

На правах рукописи



Гимадеев Михаил Радикович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МЕХАНООБРАБОТКИ
СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ НА ПЯТИКООРДИНАТНЫХ
ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ**

Специальность 05.02.07 Технологии и оборудование механической и
физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» (ФГБОУ ВО ТОГУ), г. Хабаровск.

Научный руководитель:

Давыдов Владимир Михайлович
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологическая информатика и информационные системы» ФГБОУ ВО «ТОГУ»

Официальные оппоненты:

Аверченков Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные технологии и системы» ФГБОУ ВО «БГТУ»

Саблин Павел Алексеевич
кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «КнАГУ»

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Защита состоится 31 января 2019 г. в 13 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.092.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (КнАГУ) по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина 27, корпус 3, аудитория 201/3. Факс: 8(4217)53-61-50; e-mail: diss.material@yandex.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Комсомольского-на-Амуре государственного университета» и на официальном сайте организации по адресу www.knastu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 201__ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Проценко Александр
Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Для современного уровня развития машиностроения характерно увеличение номенклатуры выпускаемых деталей с пространственно-сложными поверхностями. Характерными представителями деталей имеющих пространственно-сложные поверхности, служат детали типа пуансон, матрицы, мастер-модели, штампы и др. Основными проблемами при изготовлении данной группы деталей – обеспечение заданных параметров качества (геометрической точности, точности формы, волнистости, шероховатости поверхности) и производительность обработки. Особенно актуальным остается вопрос об обеспечении параметров шероховатости согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014, при механической обработке фрезерованием, в связи с малоизученностью данной проблемы.

Основным средством автоматизации механической обработки деталей с пространственно-сложными поверхностями являются обрабатывающие центры с ЧПУ, а средством подготовки управляющих программ – системы автоматизированного проектирования (САПР), в частности Computer Aided Manufacture (САМ). Современные САМ-системы предлагают широкий выбор возможностей для проектирования пространственно-сложных поверхностей деталей и стратегий обработки на большом спектре технологического оборудования. Для промышленных предприятий актуальной остается задача снижения трудоемкости операций изготовления деталей с сохранением заданных показателей качества. Однако выбор оптимального режущего инструмента и технологических параметров, таких как: величина подачи, скорость резания, шаг смещения за проход, учитываются на основании личного опыта технолога-программиста или оператора технологического оборудования, т.к. современные справочные данные по механической обработке не позволяют определить требования к триботехническим свойствам поверхности.

Таким образом, для выбора указанных технологических параметров необходимо разработать критерии для обоснованного выбора эффективных режимов резания, обеспечивающие заданные параметры качества. В свою очередь качество поверхности после механообработки достаточно подробно оценивается по величине параметров шероховатости согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014.

Исходя из вышесказанного, поиск путей совершенствования технологических процессов изготовления сложнопрофильных деталей с учетом возможностей, предоставляемых современным высокопроизводительным оборудованием и инструментом, является актуальной темой.

Цель диссертационной работы – повышение качества механообработки сложнопрофильных деталей на пятикоординатных обрабатывающих центрах.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие задачи:

1. Определить эффективные режимы резания с учетом требований к качеству обработанной поверхности для различных способов фрезерования на основе исследования механизмов формообразования поверхностей.

2. Исследовать влияние угла наклона на параметры шероховатости (R_a , R_z , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v , R_{sm} , R_{ku} , R_{sk}) обработанной поверхности, при фрезеровании на различных технологических режимах. Определить области существования зависимости между этими параметрами.

3. Исследовать влияние стратегии обработки при сферическом фрезеровании на максимальную высоту шероховатости.

4. Разработать математическую модель позволяющую рассчитать максимальную высоту шероховатости (R_z) согласно ГОСТ Р ИСО 4287-2014 с учетом величины подачи, влияния угла наклона обрабатываемой поверхности, диаметра инструмента и скорости резания.

5. Разработать рекомендации по обеспечению требуемых параметров качества при фрезеровании пространственно-сложных поверхностей, на основе полученной математической модели.

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием основных положений теории формообразования, технологии машиностроения, теории резания материалов, системного анализа, методов статистического анализа, методов геометрического моделирования.

Достоверность результатов. Достоверность подтверждена результатами моделирования и расчетов на основе данных, полученных в процессе исследования на современном технологическом оборудовании, а также удовлетворительной сходимостью параметров экспериментально полученных результатов и результатов моделирования. В работе приведен достаточный, согласно статистическим методам, объем экспериментальных данных.

Научная новизна:

1. Впервые получены корреляционные зависимости параметров шероховатости (R_a , R_z , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v , R_{sm} , R_{ku} , R_{sk}) от технологических режимов и способов фрезерования. Применение полученных зависимостей позволяет обосновано назначить способ фрезерования и режимы обработки в зависимости от эксплуатационного свойства поверхности.

2. Разработана методика обработки пространственно-сложных поверхностей, обеспечивающая получение заданных параметров шероховатости обработанной поверхности по ГОСТ Р ИСО 4287-2014. Предложено и обосновано применение наклона обрабатываемой поверхности на угол до $40...50^\circ$, что позволяет снизить параметры шероховатости R_z , R_a , R_q , R_p , R_c , R_t и R_v в среднем в 1,4 раза.

3. Разработана математическая модель сферического фрезерования, учитывающая данные о технологических параметрах процесса обработки: диаметр и подачу инструмента, угол наклона обрабатываемой поверхности, обеспечивающая равные значения параметров шероховатости в направлениях подачи и бокового шага.

4. Разработана оптимизационная модель для способа чистового сферического фрезерования пространственно-сложных поверхностей на обрабатывающих центрах с ЧПУ, включающая критерий производительности и систему ограничений, позволяющая оценить оптимальные значения режимов резания с учетом требований по обеспечению параметров шероховатости (R_z , R_a , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v) и производительности механической обработки.

Практическая значимость:

1. Разработаны справочные материалы в виде таблиц рекомендуемых подач в зависимости от угла наклона поверхности, обеспечивающие требуемые показатели качества поверхности при окончательном фрезеровании, данные материалы используются при подготовке управляющих программ для обрабатывающих центров с ЧПУ.

2. Разработаны методика и алгоритм, позволяющие определить оптимальные режимы резания, обеспечивающие требуемое качество обработанной поверхности.

3. Разработанная методика обеспечения параметров шероховатости на обрабатывающих центрах с ЧПУ при чистовом фрезеровании пространственно-сложных поверхностей принята к внедрению АО «НПЦ газотурбостроения «Салют» (г. Москва), что подтверждается актом внедрения.

Апробация работы. Научные и практические результаты по различным разделам диссертации докладывались и обсуждались на Международном симпозиуме «Наука. Инновации. Техника и технологии: проблемы, достижения и перспективы», Комсомольск-на-Амуре, 2015 г.; XVI – XX краевом конкурсе-конференции «Молодые ученые – Хабаровскому краю» (Хабаровск, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 гг.); 2014, 2015, 2016, 2017, 2018 гг. в конкурсе – конференции «Молодых ученых и аспирантов ТОГУ».

Публикации. Основные положения диссертации отражены в 15 печатных работах, в том числе 4 в изданиях, рекомендуемых ВАК.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты экспериментального и численного исследования взаимосвязи параметров шероховатости согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014 при фрезеровании сложнопрофильных деталей, на основании которых определены корреляционные зависимости, для различных способов фрезерования. Результаты экспериментальных исследований, направленные на подтверждение адекватности установленных корреляционных зависимостей параметров шероховатости и технологических параметров обработки.

2. Математическая модель сферического фрезерования, учитывающая данные о технологических параметрах процесса обработки: диаметр и подачу инструмента, угол наклона обрабатываемой поверхности, обеспечивающая равные значения параметров шероховатости в направлениях подачи и бокового шага.

3. Оптимизационная модель для способа чистового сферического фрезерования пространственно-сложных поверхностей на обрабатывающих центрах с

ЧПУ, включающая критерий производительности и систему ограничений, позволяющая определить оптимальные значения режимов резания с учетом требований по обеспечению параметров шероховатости (R_z , R_a , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v) и производительности механической обработки.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 147 страницах машинописного текста, содержит 24 таблицы, 61 рисунок, список литературы из 105 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована ее цель, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрено современное состояние исследований в области обработки сложнопрофильных деталей на обрабатывающих центрах с ЧПУ.

