

На правах рукописи



Николаев Андрей Юрьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННОЙ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ФРЕЗЕРОВАНИИ ДЕТАЛЕЙ
ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ С УЧЕТОМ ДИСБАЛАНСА
ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ НАЛАДОК**

Специальность: 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск, 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

Научный руководитель: **Савилов Андрей Владиславович**, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «ИРНИТУ», доцент кафедры «Технология и оборудование машиностроительных производств», г. Иркутск

Официальные оппоненты: **Дуюн Татьяна Александровна**, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», заведующий кафедрой «Технологии машиностроения», г. Белгород

Серебренникова Анжела Геннадьевна, кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет», доцент кафедры «Технология машиностроения», г. Комсомольск-на-Амуре

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», г. Хабаровск

Защита состоится « 28 » апреля 2020 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.073.02 при ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, корпус «К», конференц-зал.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «ИРНИТУ» и на официальном сайте университета www.istu.edu.

Автореферат разослан « 11 » марта 2020 г.

Отзывы на автореферат в 2-х экземплярах, подписанные и заверенные печатью организации, просим выслать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИРНИТУ; Ученому секретарю диссертационного совета Д 212.073.02 В.М. Салову; e-mail: salov@istu.edu, тел./факс: (3952) 40-51-17.

Ученый секретарь диссертационного совета,
к.т.н, профессор



В.М. Салов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Повышение эффективности технологических процессов механической обработки на основе применения современных металлообрабатывающих станков и комплексов, переход на прогрессивные технологии обработки, повышение качества выпускаемой продукции являются главными задачами современного машиностроительного производства. Актуальность темы исследования обусловлена следующими факторами.

1. Учет влияния остаточного дисбаланса инструментальной наладки при концевом фрезеровании на шероховатость обрабатываемой поверхности позволяет с одной стороны добиться повышения производительности, а, следовательно, снижения себестоимости изделий, а с другой стороны, обеспечить стабильную работу технологической системы без негативного влияния на стойкость инструмента и ресурс станка.

2. Рекомендации зарубежных компаний по обеспечению определённых классов балансировки инструментальных наладок в ряде случаев являются необоснованно завышенными, что приводит к увеличению затрат на подготовку производства. Указанные рекомендации базируются на стандартах, регламентирующих балансировку жёстких роторов, что не позволяет установить связь результатов балансировки с технологическими задачами получения заданной шероховатости поверхности деталей.

Снижение затрат на подготовку производства при обеспечении требуемого качества изделий возможно за счет разработки рекомендаций по уровням балансировки инструментальных наладок, которые будут базироваться на объективных результатах исследований влияния остаточного дисбаланса на шероховатость поверхности при высокоскоростном фрезеровании.

Диссертационная работа посвящена исследованию влияния дисбаланса инструментальных наладок на формирование микрогеометрии поверхности деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов, и разработке на этой основе математической модели процесса концевой фрезерования. Использование полученных результатов позволит снизить трудоемкость работ по подготовке инструментальных наладок с одновременным обеспечением заданной шероховатости поверхности деталей без снижения производительности процесса фрезерования, стойкости инструмента и ресурса дорогостоящего оборудования.

Степень разработанности проблемы. Современное металлорежущее оборудование работает в условиях увеличивающихся скоростей и динамических нагрузок, приводящих к колебаниям в технологической системе, что негативно сказывается на техническом состоянии опор шпиндельного узла, надежности процесса резания и, следовательно, качестве обработанных деталей. Одним из возможных путей повышения качества механообработки считается снижение влияния вибраций, которые являются неизменным спутни-

ком любого процесса механической обработки, в частности – фрезерования. Выделяют три основные группы вибраций в зависимости от источника.

Первая группа – вибрации сочлененной технической системы, связанные с наличием соединений и кинематических связей между элементами этой системы, такими как станок, приспособление, инструмент, деталь.

Вторая группа – термомеханические вибрации, возникающие в зоне резания и связанные с температурными деформациями заготовки, стружки и режущей части инструмента.

Третья группа – это регенеративные вибрации. При фрезеровании каждый зуб фрезы, совершая колебания, оставляет за собой волнистую поверхность заготовки, и в результате каждый последующий зуб срезает слой заготовки переменной толщины, что в свою очередь приводит к осцилляциям силы резания и появлению регенеративных вибраций.

При фрезеровании деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов влияние вибраций возрастает, так как обработка ведётся на высоких скоростях. С увеличением рабочих частот вращения инструмента, в частности концевых фрез, ужесточаются требования к балансировке инструмента. Ужесточение требований по дисбалансу шпинделя станка, инструментальной оснастки и собственно инструмента на стадии подготовки технологической системы к работе может существенно усложнить, замедлить процесс проведения операции балансировки. Как следствие, это может привести к увеличению парка балансировочного оборудования, численности персонала для работы и его обслуживания, что, в конечном счете, сказывается на себестоимости самой продукции.

Цель диссертационной работы. Повышение эффективности подготовки производства процесса высокоскоростного фрезерования деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов за счет снижения трудоемкости балансировки инструментальных наладок, обеспечивающей заданные параметры шероховатости обработанных поверхностей.

Достижение данной цели возможно после решения задач:

1. Экспериментальная оценка влияния величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки на процесс концевое фрезерование и шероховатость обработанной поверхности детали.

2. Разработка алгоритма расчета мгновенного значения толщины срезаемого слоя и формирования микропрофиля обработанной поверхности при концевом фрезеровании.

3. Определение эмпирической зависимости шероховатости обработанной поверхности от величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки.

4. Разработка рекомендаций по балансировке инструментальных наладок, направленных на сокращение времени подготовки инструмента, а также обеспечивающих получение обработанной поверхности с требуемой заданной шероховатостью.

Научная новизна работы

1. Установлено влияние режимов резания и величин остаточного дисбаланса инструментальной наладки на шероховатость обработанных поверхностей деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов при высокоскоростном фрезеровании (п. 3 паспорта специальности 05.02.08).

2. Разработана математическая модель расчета мгновенного значения толщины срезаемого слоя и формирования микропрофиля обработанной поверхности при концевом фрезеровании (п. 3 паспорта специальности 05.02.08).

3. Установлены закономерности, разработанная на их основе методика балансировки инструментальных наладок, позволяет обеспечить заданную шероховатость поверхности. При этом существенно сокращается время на подготовку инструмента для его применения на высокопроизводительных станках с числовым программным управлением. (п. 7 паспорта специальности 05.02.08).

