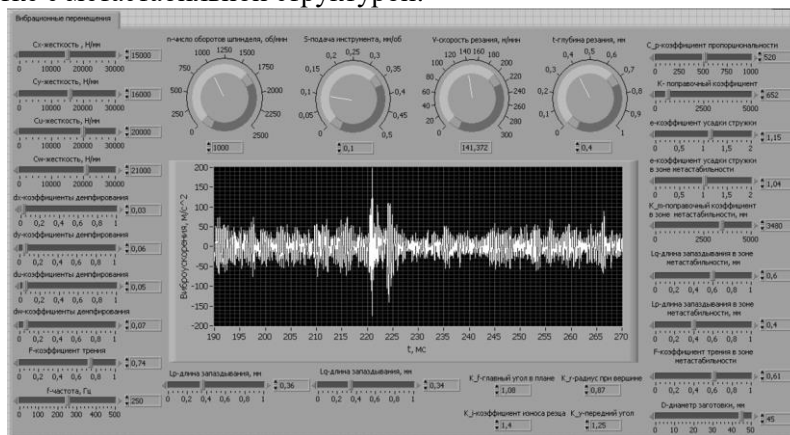
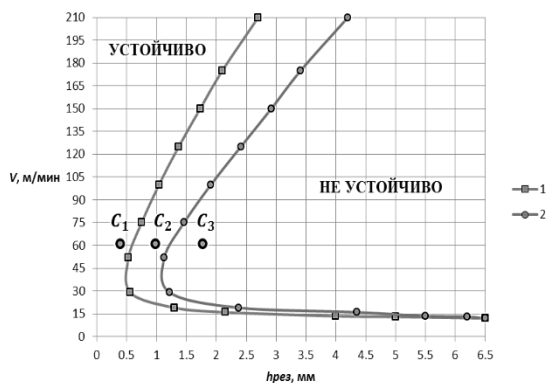


Рисунок 4 - Виртуальный прибор по моделированию механической обработки стали 40X с метастабильной зоной: $V = 141$ м/мин; $S = 0.1$ мм/об; $t = 0.4$ мм; $n = 1000$ об/мин; $t_m = 0.4$ мм; $h_m = 5$ мм

В четвертой главе проведены экспериментальные исследования по построению границы области устойчивости в плоскости параметров $h_{рез}$ и V (см. Рисунок 5) с использованием предварительного



лазерного воздействия и при стандартном точении. Справа от границы расположена область, где режимы резания являются неустойчивыми и приводят к возникновению вибраций, слева – зона абсолютной устойчивости. Анализ проведенного имитационного моделирования в программной

среде NI LabVIEW 2013 SP1 позволил при решении системы уравнений (1) с учетом переходного процесса (4) по полученным расчетным осциллограммам установить влияние метастабильной зоны на динамическую стабильность технологической системы. Так, в точке C_2 на стадии компьютерного моделирования зафиксировано снижение уровня вибраций (Рисунок 6).

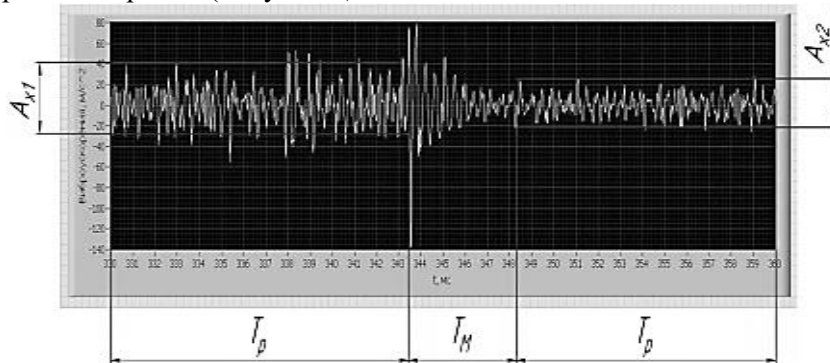


Рисунок 6 – Расчетная осциллограмма виброускорений для точки C_2

Подтверждение расчетных виброграмм осуществлялось с использованием двухканального виброанализатора модели «VIBXPERT

ЕХ.» при точении заготовки с локальной метастабильной структурой (см. Рисунок 7).