Большой вклад в изучение вопросов в области обработки резанием и влияния технологических параметров на качество изделий внесли: Ю. Г. Кабалдин, А. М. Шпилев, В. М. Давыдов, Э. В. Рыжов, В. И. Аверченков, С. В. Биленко, А. В. Выбойщик, А. М. Марков, В. А. Батуев, Ф. С. Сабиров, А. Г. Суслов, М. М. Аршанский, Д. А. Малышкин, И. А. Дружинский, Б. Б. Пономарев, А. Е. Пашков, А. В. Савилов, П. А. Саблин и др.

Анализ имеющихся работ показал:

– для деталей имеющих пространственно-сложную форму, характерны предъявляемые высокие требования к точности (6-8 квалитеты) и шероховатости ($R_a < 0,63$ мкм)

– основными факторами лимитирующими производительность являются шероховатость 30...35% и точность 14...42% обработанной поверхности, однако рекомендации по назначению режимов резания для обеспечения параметров шероховатости согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014 в исследованиях не приводятся.

– существующие зависимости влияния подачи на величину параметров шероховатости не позволяют охарактеризовать получившейся микрорельеф поверхности после механической обработки согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014, следствием этого необходимо разработать критерии выбора режимов резания для обеспечения требуемых параметров шероховатости.

– проводя анализ стратегий применяемых в САМ-системах установлено, что выбор оптимального режущего инструмента и технологических параметров, таких как: величина подачи, скорость резания, шаг смещения за проход, учитываются на основании личного опыта технолога-программиста или оператора технологического оборудования, т.к. современные справочные данные по

механообработки не позволяют определить требования к триботехническим свойствам поверхности.

На основании этих выводов сформулирована цель и задачи исследования.

Во второй главе рассмотрены вопросы о методическом обеспечении теоретических и экспериментальных исследований обработки сложнопрофильных деталей. Экспериментальные исследования проводились на технологическом оборудовании DMG DMU 50 ecoline с ЧПУ, DMC 635V ecoline с ЧПУ и системой управления Heidenhain TNC 620. Измерение параметров микрорельефа проводилось при помощи профилометра SURFCOM 1800D.

В качестве материалов экспериментальных образцов использовались – АМг6 (НВ 63) и сталь 20 (НВ 163) после отжига. Используемые режущие инструменты характеризуются рядом параметров, определяемых стандартом ISO 13399.

Разработана классификация сложнопрофильных деталей, для формирования исходных данных с целью повышения эффективности принятия конструкторско-технологических решений, при помощи кластерного анализа с использованием Евклидовой нормы. Установлено, что применение разработанной классификации позволяет обосновано назначить технологию механической обработки фрезерованием для выделенных групп изделий. Для каждой группы определены геометрическая форма, предъявляемые требования по точности и шероховатости поверхностей деталей.

Разработаны усовершенствованные зависимости шага смещения и подачи на зуб для среднего угла наклона обрабатываемой поверхности, на основании анализа формирования максимальной высоты шероховатости Rz для наклонных плоских, выпуклых и вогнутых участков. Максимальная шероховатость профиля Rmax рассчитывается как:

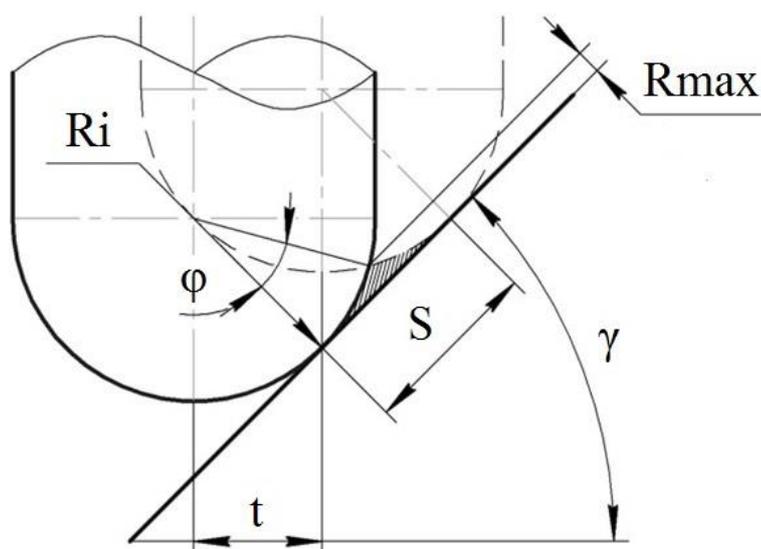


Рис. 1. Формирование максимальной шероховатости на плоском участке

$$R_{max} = R - \sqrt{R^2 - (t/2 \cdot \cos \gamma)^2};$$

При формировании микрорельефа на плоском участке поверхности зависимость подачи от шага смещения определяется как:

$$S_z = \frac{t}{\cos \gamma};$$

где t – шаг смещения за проход, мм; Sz – подача на зуб, мм/зуб. R – радиус инструмента, мм; γ – угол наклона обрабатываемой поверхности к горизонтальной плоскости, град.

При формировании микрорельефа на выпуклом криволинейном участке поверхности:

$$R_{\max} = \left[(p+R) \cos \frac{\alpha}{2} \pm \sqrt{(p+R)^2 \left(\cos^2 \frac{\alpha}{2} - 1 \right) + R^2} \right] - p;$$

где α – угловой шаг, град; p – радиус кривизны, мм.

На выпуклом участке поверхности зависимость подачи от шага смещения рассчитывается по формуле:

$$S_z = 2p \cdot \beta;$$

где β – половина углового шага, измеренная в радианах: $\beta = \alpha \frac{\pi}{360}$;

При формировании микрорельефа на вогнутом участке поверхности:

$$R_{\max} = p - \left\{ (p-R) \cos \left[\arcsin \frac{S}{2(p-R)} \right] + \sqrt{(p-R)^2 \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(2 \arcsin \frac{S}{2(p-R)} \right) \right]} - p(p-2R^2) \right\};$$

На вогнутом участке поверхности зависимость подачи от шага смещения рассчитывается по формуле:

$$S_z = 2p \cdot \alpha;$$

где угловой шаг: $\alpha = \arcsin \frac{t}{2p}$;

Применение полученных зависимостей позволяют обоснованно установить подачу на зуб и шаг смещения в зависимости от угла наклона для обеспечения требуемого параметра максимальной шероховатости поверхности $R_z(\max)$.

На следующем этапе работы рассмотрена взаимосвязь влияния параметров шероховатости, согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014, на функциональные свойства поверхности. Установлено, что наиболее значимыми с точки зрения функционального назначения являются следующие параметры: R_a , R_z , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v , R_{ku} , R_{sk} , R_{sm} . Используя данный «набор» параметров профиль поверхности описывается не только высотными характеристиками поверхности, но и функциональными свойствами, т.к. форма микрорельефа служит фактором обоснованного выбора способа фрезерования.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям цель которых – изучение влияния технологических параметров, на качество поверхности с учетом ГОСТ Р ИСО 4287-2014, получаемой после механической обработки фрезерованием.

На данном этапе работы для способов обработки фрезерованием поставлена задача провести кластерный анализ серии значений параметров шероховатости по ГОСТ Р ИСО 4287-2014, установления их корреляционной взаимосвязи исходя из диапазона рекомендуемых подач и скоростей резания.

	Rp	Rv	Rz	Rc	Rt	Ra	Rq	Rsk	Rku	Rsm
Rp	1,00	0,49	0,80	0,89	0,55	1,00	0,98	0,09	0,01	1,00
Rv	0,49	1,00	0,92	0,84	1,00	0,52	0,66	-0,83	0,88	0,41
Rz	0,80	0,92	1,00	0,99	0,94	0,82	0,90	-0,53	0,61	0,74
Rc	0,89	0,84	0,99	1,00	0,87	0,90	0,96	-0,38	0,47	0,84
Rt	0,55	1,00	0,94	0,87	1,00	0,58	0,71	-0,78	0,84	0,47
Ra	1,00	0,52	0,82	0,90	0,58	1,00	0,99	0,05	0,05	0,99
Rq	0,98	0,66	0,90	0,96	0,71	0,99	1,00	-0,12	0,21	0,96
Rsk	0,09	-0,83	-0,53	-0,38	-0,78	0,05	-0,12	1,00	-1,00	0,18
Rku	0,01	0,88	0,61	0,47	0,84	0,05	0,21	-1,00	1,00	-0,08
Rsm	1,00	0,41	0,74	0,84	0,47	0,99	0,96	0,18	-0,08	1,00

Рис. 2. Корреляционные зависимости параметров шероховатости, при торцевом фрезеровании

Анализируя экспериментальные данные установлено, что достаточно провести исследование после торцевого фрезерования одного или нескольких параметров шероховатости, входящих в одну группу, и полученными рекомендациями можно охарактеризовать остальные параметры шероховатости этой группы. В пользу этого свидетельствует малое значение погрешности (не более 7%) сравнительного анализа теоретических и практически полученных зависимостей групп параметров шероховатости (Ra, Rz, Rt, Rq, Rp, Rc, Rv, Rsm) при торцевом фрезеровании.