Теоретическая значимость работы. Установлена эмпирическая зависимость шероховатости обработанной поверхности детали от величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки. Определены диапазоны значений остаточного дисбаланса инструментальных наладок.

Практическая значимость работы. Полученные результаты позволяют обеспечить:

- заданное качество обработанных поверхностей деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов с установленной в ходе исследования величиной остаточного дисбаланса инструментальных наладок;
- сокращение времени подготовки инструмента к работе за счет рационального выбора точности балансировки и параметров обработки;
- снижение технологической себестоимости изготавливаемых деталей за счет сокращения числа подготовительных операций.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования базируются на научных основах технологии машиностроения и теории резания материалов, математического моделирования. Математическое моделирование исследуемого процесса было выполнено в программе MATLAB. Статистический анализ данных осуществлен с использованием пакета программ Statistica. Экспериментальные данные получены путем обработки высокопрочных алюминиевых сплавов на 5-и координатном обрабатывающем центре HSC 75V linear. Измерения проводились с помощью приборов:

- контактного профилометра Taylor Hobson Form Talysurf i200 для измерения шероховатости обработанной поверхности,
- балансировочной машины Haimer TD2009 Comfort Plus для определения остаточного дисбаланса инструментальных наладок,
- динамометрического комплекса Kistler 9253B23 для контроля сил резания при фрезеровании,
- программного комплекса для модального анализа для построения диаграмм стабильного резания,

- устройства для измерения и контроля геометрических параметров инструмента Zoller Genius 3.

По результатам проделанных работ автор выносит на защиту:

1. Алгоритм расчета мгновенного значения толщины срезаемого слоя и формирования микропрофиля обработанной поверхности при концевом фрезеровании.

2. Построенную на основе результатов экспериментальных исследований эмпирическую зависимость, отражающую влияние режимов резания и величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки на шероховатость обработанной поверхности деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов.

3. Технологические рекомендации по определению рациональной точности балансировки инструментальных наладок, позволяющие обеспечить заданную шероховатость поверхности, существенно сокращая при этом время на подготовку инструмента.

Достоверность результатов обусловлена использованием современного, высокоточного обрабатывающего и измерительного оборудования и лицензионного программного обеспечения. Математические расчеты, теоретические подходы, предложенные автором, подтверждаются проведенными экспериментальными исследованиями.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на X Международной конференции по технологии машиностроения, системам управления и автоматизации» (г. Томск, 2016), IX Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 2017), XII Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 2019), XIII Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 2019).

Публикации. На основе материалов диссертационной работы опубликовано 5 работ, в том числе 3 статьи в научных изданиях, рекомендованных перечнем ВАК РФ для публикации результатов кандидатских и докторских диссертаций; 1 публикация в международном издании, входящем базу Scopus.

Личный вклад автора. Формулировка цели и задач диссертационной работы. Разработана математическая модель, позволяющая определять микрогеометрию обработанной поверхности при концевом фрезеровании с учётом дисбаланса инструментальной наладки. Проведены экспериментальные исследования, выполнен анализ, обработка и интерпретация полученных результатов, сформулированы основные результаты в виде публикаций; сформулированы выводы и положения, выносимые на защиту. Разработаны технологические рекомендации по определению рациональной точности балансировки инструментальных наладок с учетом параметров обработки и используемых инструментальных систем. Автор принимал непосредственной участие в разработке и совершенствовании технологии механической обра-

ботки деталей из авиационной техники на высокопроизводительном оборудовании на Иркутском авиационном заводе – филиале ПАО «Корпорация «Иркут».

Структура и объем работы. Диссертация включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 100 наименований и 4 приложений. Основная часть работы изложена на 136 страницах. Общий объем работы 167 страниц, включая 16 таблиц и 115 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана краткая характеристика состояния проблемы, обоснована актуальность выполненной работы, определена цель и поставлены задачи исследования, сформулированы научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе приведены конструктивные особенности рассматриваемых деталей и анализ их геометрической формы. Проанализированы технологические факторы, оказывающие влияние на качество получаемой после конечного фрезерования поверхности. Проанализированы основные положения теории и методик расчета технологических параметров процесса конечного фрезерования и процесса балансировки инструментальных наладок.

Анализ исследований, представленных в научно-технической литературе, нормативно-технических материалах. Влияние вибраций на шероховатость поверхности и режимы резания исследовались Жарковым И.Г., Кашириным А.И., Петрухиным В.В., Потаповым В.А.

Результаты исследований в области моделирования динамики процесса фрезерования наиболее полно раскрыты в работах Киселева И.А., Гуськова А.М., Воронова С.А., Огневенко Е.С., Дерябина И.П., Сергеева С.В., Галловэя Д.Ф. (D.F. Galloway), Эма С. (S. Ema), Дж. Ц. Рукема (Roukema J.C.), М. Пиртини (Pirtini M.), Ю. Алтинтаса (Altintas Y.), К. Ахмади (Ahmadi K.).

Методики расчета и измерения точности балансировки на основе величины остаточного дисбаланса инструментальных наладок приведены в международных стандартах ISO/FDIS 1940-1:2002(E) и DIN 69888:2008-09.

Формирование поверхности в результате конечного фрезерования представляет собой сложный процесс, определяемый геометрическими параметрами инструмента, вибрационными характеристиками и режимами резания.

Анализ публикаций показал, что обеспечение наилучшего качества поверхности с сохранением высокой производительности процесса обработки возможно с использованием методов математического моделирования.

Требования для инструментальных наладок должны рассчитываться исходя из обусловленных дисбалансом нагрузок на подшипниковые опоры шпинделя. Расчет должен учитывать, чтобы остаточный дисбаланс наладки в составе шпинделя не оказывал значительного влияния на технологический процесс.

Анализ нормативных документов, регламентирующих процесс балансировки, показал, что резонанс с собственными частотами – параметр, специфичный для конкретной комбинации инструмента и конструктивных элемен-

тов металлорежущего оборудования и, следовательно, его влияние не поддается учету. Нормируемым параметром может являться непосредственно величина дисбаланса U , г×мм. Также не имеет смысла сопоставлять данный параметр с классами балансировки по ISO 1940-1, поскольку масса инструмента не оказывает влияние на динамические нагрузки несбалансированной инструментальной наладки.