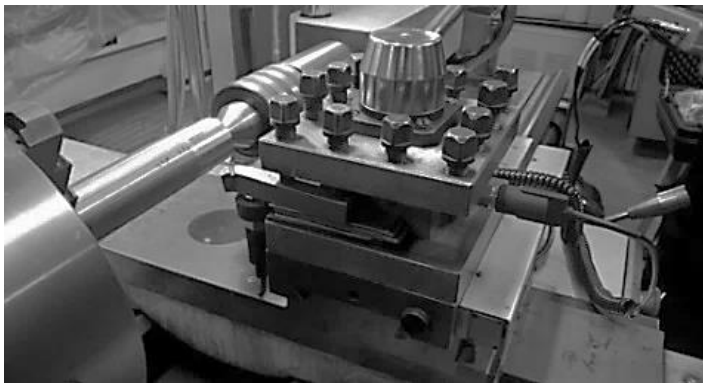


Рисунок 7 - Снятие показаний виброускорений при обработке заготовки с метастабильной структурой

В ходе исследований установлено, что снижение уровня интенсивности колебательного процесса при механической обработке заготовки с метастабильной структурой составило 29–36% (см. Рисунок 8).

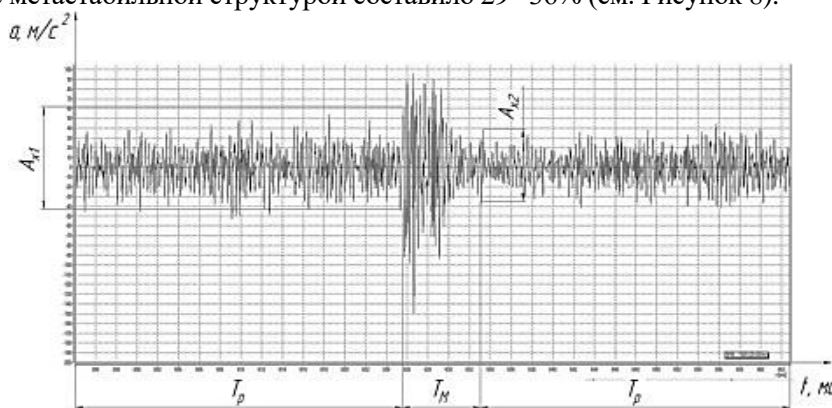


Рисунок 8 - Осциллограмма виброускорений при обработке стали 40Х с локальной метастабильной зоной

Как известно, динамически неустойчивое состояние технологической системы во многом оказывает влияние на повышение интенсивности износа инструмента. Это способствует постепенному изменению расстояния между заготовкой и режущей кромкой, что при механической обработке приводит к отклонению в

показателях точности формы и параметрах шероховатости. На рисунке 9 представлен график износа режущей части инструмента при обработке стали 40X с метастабильной зоной, позволяющий судить о повышении стойкости инструмента за исключением случая под цифрой 4.

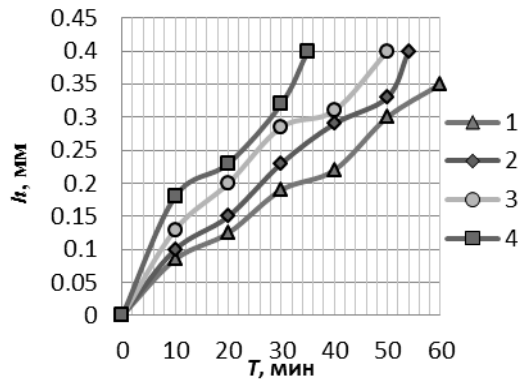


Рисунок 9 - Износ инструмента при точении стали 40X с метастабильностью на этапе лучистой обработки с режимами:

$V = 100$ м/мин; $S = 0.15$ мм/об; $t = 0.25$ мм, где 1 – $t_m = 0.23$ мм, 2 – $t_m = 0.25$ мм, 3 – $t_m = 0$ мм, 4 – $t_m = 0.27$ мм

Последующие

сравнительные экспериментальные исследования шероховатости поверхности при обработке с методом лазерного воздействия показали снижение значений шероховатости Ra в 1.5...1.8 раз (Рисунок 10) и отклонений от точности формы, по сравнению с обычным точением.