При исследовании корреляционной (рис. 2) взаимосвязи параметров шероховатости при торцевом фрезеровании получены следующие зависимости: $R_p=3,48 \cdot R_a$; $R_{sm}=765,8 \cdot R_a$; $R_v=-0,09+0,46 \cdot R_t$; $R_q=1,2 \cdot R_a$; $R_c=-0,12+0,71 \cdot R_z$; $R_z=0,1+6,85 \cdot R_a$; $R_t=0,2+1,06 \cdot R_z$.

В свою очередь параметры, которые имеют слабую корреляционную связь (Rku, Rsk) рекомендуется контролировать отдельно от других групп.

При исследовании корреляционной (рис. 3) взаимосвязи параметров шероховатости после обработки концевой фрезой торцом получены следующие зависимости: $R_{ku}=0,02 \cdot R_{sm}$; $R_{sm}=54,7 \cdot R_c$; $R_z=0,2+4,8 \cdot R_q$; $R_q=0,03+1,3 \cdot R_a$; $R_p=0,3+0,68 \cdot R_{ku}$; $R_v=-0,7+0,61 \cdot R_z$; $R_c=0,6+0,61 \cdot R_z$; $R_t=0,6+1,17 \cdot R_z$.

Анализируя экспериментальные данные при обработке концевой фрезой торцом установлено, что представленные формулы являются адекватными для расчета параметров шероховатости по ГОСТ Р ИСО 4287-2014, о чем свидетельствует малое значение погрешности теоретически и практически установленных значений (не более 6%) для параметров Ra, Rz, Rt, Rq, Rp, Rc, Rv, Rsm. В свою очередь имеются параметры со слабой корреляционной связью – Rku и Rsk, указанные параметры рекомендуется контролировать отдельно от других групп

При исследовании корреляционной (рис. 4) взаимосвязи параметров шероховатости после обработки концевой фрезой боком получены следующие зависимости: $R_p=3,11 \cdot R_a$; $R_c=0,05+3,33 \cdot R_a$; $R_t=-0,2+1,3 \cdot R_z$;

$$\mathbf{Rz} = -0,1 + 5,65 \cdot \mathbf{Ra}; \quad \mathbf{Rq} = 1,26 \cdot \mathbf{Ra}; \quad \mathbf{Rv} = -0,1 + 0,45 \cdot \mathbf{Rz}; \quad \mathbf{Rku} = 5,2 \cdot \mathbf{Rsk};$$

$$\mathbf{Rsm} = 86 + 603,25 \cdot \mathbf{Ra}.$$

	Rp	Rv	Rz	Rc	Rt	Ra	Rq	Rsk	Rku	Rsm
Rp	1,00	0,55	0,61	0,88	0,80	-0,07	0,32	-0,51	0,99	0,92
Rv	0,55	1,00	1,00	0,88	0,94	0,80	0,97	-1,00	0,42	0,83
Rz	0,61	1,00	1,00	0,92	0,96	0,75	0,94	-0,99	0,49	0,88
Rc	0,88	0,88	0,92	1,00	0,99	0,42	0,73	-0,86	0,80	1,00
Rt	0,80	0,94	0,96	0,99	1,00	0,55	0,82	-0,92	0,71	0,97
Ra	-0,07	0,80	0,75	0,42	0,55	1,00	0,93	-0,82	-0,21	0,33
Rq	0,32	0,97	0,94	0,73	0,82	0,93	1,00	-0,98	0,18	0,67
Rsk	-0,51	-1,00	-0,99	-0,86	-0,92	-0,82	-0,98	1,00	-0,38	-0,81
Rku	0,99	0,42	0,49	0,80	0,71	-0,21	0,18	-0,38	1,00	0,85
Rsm	0,92	0,83	0,88	1,00	0,97	0,33	0,67	-0,81	0,85	1,00

Рис. 3. Корреляционные зависимости параметров шероховатости при обработке концевой фрезой торцом

	Rp	Rv	Rz	Rc	Rt	Ra	Rq	Rsk	Rku	Rsm
Rp	1,00	0,76	0,97	0,98	0,86	0,98	0,99	0,45	-0,32	0,99
Rv	0,76	1,00	0,90	0,79	0,97	0,74	0,77	-0,08	0,05	0,73
Rz	0,97	0,90	1,00	0,96	0,95	0,95	0,96	0,27	-0,20	0,95
Rc	0,98	0,79	0,96	1,00	0,88	0,99	0,99	0,39	-0,38	0,99
Rt	0,86	0,97	0,95	0,88	1,00	0,85	0,87	0,14	-0,15	0,85
Ra	0,98	0,74	0,95	0,99	0,85	1,00	1,00	0,43	-0,45	0,99
Rq	0,99	0,77	0,96	0,99	0,87	1,00	1,00	0,41	-0,40	0,99
Rsk	0,45	-0,08	0,27	0,39	0,14	0,43	0,41	1,00	-0,71	0,51
Rku	-0,32	0,05	-0,20	-0,38	-0,15	-0,45	-0,40	-0,71	1,00	-0,46
Rsm	0,99	0,73	0,95	0,99	0,85	0,99	0,99	0,51	-0,46	1,00

Рис. 4. Корреляционные зависимости параметров шероховатости при обработке концевой фрезой боком

Анализируя экспериментальные данные при обработке концевой фрезой боком установлено, что представленные формулы являются адекватными для расчета параметров шероховатости по ГОСТ Р ИСО 4287-2014, о чем свидетельствует малое значение погрешности теоретически и практически установленных зависимостей (не более 8%) для параметров Ra, Rz, Rt, Rq, Rp, Rc, Rv, Rsm. В свою очередь имеются параметры со слабой корреляционной связью – Rku и Rsk, указанные параметры рекомендуется контролировать отдельно от других групп.

На следующем этапе исследований выполнен эксперимент с целью установления взаимосвязи диаметра инструмента и величины подачи на шероховатость обработанной поверхности при фрезеровании сферическим инструментом. Выходным параметром, для установления максимальной высоты профиля обрабатываемой поверхности, выбран параметр шероховатости – Rz (ГОСТ Р ИСО 4287-2014).

В качестве экспериментальных образцов были использованы заготовки из материалов: АМг6 и Сталь 20. Эксперименты проводились на пятикоординатном фрезерном обрабатывающем центре с ЧПУ.