Таким образом, на основании анализа литературных источников и действующих нормативных документов были сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена математическому моделированию процесса концевго фрезерования. В рамках представленной работы математическое моделирование сводится к расчету мгновенного значения толщины срезаемого слоя зубом фрезы и построению микропрофиля обработанной поверхности с учетом остаточного дисбаланса инструментальной наладки.

Основываясь на положениях работ Minis L., Yanushevsky R., Tembo A., процесс концевго фрезерования рассматривается как система 2-я степенями свободы в системе координат X-Y (рисунок 1).

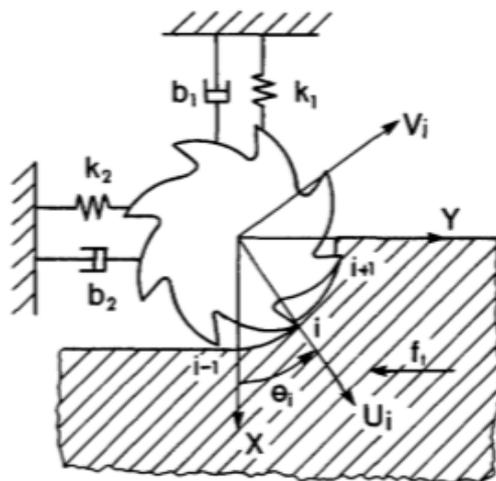


Рисунок 1 – Система с 2-я степенями свободы

Динамика процесса описывается двумя уравнениями:

$$m_1 \ddot{x} + b_1 \dot{x} + k_1 x = \sum_{i=0}^{n-1} F_{xt} \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{y} + b_2 \dot{y} + k_2 y = \sum_{i=0}^{n-1} F_{yt}, \quad (2)$$

где m_1, b_1, k_1, m_2, b_2 и k_2 – модальные параметры инструмента, относящиеся к его геометрии;

F_{xt} и F_{yt} – компоненты силы резания, которая действует на i -ый зуб фрезы;

n – число зубьев фрезы.

Исходя из рисунка 1 U_i и V_i выступают в качестве поворотных осей, благодаря которым мы можем определять мгновенные положения i -ого зуба фрезы, что дает нам возможность рассматривать каждый зуб как отдельный ре-

зец, соответственно полученные в дальнейшем уравнения могут быть, теоретически, использованы и для точения.

Угол θ_i определяет положение локальной системы координат $U_i - V_i$ относительно системы координат X-Y. Данный прием позволяет нам определить период врезания и выхода зуба из материала $T = 2\pi/n\Omega$.

$$\theta_i = \Omega t + i \frac{2\pi}{n} = \Omega(t + iT), \quad i = 0, 1, \dots, n - 1, \quad (3)$$

где Ω – угловая скорость вращения зуба фрезы.

Соответственно матрица, связывающая обе системы координат, принимает вид:

$$L = \begin{pmatrix} \cos\Omega(t + iT) & \sin\Omega(t + iT) \\ -\sin\Omega(t + iT) & \cos\Omega(t + iT) \end{pmatrix} \quad (4)$$

толщина срезаемого слоя f будет определяться по формуле:

$$f_i = f_t \sin\theta_i = f_t \sin\Omega(t + iT), \quad (5)$$

где f_t – подача на зуб.

Рассматривая процесс изменения и формирования срезаемой поверхности (рисунок 2), необходимо ввести 2 новых параметра, а именно:

1. модуляция срезаемого слоя обрабатываемой поверхности u_i , параметр определяется по нормали к этой поверхности и представляет собой отклонение i -ого зуба от траектории, по которой он бы прошел, не оказывая на него никакого усилия;

2. параметр u_i^0 , определяющий траекторию движения предыдущего зуба.

Данный подход позволяет нам учесть 2 простейших случая, возникающих во время обработки:

случай №1 – i -ый зуб находится в контакте с обрабатываемой поверхностью;

$$\begin{aligned} u_i - u_i^0 + f_t \sin\theta_i &> 0 \\ F_{ut} &= -hg(\theta_i)[k_d(u_i - u_i^0 + f_t \sin\theta_i) + b_d \dot{u}_i] \\ F_{vt} &= -hg(\theta_i)[k_{dc}(u_i - u_i^0 + f_t \sin\theta_i) + b_c \dot{u}_i], \end{aligned} \quad (6)$$

где h – глубина резания a_p , k_d и b_d – коэффициенты определяющие показатели жесткости и демпфирования, $g(\theta_i)$ – функция, определяющая ненулевое значение составляющей силы резания.

$g(\theta_i) = 1$ при $2\rho\pi + \theta_1 \leq \theta_i \leq 2\rho\pi + \theta_2$ $\rho = 0, 1 \dots$, а в других случаях $g(\theta_i) = 0$;

случай №2 – i -ый зуб потерял контакт с поверхностью;

$$\begin{aligned} u_i - u_i^0 + f_t \sin\theta_i &< 0 \\ F_{ut} &= F_{vt} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

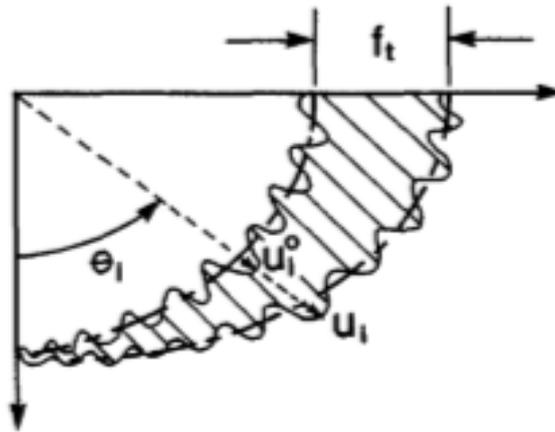


Рисунок 2 – Траектория движения i -ого зуба

В случае моделирования процесса концевой фрезерования, математическая модель, в зависимости от сложности может учитывать ряд механизмов возбуждения вибраций, возникающих при обработке резанием. Анализ публикаций авторов Minis L., Yanushevsky R., Tembo A., Balachandran B., Zhao M.X. Campomanes M.L., Altintas Y. показал, что основным является механизм запаздывания – возникновение автоколебаний при «резании по следу».

