

На правах рукописи



СТЕШКИН Артем Вячеславович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ КАНАЛОВ НЕКРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ
В МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ ДЕТАЛЯХ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ
ОБРАБОТКЕ**

**Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения
(технические науки)**

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ПЕНЗА 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет».

Научный руководитель — доктор технических наук, доцент
Зверовщиков Александр Евгеньевич

Официальные оппоненты: **Тамаркин Михаил Аркадьевич,**
доктор технических наук, профессор,
Донской государственный технический
университет (г. Ростов-на-Дону),
заведующий кафедрой «Технология
машиностроения»;

Чигиринский Юлий Львович,
доктор технических наук, профессор,
Волгоградский государственный
технический университет (г. Волгоград),
заведующий кафедрой «Технология
машиностроения»

Ведущая организация: Пермский национальный исследовательский
политехнический университет (г. Пермь)

Защита диссертации состоится «__» _____ 2022 г., в ____ часов, на заседании диссертационного совета Д 212.186.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» и на сайте — https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tehnicheskie_nauki/steshkin

Автореферат разослан «__» _____ 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Воячек И. И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В машиностроении, приборостроении и других отраслях промышленности применяются мелкогабаритные детали, служебное назначение которых определяют каналы переменного сечения, образованные покрытыми внутренними поверхностями, которые не являются поверхностью вращения. В процессе формообразования подобных поверхностей наиболее сложной технологической задачей является формирование требуемого качества поверхности. К таким деталям можно отнести волноводы различного назначения, детали оптической техники, элементы клапанной аппаратуры с габаритными размерами до 60–80 мм и размерами отдельных наружных и внутренних поверхностей до 15...20 мм. Отделочной обработке для удаления следов первичного формообразования, обеспечения требуемого качества поверхностей подвергается подавляющее большинство подобных деталей. Особую сложность представляет обработка поверхностей каналов некруглого сечения с предварительно нанесенными покрытиями, поскольку толщина покрытий, а, следовательно, припуски на отделочную обработку невелики. Механизация отделки методами на основе использования абразивных или деформирующих рабочих сред, перемещаемых инерционными силами, позволяет снизить себестоимость данных изделий.

Однако поверхности каналов с некруглым переменным поперечным сечением у подобных деталей в большинстве случаев расположены таким образом, что равномерная обработка их свободными средами невозможна. Также задача усложняется малыми поперечными размерами обрабатываемых элементарных поверхностей. Обеспечение требуемой шероховатости поверхности производится в большинстве случаев вручную, при помощи специально изготавливаемых притиров. Уровень дефектности деталей, забракованных на данном этапе технологического процесса, достигает 50–80 %.

Малые размеры внутренних поверхностей, образующих каналы малого поперечного сечения, также являются серьезным препятствием для обеспечения необходимых давлений и относительных скоростей рабочих тел среды при обработке свободными средами. Из методов центробежной обработки наиболее перспективной технологией отделки поверхностей каналов деталей является центробежно-планетарная обработка (ЦПО), обеспечивающая высокие давления и скорости перемещения свободной среды для рабочих тел малой массы и сокращение трудоемкости отделочной операции.

Технология ЦПО достаточно подробно разработана для наружных поверхностей мелкогабаритных деталей, обработки внутренних и внешних поверхностей вращения. Однако её применение в данном случае сдерживается отсутствием исследований обработки поверхностей каналов с некруглым переменным поперечным сечением абразивными или деформирующими рабочими средами в том случае, когда размеры сечения канала сопоставимы с размерами рабочих тел. Поэтому методы ЦПО внутренних поверхностей свободными средами не получили широкого распространения. Рекомендации

по проектированию подобной технологии отсутствуют, что не гарантирует стабильного качества получаемых поверхностей.

В связи с изложенным тема диссертационной работы, направленная на обеспечение функциональных требований к шероховатости некруглых внутренних поверхностей с покрытием, имеющих малое поперечное сечение, при обработке деформирующими рабочими средами, является актуальной.