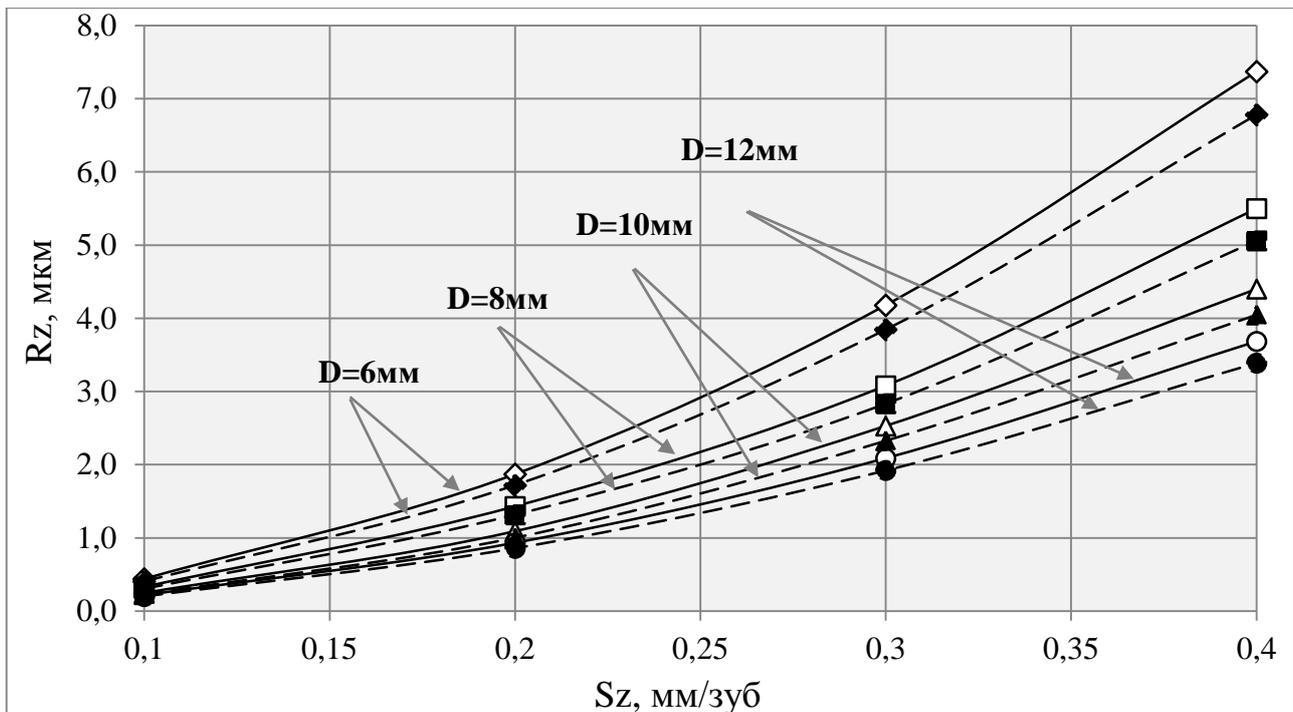


Рис. 5. Влияние подачи и материала обрабатываемой поверхности на параметр шероховатости Rz при фрезеровании: —○— АМГ6; ---●--- Сталь 20; V=50 м/мин

Результатом проведенного исследования служит следующее. Влияние подачи на величину шероховатости Rz зависит от диаметра инструмента (рис. 5). С увеличением подачи от 0,1 мм/зуб до 0,4 мм/зуб величина Rz возрастает при:

- D=6 мм от 0,405-0,440 мкм до 6,780-7,370 мкм;
- D=8 мм от 0,304-0,330 мкм до 5,060-5,500 мкм;
- D=10 мм от 0,228-0,248 мкм до 4,048-4,401 мкм;
- D=12 мм от 0,202-0,220 мкм до 3,390 до 3,685 мкм; в зависимости от обрабатываемого материала.

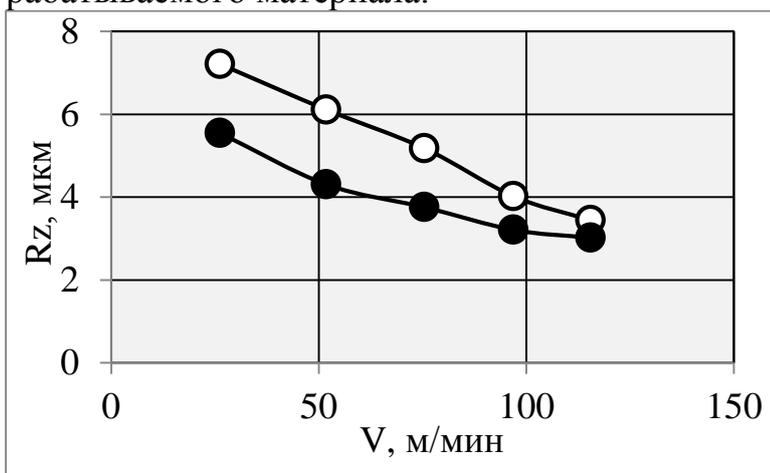


Рис. 6. Влияние скорости резания V, м/мин на шероховатость поверхности при фрезеровании: —○— АМГ6, ---●--- сталь 20

Цель следующего этапа – выявление зависимости величины шероховатости обработанной поверхности Rz, мкм от скорости резания V, м/мин. Из представленных данных (рис. 6) установлено, что с увеличением скорости фрезерования наблюдается уменьшение величины Rz как для АМГ6, так и для стали 20. Причем при фрезеровании стали 20 увеличение скорости до V = 90 м/мин и выше

практически не оказывает влияние на величину шероховатости по параметру R_z , и остается на уровне $R_z \approx 3,0$ мкм. При фрезеровании АМгб аналогичная картина наблюдается, начиная с $V = 110$ м/мин ($R_z \approx 3,5$ мкм).

Следующим этапом исследования служит фрезерование сферическим инструментом, с целью получения количественных зависимостей параметров шероховатости от режимов обработки.

Таблица 1

Параметры шероховатости в зависимости от угла обработки при фрезеровании сферическим инструментом

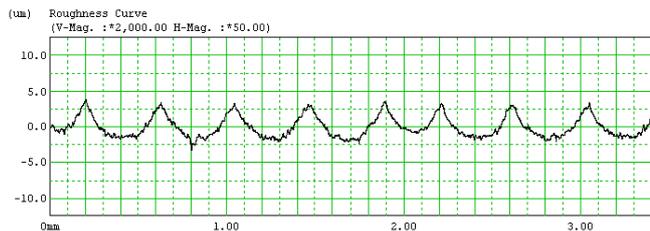
Средние измеренные параметры шероховатости	Угол наклона обрабатываемой поверхности γ , град							
	10	20	30	40	50	60	70	80
R_a , мкм	1,696	1,424	1,327	1,193	1,206	1,201	1,353	1,333
R_z , мкм	6,945	5,724	5,491	4,901	5,151	5,190	5,635	5,787
R_t , мкм	7,493	6,507	6,107	5,280	5,607	5,657	5,943	6,240
R_q , мкм	1,965	1,651	1,553	1,395	1,410	1,420	1,592	1,603
R_p , мкм	4,492	3,533	3,429	3,145	3,232	3,229	3,755	3,415
R_c , мкм	6,446	4,954	4,848	4,602	4,508	4,638	5,260	4,939
R_v , мкм	2,453	2,191	1,863	1,756	1,919	1,961	1,879	2,372
R_{sm} , мкм	406,5	391,1	406,4	412,9	408,1	386,0	370,0	388,6
R_{ku}	2,150	2,048	2,245	2,183	2,164	2,155	2,357	2,049
R_{sk}	0,598	0,525	0,679	0,622	0,548	0,497	0,783	0,197

Поскольку исследуются новые зависимости параметров шероховатости, то при проведении эксперимента учитываются такие факторы, которые предположительно имеют значимое влияние на формирование микрорельефа поверхности получаемого сферическим концевым инструментом: угол наклона обрабатываемой поверхности, эффективный диаметр инструмента и подача инструмента.

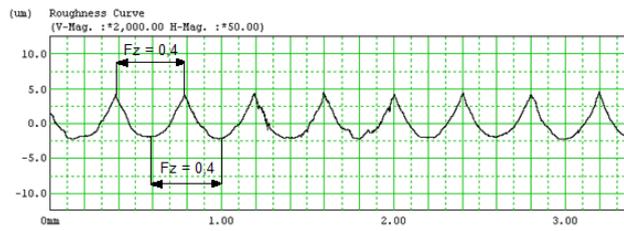
Результаты экспериментальных данных (табл. 1) показывающих изменение параметров шероховатости от угла наклона обрабатываемой поверхности позволяют заключить следующее. Значения параметров шероховатости обладают тенденцией к снижению при увеличении угла наклона от 10° до 50° . Однако с увеличением угла обработки от 50° до 80° происходит увеличение значений высотных параметров до величины на 10-20% выше минимальных.

Анализ профилограмм (рис. 7-9) после проведенного эксперимента указанного выше позволяет сделать заключение, что микрорельеф поверхности после обработки фрезеровании сферическим инструментом имеет регулярный профиль, при этом шероховатость инструмента практически не оказывает влияния на шероховатость получаемой поверхности, так как является незначительной, а некоторое проявление наблюдается лишь в направлении бокового шага. Об этом свидетельствуют представленные профилограммы на рисунках 7-9, где расстояние между сегментами профиля (впадин и выступов) равны заданной

подачи $Fz = 0,4$ мм/зуб. В дальнейшем представленные на рисунках 8-9 измеренные профили будем считать регулярными, а определяющим фактором, влияющим при определении максимальной шероховатости – боковой шаг инструмента.