Для реализации механизма запаздывания в работе применен подход «Имитационного моделирования». Он заключается в численном интегрировании уравнения движения системы. Для этого применяется алгоритм геометрического моделирования с определением мгновенных значений толщины срезаемого слоя. Это возможно благодаря сохранению истории формирования поверхности.

Запаздывание в системе образуется за счет регенерации поверхности. Для исключения ошибок при формировании обработанной поверхности учитываются моменты, когда происходит врезание и выход инструмента из материала. Для этого в алгоритме перед расчетом толщины срезаемого слоя и сил резания происходит учет взаимного положения режущих кромок и поверхности детали, проверяя тем самым, находятся зубья фрезы в металле или нет. Во время прохождения зуба фрезы производится расчет упругих перемещений инструмента, (с учетом заданных параметров демпфирования, модальной жесткости и массы) и формируется обработанная поверхность. По вновь сформированной поверхности проходит следующий зуб. Подобный подход позволяет учесть переменную толщину срезаемого слоя, а, следовательно, и смоделировать регенеративные вибрации при резании.

Описанная математическая модель реализована на языке Matlab. На выходе мы получаем профилограмму обработанной поверхности (рисунок 3), которую можем сравнить с экспериментальными результатами (рисунок 4).

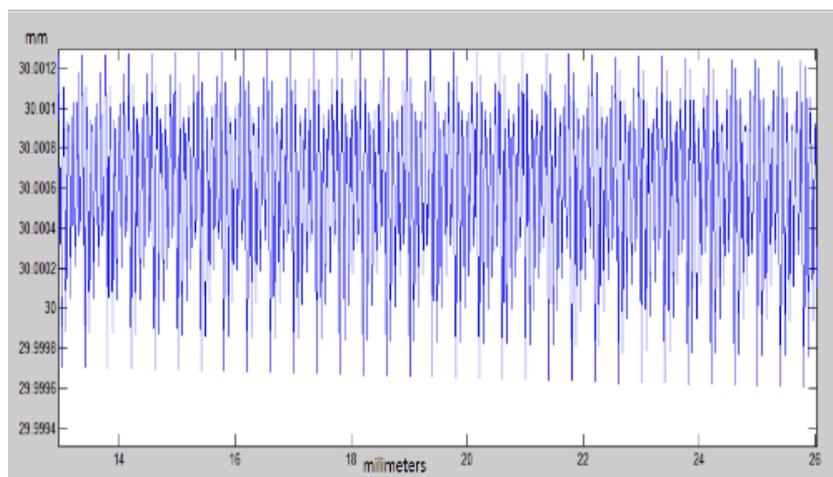


Рисунок 3 – Профилограмма обработанной поверхности, полученная по результатам расчета

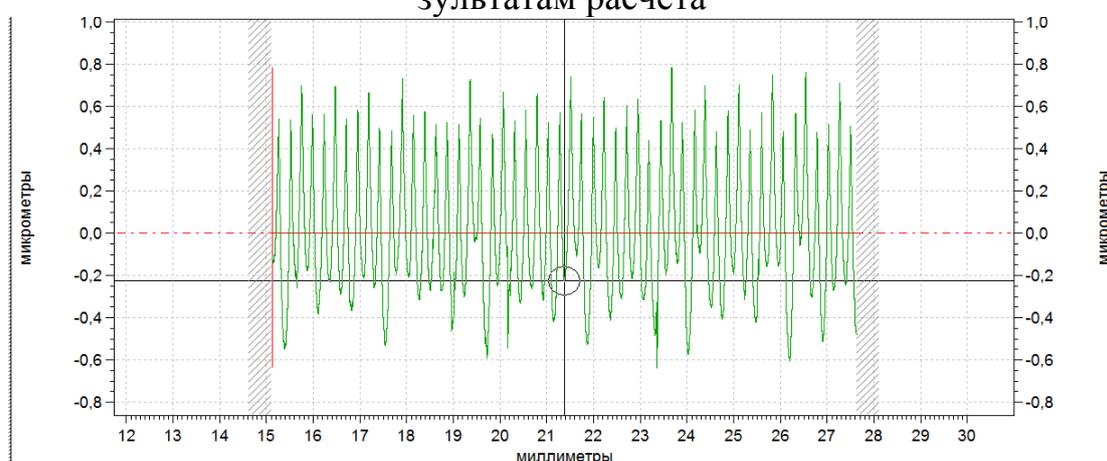


Рисунок 4 – Микропрофиль обработанной поверхности, полученной в результате эксперимента

Сравнение расчетных и экспериментальных данных (рисунок 5), с учетом особенностей представления результатов моделирования программой, проводилось по наибольшей высоте неровностей профиля R_{max} .

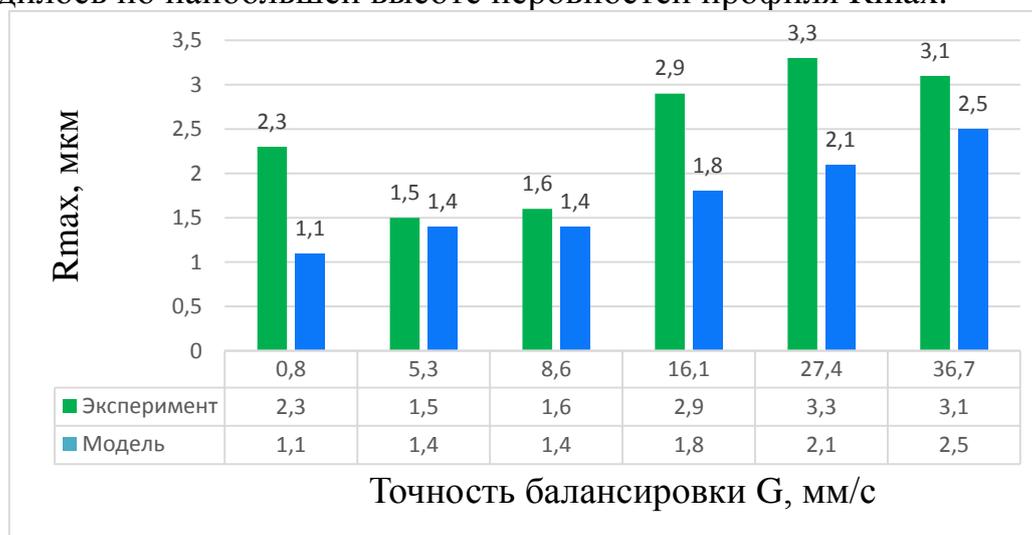


Рисунок 5 – Сравнение результатов моделирования

В третьей главе приведены результаты экспериментальной оценки влияния величины дисбаланса инструментальной наладки на шероховатость обработанной поверхности детали.