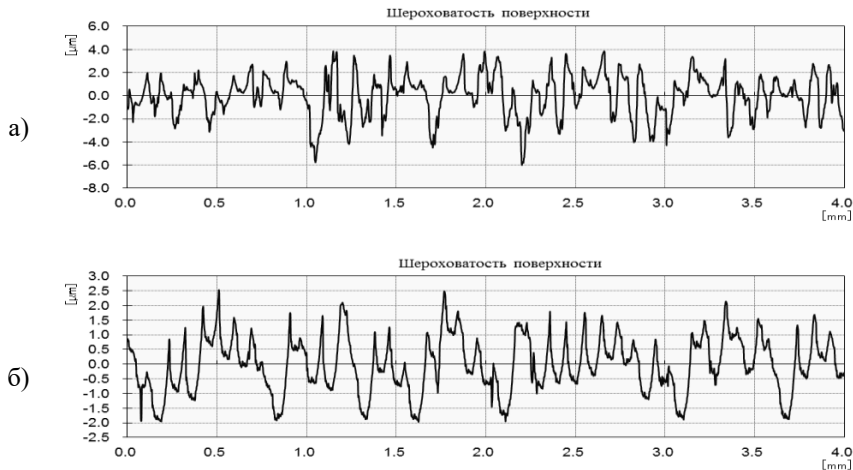


Рисунок 10 - Профилограммы шероховатости: а – после обычной обработки $Ra = 0.9$ мкм; б – с применением лазерного воздействия $Ra = 0.55$ мкм

Помимо обеспечения качественных показателей детали шток установлено, что асинхронное воздействие переменных составляющих метастабильной структуры и основного металла, обусловленное различием механических свойств, позволяет сегментировать сливную стружку. В качестве результата проведенного эксперимента показаны фотографии полученных исследований. При стандартной обработке материала из стали 40X зафиксировано образование сливной стружки (Рисунок 11, а). В случае точения с метастабильной зоной, установлено сегментирование стружки на отрезки заданной длины (Рисунок 11, б).



Рисунок 11 – Фотография стружки: а – сливная стружка при обычной механической обработке стали 40X с режимами $V = 90$ м/мин, $S = 0.2$ мм/об, $t = 0.3$ мм; б - сегментированная стружка после точения стали 40X с метастабильной структурой

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ современного состояния вопроса, направленного на технологическое обеспечение шероховатости поверхностного слоя и точности формы в процессе изготовления детали «шток» гидроцилиндра, применяемого в горной промышленности, показал, что разработка и совершенствование новых технологических решений, направленных на обеспечение заданных показателей шероховатости и точности поверхностного слоя детали, является актуальной научной и народнохозяйственной проблемой. Произведенный обзор научно-технической литературы по данному направлению позволяет

сделать вывод, что недостаточно изучены и мало разработаны особенности технологического процесса изготовления ответственных поверхностей деталей типа «тел вращения» на основе применения предварительного локального физического воздействия. Постановка такого рода задачи приобретает особую актуальность при изготовлении изделий на высокоавтоматизированных станках с ЧПУ.

1. В соответствии с поставленной целью установлены основные закономерности возникающего колебательного процесса в технологической системе и влияние подсистемы «инструмент» - «заготовка» на образующуюся при механической обработке шероховатость поверхности, точность формы и размеров детали «шток» гидроцилиндра.

2. Предложен способ технологического обеспечения параметров шероховатости и точности формы при изготовлении деталей типа «тел вращения» за счет нанесения локального лазерного воздействия на поверхностный слой заготовки по специально заданной траектории с последующей механической обработкой.

3. Виртуальное моделирование в программной среде NI LabVIEW 2013 SP1 технологической системы механической обработки с условием переходного процесса, обусловленного метастабильной зоной, подтвердило, что периодическая смена механических свойств и коэффициентов обрабатываемого материала позволяет существенно изменить динамическую устойчивость технологической системы и граничные условия перехода к автоколебательному процессу.

4. Произведенный комплекс экспериментальных исследований, направленный на отработку технологического процесса изготовления детали «шток» гидроцилиндра с использованием метода предварительного локального лазерного воздействия, позволил зафиксировать при помощи вибродиагностического прибора подавления вибраций за границей области устойчивости технологической системы на 29% ... 36%, что обусловлено переходным процессом в метастабильную зону с отличными от основного металла механическими свойствами, и как следствие, снижая износ режущего инструмента в 1.5 ... 1.7 раза, приводящее к улучшению показателей шероховатости поверхности по значению R_a в диапазоне от 0.32 ... 0.63 мкм.