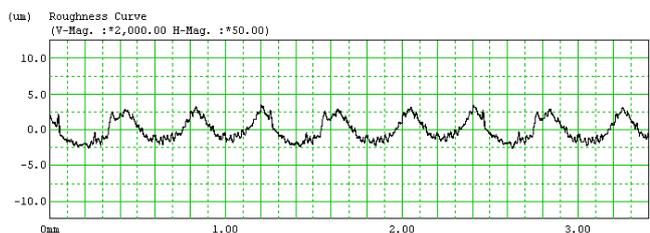


а) Измерение в направлении бокового шага

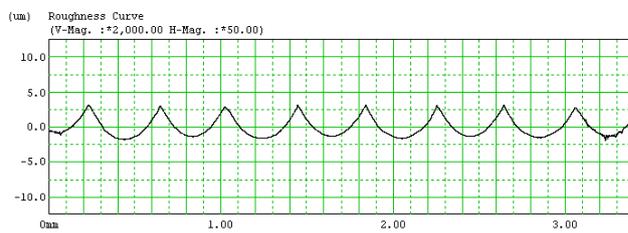


б) Измерение в направлении подачи инструмента

Рис. 7. Профилограммы обработанных поверхностей фрезерованием под углом наклона 10°

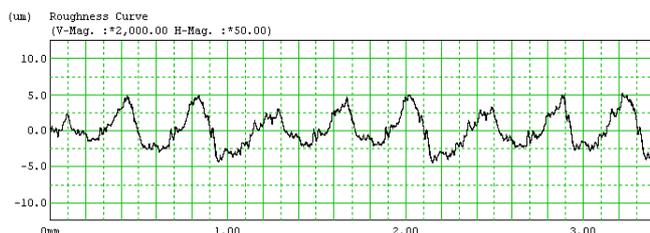


а) Измерение в направлении бокового шага

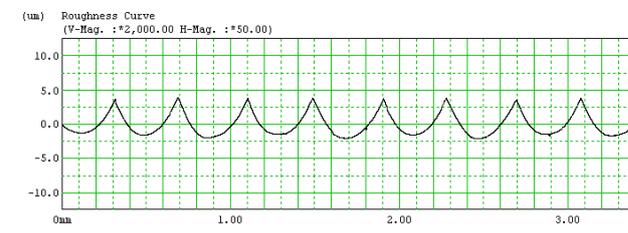


б) Измерение в направлении подачи инструмента

Рис. 8. Профилограммы обработанных поверхностей фрезерованием под углом наклона 40°



а) Измерение в направлении бокового шага

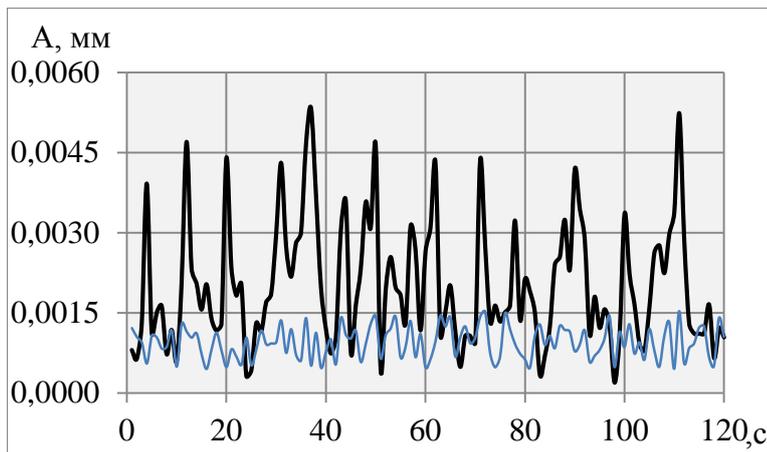


б) Измерение в направлении подачи инструмента

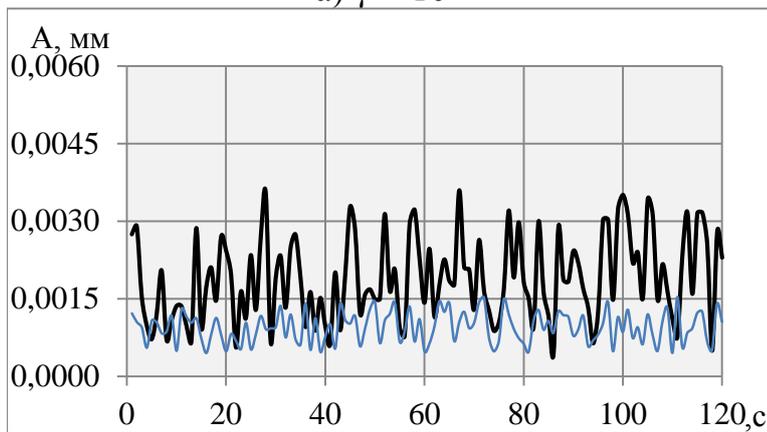
Рис. 9. Профилограммы обработанных поверхностей фрезерованием под углом наклона 70°

Анализ данных представленных на рисунках 7-9 показывает, что на микрорельеф поверхности основное влияние оказывает кинематика формообразования и геометрия режущего инструмента.

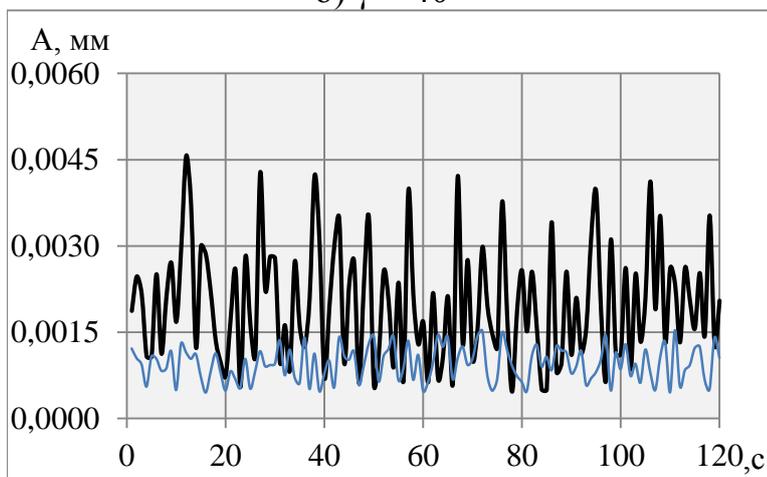
На рисунке 9 представлена профилограмма поверхности полученная после обработки резанием под углом наклона 70° . Из представленных данных видно, что в направлении бокового шага шероховатость поверхности будет являться определяющей. Данный факт связан с упругими отжатыми инструмента, особенно явно проявляющимися при увеличении угла более 50° , что подтверждается на рисунке 9а.



а) $\gamma = 10^\circ$



б) $\gamma = 40^\circ$



в) $\gamma = 70^\circ$

Рис. 10. Амплитуды колебаний в зависимости от угла наклона поверхности γ

При дальнейшем увеличении угла наклона происходит увеличение амплитуды, что в свою очередь связано с упругими отжатыми режущего инструмента. Вышеуказанные факты подтверждают ранее выдвигаемую гипотезу.

Таким образом, анализ экспериментальных данных сведенных в таблице 1, позволяет сделать вывод о том, что распределение параметров R_a , R_z , R_t , R_q ,

При фрезеровании на снижение качества обрабатываемой поверхности основное влияние оказывает вибрация, следствием упругих отжатых инструмента. Для подтверждения выдвигаемой гипотезы, что при углах наклона более 50° , для способа фрезерования сферическим инструментом, на снижение качества получаемого микрорельефа основное влияние оказывает вибрация, проведен эксперимент.

Целью эксперимента являлось исследование влияния вибрации при фрезеровании на качество обработанной поверхности.

Механообработка проводилась в течение 120 секунд, на образцах изготовленных из материала АМгб. Скорость резания V варьировалась от угла наклона γ , значение которого были приняты равными $\gamma = 10^\circ$, 40° и 70° . В качестве выходной оценки эффективности обработки использовалась амплитуда, изменяющаяся с течением времени.

Исходя из полученных экспериментальных данных (рис. 10) можно установить, что уменьшение амплитуды вибраций происходит с увеличением угла наклона от 10° до $40^\circ \dots 50^\circ$.

Rp, Rc и Rv имеет практически одинаковый характер. Значения данных параметров обладают тенденцией к снижению при увеличении угла наклона, при этом минимальные значения соответствуют значениям угла от 10° до 40°...50°. Этот эффект можно объяснить изменением скорости резания вследствие изменения величины эффективного диаметра. Однако с увеличением угла обработки от 50° до 80° происходит увеличение значений высотных параметров до величины на 10-20% выше минимальных. Снижение качества обработанной поверхности, в данном случае, происходит ввиду эффектов отжата режущего инструмента и возрастания амплитуды колебаний технологической системы при фрезеровании.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что диапазоны рациональных значений угла обработки составляют от 10° до 50°.