Эксперимент заключался в продольном фрезеровании уступов в алюминиевой заготовке. Путем варьирования величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки при фиксированных режимах резания.

За основу брались режимы, используемые на практике с учетом рекомендаций справочной литературы (таблица 1).

Таблица 1 – Режимы резания по результатам модального анализа

Инструмент	Глубина резания a_p , мм	Ширина резания a_e , мм	Продольная подача V_f , мм/мин	Окружная скорость резания v_c , м/мин	Частота вращения шпинделя s , мин ⁻¹	Подача f_z , мм/зуб
R790-032C5S2-16M	7	24	12120	2029	20200	0,2
AZ-3D16R6L65	20	0,5	3600	754	15000	0,08

Впоследствии режимы резания были скорректированы после проведенного модального анализа. В эксперименте участвовали 2 инструментальные наладки (рисунок 6).



а



б

Рисунок 6 – Исследуемый инструмент: а – корпусная фреза; б – модель фрезы AZ-3D16R6L65

Наладка №1 – корпусная фреза со сменными твердосплавными пластинами (рисунок 6, а). Инструментальная наладка включает в себя элементы системы Capto C5: базовый держатель C5 для инструментального конуса HSK-63A с втулкой для внутреннего подвода СОЖ и фрезу R790-032C5S2-16M со сменными твердосплавными пластинами R790-160408PH-NM H13A.

Наладка №2 – модульная инструментальная оснастка с гидромеханическим адаптером и цельной твердосплавной концевой фрезой (рисунок 6, б).

Инструментальная наладка включает в себя элементы системы Capto C5: базовый держатель C5 для инструментального конуса HSK-63A с втулкой для внутреннего подвода СОЖ и адаптер CoroGrip, а также цангу 20-16 и цельную твердосплавную фрезу AZ-3D16R6L65. Инструмент представляет собой цельную концевую трехзубую фрезу из твердого сплава группы обрабатываемости K40 по ISO диаметром 16 мм. На рисунке 7 представлены результаты модального анализа.

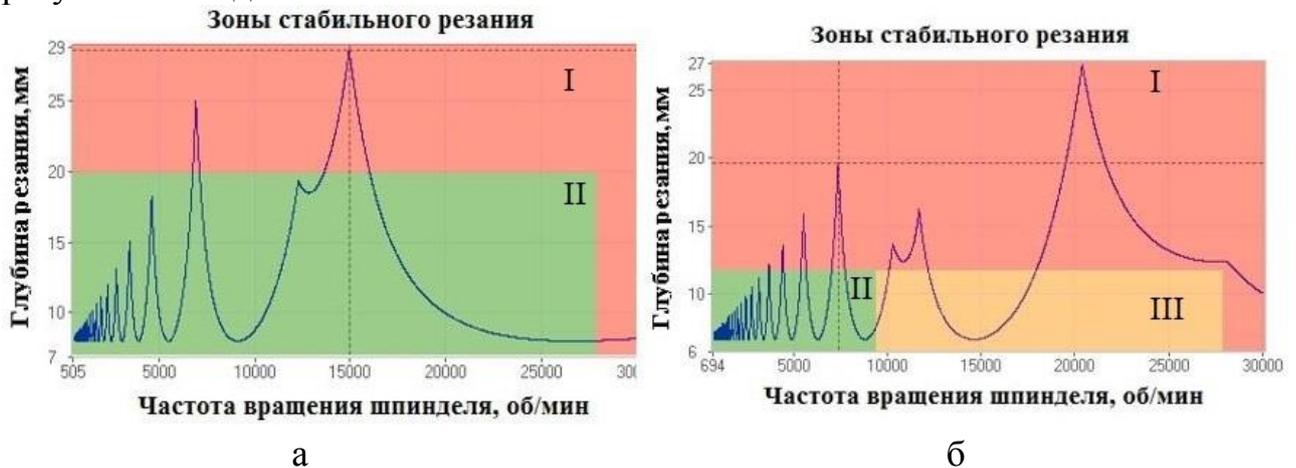


Рисунок 7 – Результаты модального анализа: а – для цельной твердосплавной фрезы; б – для корпусной фрезы

В области I на рисунке 7 обозначены режимы, реализация которых на практике невозможна в силу ограничения частоты вращения шпинделя станка (28000 мин^{-1}), а также максимальной глубины резания, равной длине зуба фрезы (20 мм для AZ-3D16R6L65 и 12 мм для R790-032C5S2-16M). Для фрезы R790-032C5S2-16M на рисунке 7, б дополнительно указана область III, при работе в которой будут превышены рекомендации производителя на максимальную скорость резания для данных пластин (635 м/мин).

На рисунках 8 и 9 представлены результаты проведенного эксперимента.

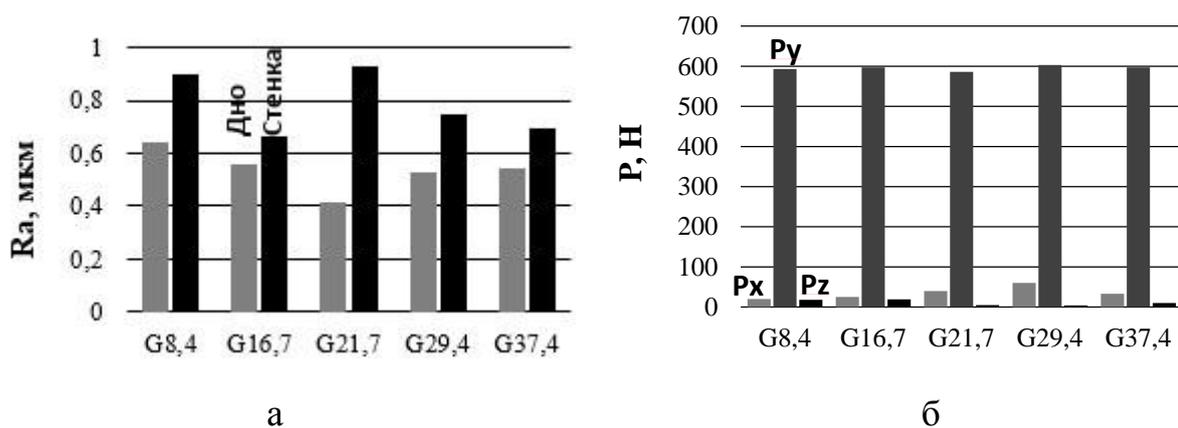


Рисунок 8 – Результаты эксперимента для наладки №1: а – зависимость параметра шероховатости R_a обрабатываемой поверхности от точности балансировки инструментальной наладки; б – зависимость сил резания от точности балансировки инструментальной наладки