5. На основании полученных экспериментальных и теоретических исследований предложена технология изготовления детали «шток» гидроцилиндра, учитывающая влияние механических свойств предварительно созданной локальной метастабильной зоны на динамическую стабилизацию технологической системы, обеспечивающая заданные в технологическом процессе показатели шероховатости $R_a = 0.32$ мкм, точности размеров по $IT 8$ и точности формы, а также дающая возможность исключить операцию шлифовальной обработки, увеличить производительность и снизить себестоимость изготавливаемого изделия (патент №2578875 «Способ механической обработки с дроблением стружки»).

6. Проведенные экспериментальные исследования по обеспечению заданной шероховатости поверхности и точности формы детали «шток» гидроцилиндра за счет предварительного нанесения локального лазерного воздействия на поверхность обрабатываемого изделия позволили установить, что в условиях обработки стали 40Х и стали 45 с метастабильной структурой попутно решается проблема по сегментации сливной стружки, являющаяся актуальной задачей при обработке на высокоавтоматизированных станках с ЧПУ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ:

1. Ефимов, А.Е. Проектирование специализированных элементов технологической оснастки в режиме интегрирования / Л.Г. Борисова, А.Е. Ефимов // Записки Горного института: сб. науч. тр./ Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». – СПб., 2014. – №209. – С. 23–26. – ISSN 0135-3500.

2. Ефимов, А.Е. Повышение точности и качества изготовления в технологическом процессе прецизионных поверхностей гидроцилиндров шахтных крепей на основе локального термического воздействия / В.В. Максаров, Д.Ю. Тимофеев, А.Е. Ефимов // Металлообработка. – 2016. – №2. – С. 35–40. – ISSN 1684-6702.

3. Ефимов, А.Е. Повышение эффективности технологического процесса изготовления гидроцилиндров горного оборудования с применением предварительного локального термического воздействия / В.В. Максаров, Д.Ю. Тимофеев, А.Е. Ефимов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: НИТУ «МИСиС», 2016. – №9. – С. 65–73. – ISSN 0236-1493.

4. 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. – ISSN 1684-6702.

Результаты интеллектуальной деятельности:

5. Ефимов, А.Е. Патент №2578875 Российская федерация. Способ механической обработки с дроблением стружки / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов – №2578875; заявлено 27.11.2014 г.; опубликовано 01.03.2016 г.

Публикации в других отечественных изданиях:

6. Ефимов, А.Е. Динамическая стабилизация процесса тонкой лезвийной обработки за счет анизотропных свойств режущего инструмента / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов, Р.В. Вьюшин // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: материалы 1-ой Региональной межвузовской научно – практической конференции. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2013. –С. 83–85.

7. Ефимов, А.Е. Обеспечение точности в процессе обработки заготовки для высоконагруженных деталей горных машин / В.В. Максаров, Д.Ю. Тимофеев, А.Е. Ефимов // Инновационные системы планирования и управления на транспорте и в машиностроении: сборник трудов II международной научно-практической конференции. Том 2. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2014. – С. 66–69. – ISBN 978–5–4386–0318–4.

8. Ефимов, А.Е. Анализ различных методов управления процессом стружкодробления используемых в автоматизированном цикле технологических операций / В.В. Максаров, Д.Ю. Тимофеев, А.Е. Ефимов // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов III международной научно-практической конференции. Том 3. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2015. – С. 75–77. – ISBN 978-5-4386-0716-8.

9. Ефимов, А.Е. Повышение точности изготовления прецизионных поверхностей деталей шток гидроцилиндров / Д.Ю. Тимофеев, А.Е. Ефимов // Инновации на транспорте и в машиностроении: сборник трудов IV международной научно-практической конференции. Том 3. – СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2016. – С. 142–145. – ISBN 978-5-906841-28-5.

10. Ефимов, А.Е. Технологическое обеспечение качества обработки деталей типа тел вращения на основе динамического моделирования технологической системы / В.В. Максаров, А.Е. Ефимов // Сборник трудов XV Международной конференции NIDays 2016. – М.: ДМК Пресс, 2016. – С. 454-456. - ISBN 978-5-97060-490-8.