	Ra	Rz	Rq	Rp	Rc	Rt	Rv	Rku	Rsk	Rsm
Ra	1,00	0,91	0,99	0,94	0,91	0,86	0,74	-0,28	-0,13	0,18
Rz	0,91	1,00	0,92	0,93	0,84	0,98	0,92	-0,14	-0,30	-0,03
Rq	0,99	0,92	1,00	0,95	0,91	0,88	0,76	-0,24	-0,15	0,15
Rp	0,94	0,93	0,95	1,00	0,86	0,89	0,72	0,01	-0,03	0,06
Rc	0,91	0,84	0,91	0,86	1,00	0,78	0,69	-0,20	-0,04	0,34
Rt	0,86	0,98	0,88	0,89	0,78	1,00	0,93	-0,11	-0,29	-0,10
Rv	0,74	0,92	0,76	0,72	0,69	0,93	1,00	-0,28	-0,53	-0,13
Rku	-0,28	-0,14	-0,24	0,01	-0,20	-0,11	-0,28	1,00	0,58	-0,24
Rsk	-0,13	-0,30	-0,15	-0,03	-0,04	-0,29	-0,53	0,58	1,00	0,22
Rsm	0,18	-0,03	0,15	0,06	0,34	-0,10	-0,13	-0,24	0,22	1,00

Рис. 11. Корреляционные зависимости параметров шероховатости при обработке сферической фрезой

При исследовании корреляционной (рис.11) взаимосвязи параметров шероховатости после обработки сферической концевой фрезой получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned} \mathbf{Rz} &= 0,391 + 4,022 \cdot \mathbf{Ra}; \\ \mathbf{Rt} &= 0,284 + 4,531 \cdot \mathbf{Ra}; \\ \mathbf{Rv} &= -0,531 + 0,403 \cdot \mathbf{Rt}. \\ \mathbf{Rq} &= 0,039 + 1,145 \cdot \mathbf{Ra}; \\ \mathbf{Rp} &= 0,499 + 2,274 \cdot \mathbf{Ra}; \\ \mathbf{Rc} &= 0,165 + 3,630 \cdot \mathbf{Ra}; \end{aligned}$$

Таким образом, впервые получены новые зависимости между параметрами шероховатости согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 4287-2014 для каждого способа механической обработки фрезерованием.

Полученные зависимости могут использоваться технологом-программистом или оператором технологического оборудования для оценки параметров шероховатости обрабатываемой поверхности описывающих функциональные свойства поверхности, на этапе подготовки управляющей программы. Для полученных зависимостей погрешность расчета не превышает 10%.

Из графиков теоретической и экспериментальной зависимости параметров шероховатости от угла наклона обрабатываемой поверхности показанных на рисунках 12-14 установлено, что форма кривой экспериментальной зависимости отличается от теоретически рассчитанной по полученным формулам указанным выше не более чем на 10%.

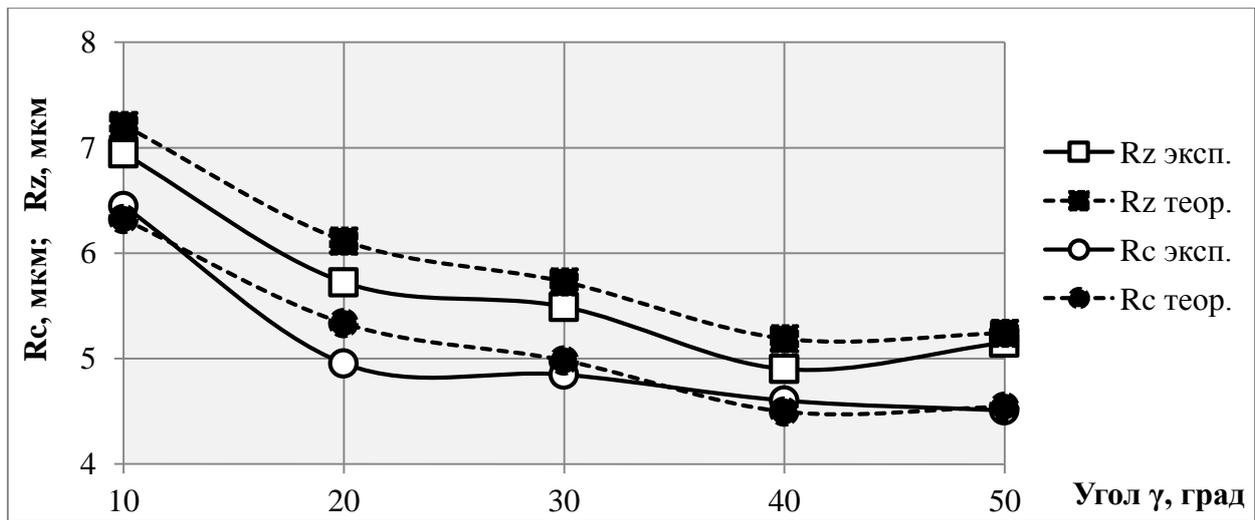


Рис. 12. Теоретическая и экспериментальная зависимости шероховатости R_z и R_c от угла наклона обрабатываемой поверхности

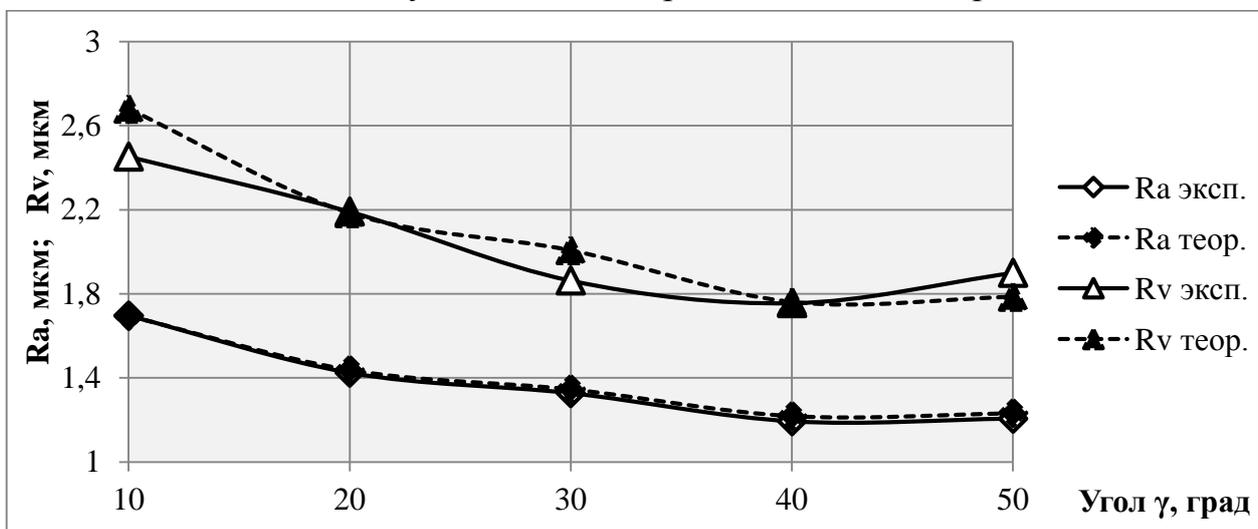


Рис. 13. Теоретическая и экспериментальная зависимости шероховатости R_a и R_v от угла наклона обрабатываемой поверхности