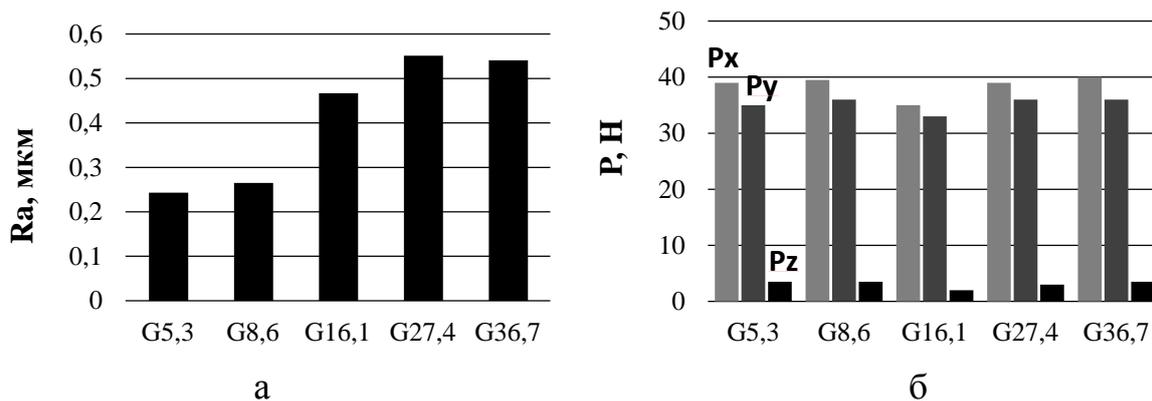


Рисунок 9 – Результаты эксперимента для наладки №2: а – зависимость параметра шероховатости Ra обрабатываемой поверхности от точности балансировки инструментальной наладки; б – зависимость сил резания от точности балансировки инструментальной наладки

Для наладки №1 дисбаланс варьировался при помощи балансировочных колец. Для наладки №2 дисбаланс варьировался разрушающим методом – «высверливанием».

Для уменьшения систематической погрешности, связанной с неоднозначной посадкой инструментального конуса в адаптер балансировочной машины, необходимо, для достижения лучших результатов, на всем этапе балансировки соблюдать выбранный способ установки инструментальной наладки в адаптер балансировочной машины и подворачивать базовый держатель до соприкосновения с кулачком всегда в одну сторону.

Серьезное влияние на качество балансировки до классов выше G5.0 оказывает чистота посадочных поверхностей наладки и адаптера и инструментальной наладки в целом. Любое загрязнение, будь то капли оставшегося масла, сочащиеся из дюзов патрона или не полностью удаленная стружка после высверливания избыточной массы, или другие источники загрязнения, например, капли СОЖ, может сыграть при балансировке роль дополнительной массы и привести к неверной интерпретации состояния инструментальной наладки балансировочной машиной. Поэтому необходимо постоянно следить за чистотой всей вовлеченной в процесс балансировки оснастки.

Проведен модальный анализ для 2-х инструментальных наладок с цельным твердосплавным инструментом и сборной фрезой. Определены зоны стабильного резания.

Сборная трехзубая фреза R790-032 показала стабильную работу на режимах, рассчитанных при помощи модального анализа. В исследованном диапазоне классов балансировки инструментальной наладки не было зафиксировано вибрации, оказывающие негативное воздействие на качество обработанной поверхности. Инструмент не нуждается в дополнительной балансировке после сборки.

Цельная твердосплавная трехзубая фреза AZ-3D16R6L65 показала стабильную работу на режимах, рассчитанных при помощи модального анализа.

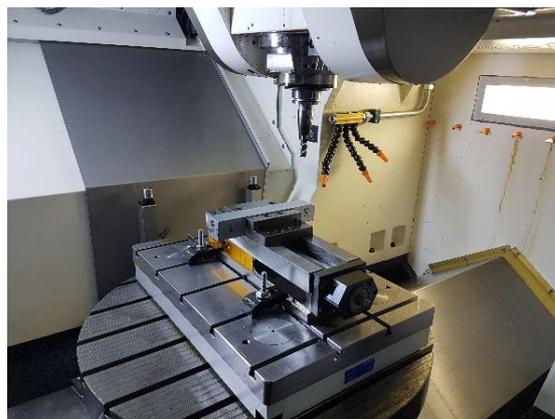
В рассмотренном диапазоне классов балансировки инструментальной наладки были зафиксированы вибрации постоянной амплитуды.

С увеличением остаточного дисбаланса в пределах от 0,8 до 55,1 г×мм шероховатость обработанных поверхностей изменялась в диапазоне 0,42 – 0,56 мкм. Шероховатость поверхности соответствовало поверхности после чистового фрезерования.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, нацеленные на проверку корректности работы математической модели, а также на определение и формулировку основных рекомендаций по балансировке инструментальных наладок при скоростном фрезеровании. Определение реальной зависимости шероховатости обработанной поверхности от точности балансировки инструментальной наладки; состоящей из 3-х зубой концевой твердосплавной фрезы диаметром 16 мм и термоусадочного патрона Haimer A63.140.16, выполненного под инструментальную систему HSK (рисунок 10, а). Выбор данного патрона обусловлен его высокой точностью, радиальное биение составляет 0,006 мкм, а также возможностью производить балансировку инструментальной оснастки при помощи балансировочных винтов. Данное решение позволяет варьировать величину остаточного дисбаланса в пределах рабочего диапазона, не прибегая к разрушающим методам балансировки.



а



б

Рисунок 10 – Проведение эксперимента: а – исследуемая инструментальная наладка, закрепленная в шпинделе станка; б – рабочая зона станка HSC75V linear

Исследование проводилось по дробному 4-х факторному плану «Бокса-Бенкена» с 3 уровнями (таблица 2).

Таблица 2 – Уровни факторов

Уровень фактора		Факторы			
		$U_{ост}, \text{г}\times\text{мм}$	$f_z, \text{мм/зуб}$	$a_e, \text{мм}$	$a_p, \text{мм}$
x_{imax}	+1	14,7	0,15	10	2
x_{i0}	0	8,9	0,10	6	1,5
x_{imin}	-1	3,7	0,05	2	1

В качестве исследуемого фактора для оценки влияния точности балансировки на шероховатость получаемой поверхности была выбрана величина остаточного дисбаланса инструментальной наладки. Данный параметр универсален и позволяет определить качество балансировки инструмента вне зависимости от используемого стандарта. Также для сравнительной оценки полученных результатов в качестве дополнительных факторов были выбраны параметры, которые оказывают наибольшее влияние на шероховатость и процесс обработки в целом, а именно: подача, ширина и глубина фрезерования.

Измерение сил и контроль вибраций проводились при попутном фрезеровании (рисунок 10, б). За основу были взяты режимы резания, используемые на практике с учетом рекомендаций справочной литературы. В последствие они были скорректированы по результатам проведенного модального анализа (таблица 3).

Таблица 3 – Режимы резания

D_c , мм	z	V_c , м/мин	a_e , мм	a_p , мм	n , мин ⁻¹	f_z , мм/зуб	V_f , мм/мин
16	3	1256	10	2	25000	0,15	11250

Верхний уровень U_{ocm} соответствует максимально допустимому дисбалансу для вращающегося инструмента. Нижний уровень U_{ocm} соответствует минимальной величине дисбаланса. На рисунке 11 представлена стружка и обработанная поверхность.



Рисунок 11 – Результаты проведения экспериментов: а – получаемая стружка; б – обработанная поверхность

Используя пакет программ Statistica, были проведены расчеты для получения эмпирической зависимости шероховатости обработанной поверхности от исследуемых факторов процесса концевое фрезерования:

$$R_a = e^{-117.096 U_{ocm}^{34.831 - 2.657 \ln(U_{ocm})} F_z^{-0.859} a_p^{0.896 + 0.512 \ln(F_z)}} \cdot a_e^{2.632 - 0.715 \ln(a_e) + 0.893 \ln(F_z)} ; \quad (8)$$

Множественная регрессия позволила определить наилучшего предиктора исследуемого процесса. На рисунке 12 представлены результаты регрессионного анализа полученных данных.

Multiple Regression Results			
Dependent: Ra	Multiple R = ,73293991	F = 6,384207	
	R ² = ,53720091	df = 4,22	
No. of cases: 27	adjusted R ² = ,45305562	p = ,001441	
	Standard error of estimate: ,106311404		
Intercept: -,316010909	Std.Error: ,1315986	t(22) = -2,401	p = ,0252

U _{ост} b* = ,298	f _z b* = ,508	a _e b* = ,366
a _p b* = ,236		

Рисунок 11 – Результаты множественного регрессионного анализа. Анализ и построение поверхностей отклика, представленных на рисунке 12, выполнены в программе STATISTICA 10.0.

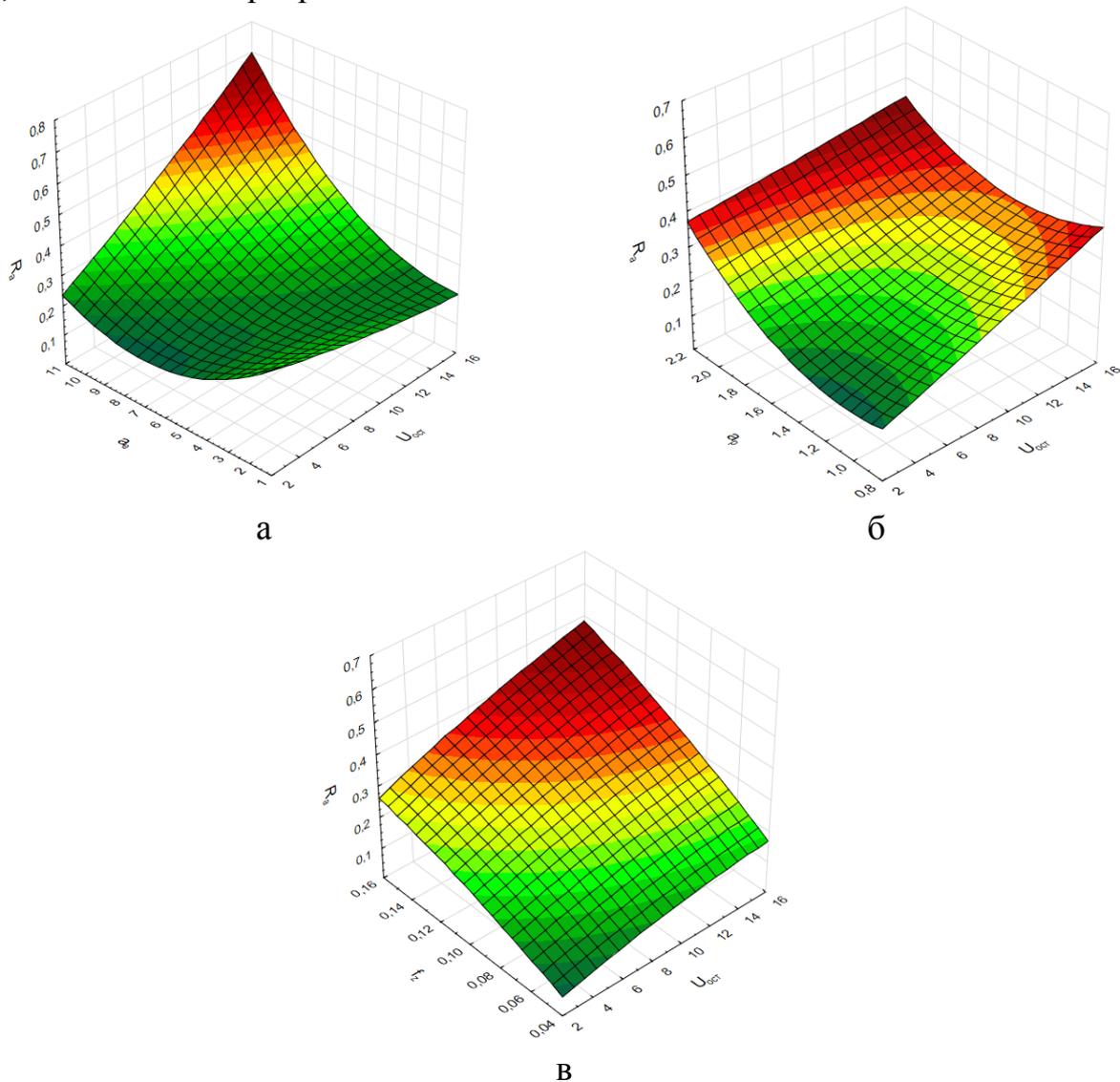


Рисунок 12 – Поверхности отклика шероховатости обработанной поверхности от остаточного дисбаланса: а – зависимость параметра R_a от $U_{ост}$ и a_e ; б – зависимость параметра R_a от $U_{ост}$ и a_p ; в – зависимость параметра R_a от $U_{ост}$ и f_z .