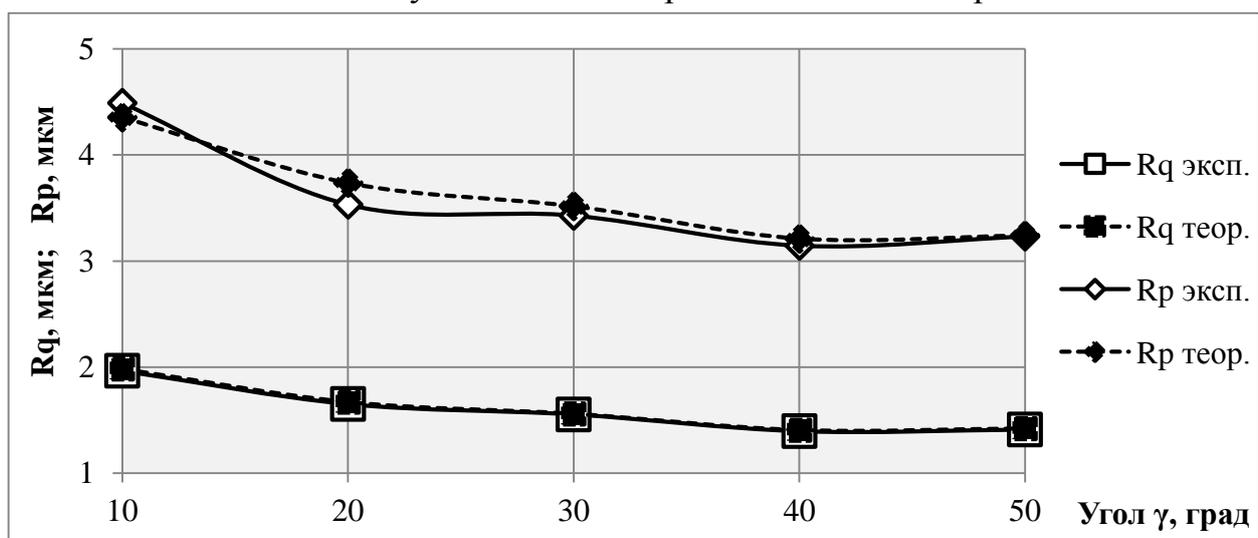
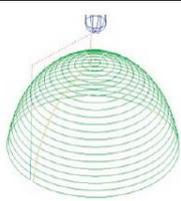
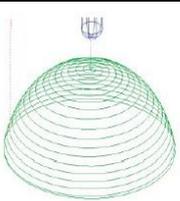
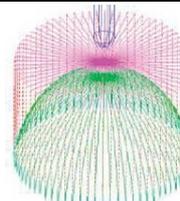
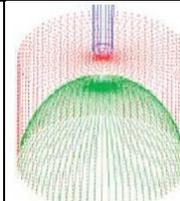
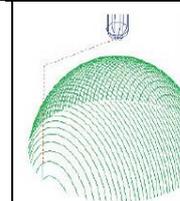
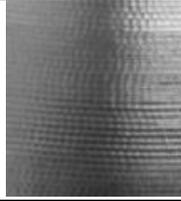
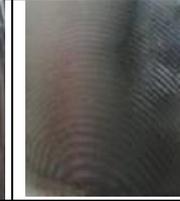


Рис. 14. Теоретическая и экспериментальная зависимости шероховатости R_q и R_p от угла наклона обрабатываемой поверхности

Для определения влияния стратегии обработки на характер формирования микронеровностей профиля проведены эксперименты, в ходе которых измерялись значения параметров шероховатости Ra и Rz при обработке с одинаковым значением шага смещения инструмента за проход и различными траекториями. Исходные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2

Стратегии обработки при сферическом фрезеровании

№	1	2	3	4	5
Траектория					
Название стратегии	3D-смещение	Обработка по спирали	Обработка в радиальном направлении снизу вверх	Обработка в радиальном направлении сверху вниз	Зиг-заг
Шаг смещения	0,4 мм	0,4 мм	1,5°	1,5°	0,4 мм
Поверхность					
Ra, мкм	0,998	0,847	0,678	4,752	1,882
Rz, мкм	5,887	5,417	3,868	20,570	8,786

Результаты данного эксперимента указывают, что на шероховатость поверхности влияет не только подача на зуб, но и траектория движения инструмента. Для 3 и 4 стратегии обработки необходимо учитывать различия направления движения при формировании микрорельефа.

В зависимости от стратегии обработки были получены значения параметров микрорельефа. Таким образом, наименьшие параметры шероховатости поверхностей при окончательной обработке сферическим инструментом получаются при обработке в радиальном направлении снизу вверх.

Проведенные эксперименты позволяют сделать вывод, что уменьшение параметров шероховатости поверхности при использовании стратегии при обработке в радиальном направлении снизу вверх характерно и для вогнутых поверхностей.

Для представленных стратегий обработки сферической поверхности произведена оценка времени в САМ системе.

По графику, представленному на рисунке 15, можно заключить, что стратегии обработки 3 и 4 являются самыми продолжительными (стратегия 3 на 80% и стратегия 4 на 70% дольше, чем стратегия 2), увеличение времени в данном случае связано с большим количеством холостых ходов.

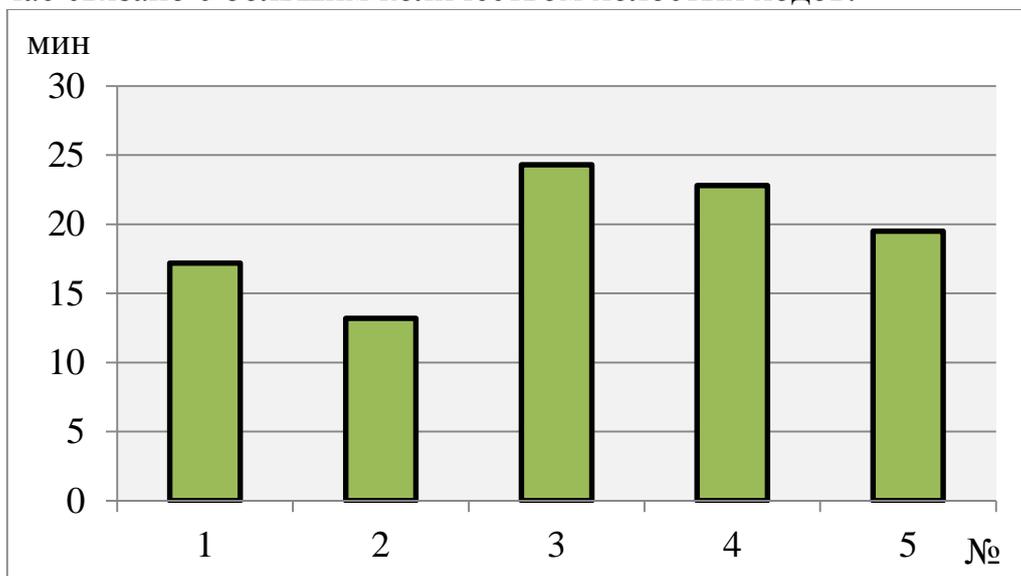


Рис. 15. Оценка времени обработки в САМ среде для различных стратегий обработки при методе сферического фрезерования

Следовательно, при назначении стратегии, необходимо руководствоваться не только получаемыми параметрами качества поверхности, но и продолжительностью обработки.

В четвертой главе приводится анализ взаимосвязи величины шероховатости поверхности с режимами механической обработки. Целью раздела является получение эмпирической модели, позволяющей оценить влияние режимов резания и угла обрабатываемой поверхности на величину шероховатости Rz (max), при помощи регрессионного анализа.

Результатом проведенного регрессионного анализа является эмпирическое уравнение, характеризующее взаимосвязь между величиной шероховатости и выбранными факторами, выраженное нормализованной моделью для:

$$\text{—АМг6: } Rz=3+2,77S_z-0,55\alpha-1,08D-0,51S_{z\alpha}-1S_{zD}+0,22\alpha D+0,2S_{z\alpha D};$$

При доверительной вероятности $P = 0,95$ расчетное значение критерия Фишера $F_{расч} = 8$, а табличное – $F_{табл} = 9,28$, следовательно, выполняется условие $F_{расч} < F_{табл}$, что позволяет сделать заключение об адекватности регрессионной модели.

$$\text{—стали 20: } Rz=2,16+1,99S_z-0,40\alpha-0,78D-0,37S_{z\alpha}-0,72S_{zD}+0,16\alpha D+0,14S_{z\alpha D};$$

При доверительной вероятности $P = 0,95$ расчетное значение критерия Фишера $F_{расч} = 8,25$, а табличное – $F_{табл} = 9,28$, следовательно, выполняется условие $F_{расч} < F_{табл}$, что позволяет сделать заключение об адекватности регрессионной модели.

Таким образом, разработаны эмпирические уравнения зависимости максимальной шероховатости (Rz) обработанной поверхности сферическим фрезеро-

ванием от величины подачи, диаметра инструмента и угла наклона с учетом обрабатываемого материала. Максимальная относительная погрешность расчета по разработанным зависимостям не превышает 5%.