Анализ полученных результатов эксперимента позволяет сделать вывод, что увеличение подачи на зуб f_z приводит к увеличению шероховатости, а остальные параметры влияют неоднозначно. На стадии проведенного регрессионного анализа видно, что величина остаточного дисбаланса (а это фактор, который определяет влияние точности балансировки на шероховатость обработанной поверхности) в процессе расчета был определен программой как фактор, не оказывающий существенного влияния, аналогичную картину мы можем наблюдать и на полученных поверхностях отклика.

Согласно положениям, представленным в работах Адлера Ю.П., Маркова Е.В., Грановской Ю.В. расчетная модель может считаться адекватной. Это следует из значения коэффициента уровня значимости «р», который должен быть $< 0,05$, а также коэффициента детерминации «R», который должен быть $> 0,3$, т.е. изменение отклика происходит под воздействием учтенных в модели факторов. Данные коэффициенты показывают долю изменчивости отклика, происходящую под одновременным воздействием всех факторов. Другими словами, результаты регрессионного анализа говорят об адекватном подборе факторов, а также о целесообразности прогнозов по данной модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе проведенных исследований обоснована возможность повышения эффективности подготовки производства, процесса высокоскоростного фрезерования деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов за счет снижения трудоемкости балансировки инструментальных наладок, обеспечивающей заданные параметры шероховатости обработанных поверхностей. В ходе исследований получены следующие научные и практические результаты.

1. Методика устранения дисбаланса, разработанная на основе технологических рекомендаций по балансировке инструментальных наладок, позволяющих обеспечить заданную шероховатость поверхности, сокращает время на подготовку инструмента в 2-3 раза. Использование полученных результатов позволит снизить трудоемкость работ по подготовке инструментальных наладок с одновременным обеспечением заданной шероховатости поверхности деталей без снижения производительности процесса фрезерования, стойкости инструмента и ресурса дорогостоящего оборудования.

2. Выполнена оценка влияния точности балансировки инструментальной наладки на шероховатость обработанной поверхности детали при концевом фрезеровании.

3. На основе экспериментальных исследований получена эмпирическая математическая модель, отражающая влияние режимов резания и величины остаточного дисбаланса инструментальной наладки на шероховатость обработанной поверхности деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов при высокоскоростном фрезеровании.

4. На основе анализа существующих математических моделей и меха-

низмов возбуждения вибраций при моделировании процесса механообработки разработан алгоритм расчета мгновенного значения толщины срезаемого слоя и формирования микропрофиля обработанной поверхности при концевом фрезеровании, учитывающий вибрационные характеристики инструментальной наладки, жесткость технологической системы, геометрические параметры режущего инструмента. В основе разработанного алгоритма лежит механизм запаздывания. Запаздывание в системе образуется за счет регенерации поверхности.

5. По результатам проведенных исследований установлено, что требования стандарта DIN 69888 к качеству балансировки вращающегося инструмента обоснованы. Рекомендуется руководствоваться ими и отказаться от практики оценки качества балансировки параметром G. При оценке точности балансировки инструментальной наладки следует руководствоваться допустимой величиной остаточного дисбаланса.

6. Ужесточение требований к остаточному дисбалансу инструментальных наладок приводит к высоким затратам на подготовку производства. При средней продолжительности процесса балансировки в 10 минут время проведения операций для соблюдения требования дисбаланса в 1 г×мм может возрасти до 2,5-3 раз. С учетом эксцентриситета шпинделей станков $e = 2,5$ мкм, достижение подобных требований не имеет смысла. В случаях, требующих проверки качества балансировки инструментальной наладки, следует руководствоваться требованиями стандарта DIN 69888 взамен действующего ISO 1940-1. Действующий же стандарт ISO 1940-1 в практике механообработки рекомендуется использовать только для балансировки инструментальных наладок в составе шпинделя станка.

7. При анализе вибраций, вызванных остаточным дисбалансом инструментальной наладки, рекомендуется пользоваться встроенными средствами обрабатывающего комплекса для контроля вибрационного состояния опор шпинделя. Экспериментальные исследования были проведены на режимах, полученных при помощи модального анализа системы. Это показывает их применимость независимо от конкретных режимов резания.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Николаев А.Ю.** Влияние дисбаланса инструментальных наладок на качество обработанной поверхности при концевом фрезеровании / А.Ю. Николаев. – Вестник ИрГТУ. – 2019. – Т. 23. – №4. – С. 699-709.
2. Пятых А.С. Исследование зажимных патронов для сверления точных отверстий / А.С. Пятых, А.В. Савилов, **А.Ю. Николаев** // Системы. Методы. Технологии. – 2016. – №4(32). – С. 70-74.

3. Савилов А.В. Исследование влияния дисбаланса инструментальных наладок на выходные показатели фрезерования / А.В. Савилов, Д.Ю. Николаев, **А.Ю. Николаев** – Вестник ИрГТУ. –2015. – №7 (102). – С. 81-91.

В международных изданиях, включенных в Scopus:

1. Simulation of the plain milling process / **A. Yu. Nikolaev** // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2016. 27–29 October 2016, Tomsk, Russian Federation. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – Vol. 117.

В прочих изданиях:

1. **Николаев А.Ю.** Моделирование процесса плоского фрезерования // IX Всероссийская научно-практическая конференция «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 12-15 апреля 2017 г.) – Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. – С. 217-220.

Подписано в печать 26.02.2020. Формат 60 x 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Зак. 66. Поз. плана 2 н.

Отпечатано в типографии Издательства
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83