В соответствии с вышеуказанными задачами сформированы критерии оптимальности для фрезерования пространственно-сложных поверхностей. Выбран наиболее важный критерий оптимальности с перенесением остальных в ограничения, в этом случае система ограничений по производительности будет иметь вид:

– критерий оптимальности по производительности:

$$Q_{пр} = \frac{S_z \cdot \pi \cdot 2 \cdot r \cdot \cos(90^\circ - \alpha) \cdot n}{1000} \Rightarrow \max;$$

– технические ограничения:

$$\begin{cases} S_{z_{\min}} \leq S_z \leq S_{z_{\max}} \\ n_{\min} \leq \frac{1000V}{\pi D_{\phi}} \leq n_{\max} \end{cases}$$

– ограничения по шероховатости (максимальной) пространственно-сложной поверхности (для АМГб):

$$R_z = 3 + 2,77 S_z - 0,55 a - 1,08 D - 0,51 S_z \alpha - 1 S_z D + 0,22 a D + 0,2 S_z \alpha D \Rightarrow \min;$$

Таким образом, разработаны зависимости максимальной шероховатости (Rz) обработанной поверхности сферическим фрезерованием от величины подачи, диаметра инструмента и угла наклона с учетом обрабатываемого материала. Максимальная относительная погрешность расчета по разработанным зависимостям не превышает 5%.

Разработан алгоритм расчета рекомендуемой подачи на зуб, рекомендуемого угла наклона обрабатываемой поверхности, скорости резания и параметров шероховатости Rz, Ra, Rq, Rp, Rc, Rt, Rv на основе параметрической оптимизации технологических решений.

Разработана оптимизационная модель способа чистового сферического фрезерования сложнопрофильных деталей позволяющая оценить оптимальные значения режимов резания с учетом требований по обеспечению параметров шероховатости (Rz, Ra, Rq, Rp, Rc, Rt, Rv) и производительности механической обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов исследований выполненных в работе, формулируются следующие выводы:

1. Впервые получены новые корреляционные зависимости между параметрами шероховатости согласно стандарта ГОСТ Р ИСО 4287-2014 для каждого из описанных способов механической обработки фрезерованием. Для полученных зависимостей погрешность расчета не превышает 10%. Применение полученных зависимостей позволяет технологу-программисту или оператору техно-

логического оборудования в зависимости от способа фрезерования рассчитать количественные значения параметров шероховатости обрабатываемой поверхности, описывающие функциональные свойства поверхности, на этапе подготовки управляющей программы.

2. Предложено и обосновано применение наклона обрабатываемой поверхности к горизонтальной плоскости, при фрезеровании сферическим инструментом, на угол до $40...50^\circ$, что позволяет снизить параметры шероховатости поверхности R_z , R_a , R_q , R_p , R_c , R_t и R_v в среднем в 1,4 раза. Экспериментально подтверждено снижение амплитуды вибрации при фрезеровании сферическим инструментом в 1,3...1,5 раза при использовании наклона обрабатываемой поверхности на угол до $40...50^\circ$.

3. Предложено и обосновано применение стратегии обработки «в радиальном направлении снизу вверх» при фрезеровании сферическим инструментом. Применение указанной стратегии характеризуется наименьшими параметрами микрорельефа (для сферической двухзубой фрезы $D = 6$ мм, $S_z = 0,2$ мм/зуб, $n = 6000$ об/мин, $I_Z = 0,1$ мм) $R_a \approx 0,678$ мкм и $R_z \approx 3,868$ мкм, но данная стратегия на 80% дольше по сравнению со стратегией обработки по спирали: $R_a \approx 0,847$ мкм, $R_z \approx 5,417$ мкм. Экспериментально установлено, что стратегия обработки «в радиальном направлении, сверху вниз» не рекомендуется в качестве окончательной операции при способе сферического фрезерования, так как имеет значительные параметры шероховатости R_a , R_z , R_v , R_p (R_a больше в 7 раз по сравнению со стратегией «в радиальном направлении, снизу вверх»).

4. Разработана методика, включающая выбор стратегии обработки, траектории движения, расчет подачи чистового фрезерования, с учетом угла наклона обрабатываемой поверхности, позволяющая повысить производительность операции чистового фрезерования ПСП в целом до 30% при обеспечении заданных параметров точности и шероховатости по ГОСТ Р ИСО 4287-2014, а время на отладку управляющих программ сократить на 10-15%, что подтверждено актом внедрения.

5. Разработана оптимизационная модель для способа чистового сферического фрезерования пространственно-сложных поверхностей на обрабатывающих центрах с ЧПУ, включающая критерий производительности и систему ограничений, позволяющая оценить оптимальные значения режимов резания с учетом требований по обеспечению параметров шероховатости (R_z , R_a , R_q , R_p , R_c , R_t , R_v) и производительности механической обработки.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикаций в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Гимадеев, М. Р.** Обеспечение качества поверхности при механообработке сложнопрофильных деталей / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // *Технология машиностроения*. – 2018. – №11. – С. 6-9.

2. **Гимадеев, М. Р.** Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Тяжелое машиностроение. – 2018. – №9. – С. 24-29.

3. **Гимадеев, М. Р.** Получение заданных параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании цилиндрических отверстий / М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов, В. А. Стельмаков // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I-1 (25). – С. 66-72.

4. Стельмаков, В. А. Метод оценки точности гладких цилиндрических отверстий по диаметральному размеру и относительному положению их осей / В. А. Стельмаков, **М. Р. Гимадеев**, В. М. Давыдов, А. В. Никитенко // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. - № I-1 (25). – С. 73-81.

Статьи и материалы конференций

5. **Гимадеев, М. Р.** Исследование параметров микрорельефа при фрезеровании на обрабатывающих центрах с ЧПУ / М. Р. Гимадеев // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». Том 9. – 2018. – №2. – С. 61-70.

6. **Гимадеев, М. Р.** Анализ механизма формирования микрорельефа при 5-ти координатной индексной обработке / М. Р. Гимадеев // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XIX краевого конкурса ученых и аспирантов, Хабаровск, 13-20 янв. 2017 г. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2017. – С. 172-176.

7. **Гимадеев, М. Р.** Получение параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании цилиндрических отверстий / М. Р. Гимадеев // Информационные технологии XXI века : сб. науч. труд. / Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. – Хабаровск, 2016. – С.358-364.

8. **Гимадеев, М. Р.** Исследование влияния методов формообразования при фрезеровании поверхности на параметры микрорельефа / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов, А. В. Никитенко, В. А. Стельмаков // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения : материалы Междунар. Науч.-техн. Конф., Комсомольск-на-Амуре, 12-16 мая 2015г. / редкол. : О.Ю. Еренков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2015. – С. 79-80.

9. **Гимадеев, М. Р.** Обеспечение точности деталей на обрабатывающих центрах 3+2 координаты / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Информационные технологии XXI века : сб. науч. тр. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 239-246.

10. **Гимадеев, М. Р.** Обеспечение точности сложнопрофильных деталей на обрабатывающих центрах 3+2 координаты / М. Р. Гимадеев, В. М. Давыдов // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». Том 6. – 2015. – №1. – С. 175-178.

11. **Гимадеев, М. Р.** Исследование влияния методов формообразования при фрезеровании поверхностей на параметры микрорельефа / М. Р. Гимадеев,

В. М. Давыдов // Информационные технологии XXI века : сб. науч. тр. / Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. – Хабаровск, 2015. – С. 417-422.

12. **Гимадеев, М. Р.** Оценка влияния параметров шероховатости на эксплуатационные характеристики гладких цилиндрических отверстий и оптимизация алгоритмов механической обработки / М. Р. Гимадеев // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». Том 6. – 2015. – №4. – С. 429-435.

13. Никитенко, А. В. Исследование влияния точности аппроксимации траектории на производительность обработки сложнопрофильных поверхностей прессформ / А. В. Никитенко, В. М. Давыдов, **М. Р. Гимадеев**, В. А. Стельмаков // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / ФГБОУ ВПО «КнАГТУ». – Комсомольск-на-Амуре, 2015. – С. 177-179.

14. Стельмаков, В. А. Исследование причин возникновения погрешностей формы при обработке отверстий фрезерованием / В. А. Стельмаков, В. М. Давыдов, **М. Р. Гимадеев**, А. В. Никитенко // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. / ФГБОУ ВПО «КнАГТУ». – Комсомольск-на-Амуре, 2015. – С. 257-259.

15. Паночевный, П. Н. Образование шероховатости поверхности при лезвийной обработке / П. Н. Паночевный, **М. Р. Гимадеев**, В. А. Стельмаков, А. В. Пшеничный // Сборник научных статей 3-й международной молодежной научной конференции «Поколение будущего: Взгляд молодых ученых». – Курск, 2014. – С. 358-362.

Подписано в печать 11.11.18. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз. Заказ
Отдел оперативной полиграфии издательства Тихоокеанского государственного университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.