Объект исследования: операция центробежно-планетарной отделочной обработки деформирующими средами поверхностей каналов сложной формы с гальваническим покрытием.

Предмет исследования: взаимосвязи параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей каналов сложной формы и технологических режимов центробежно-планетарного метода обработки.

Целью работы является технологическое обеспечение функциональных параметров шероховатости поверхностей каналов некруглого сечения малого размера с покрытием на основе новых схем и технологических решений отделочной центробежно-планетарной обработки деформирующими средами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **задачи:**

- разработка новой схемы обработки и определение кинематических характеристик деформирующих рабочих тел, взаимодействующих с внутренними поверхностями канала малого поперечного размера под воздействием инерционных сил при центробежно-планетарном движении;
- разработка методики моделирования контактного воздействия деформирующих тел малого размера на поверхность с покрытием;
- разработка алгоритма оценки результатов контактного взаимодействия рабочих тел свободной деформирующей среды и поверхности с покрытием;
- экспериментальное исследование качества поверхности канала некруглого переменного сечения при центробежно-планетарной обработке и установление зависимостей, подтверждающих достижение функциональных требований к шероховатости поверхности при управлении технологическими факторами;
- разработка нового способа обработки поверхностей каналов некруглого поперечного сечения и технологических рекомендаций, направленных на повышение эффективности их обработки с обеспечением требуемого качества поверхностей;
- апробация и внедрение результатов исследований в производственных условиях.

Методы исследования. Теоретические исследования основываются на научных положениях технологии машиностроения, теории упругости и пластичности материалов, теории резания, физики сплошных сред и методах математического моделирования.

Экспериментальные исследования выполнены на основе методик многофакторного планирования с использованием как стандартного, так и оригинального испытательного оборудования.

Моделирование функционирования исследуемого процесса проводилось с использованием лицензионных программных пакетов Delphi, ANSYS/LS-DYNA и оригинальных программных продуктов, разработанных автором при работе в составе коллектива кафедры «Технологии и оборудование машиностроения» Пензенского государственного университета.

Достоверность и обоснованность научных результатов обеспечивается научно обоснованными математически описанными задачами для описания закономерностей процессов, протекающих в контейнерах с планетарным вращением, а также контактного взаимодействия рабочих тел с внутренними обрабатываемыми поверхностями и подтверждается сходимостью теоретических, экспериментальных данных и результатов компьютерного моделирования, а также практической апробацией в производственных циклах.

Научная новизна по специальности 2.5.6:

1. Исследована новая схема отделочной центробежной планетарной обработки поверхностей каналов некруглого переменного поперечного сечения, малого размера, с гальваническим покрытием, позволяющая обеспечить требуемую шероховатость поверхности (П. 2).

2. Получены аналитические и эмпирические зависимости, устанавливающие взаимосвязь геометрии поверхностей каналов некруглого поперечного сечения и технологических параметров с функционально необходимыми параметрами шероховатости, установлены рациональные режимы реализации технологии обработки (П. 7).

3. Разработаны модели перемещения рабочей среды в полости канала при центробежной обработке и контактного взаимодействия рабочих тел среды с поверхностями каналов некруглого поперечного сечения, имеющими гальваническое покрытие, учитывающие прочностные свойства материала покрытия и величину исходных неровностей (П. 3).

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Разработана эффективная технология центробежно-планетарной обработки (ЦПО) мелкоразмерных деталей, имеющих каналы с покрытием, на основе использования деформирующих рабочих тел, позволяющая снизить себестоимость изготовления деталей за счет снижения уровня дефектности.

2. Разработаны алгоритм и модуль проектирования операции обработки каналов некруглого переменного сечения мелкоразмерных деталей методом ЦПО, позволяющие выбирать рациональные режимы обработки, характеристики гранулированных рабочих тел и обеспечивающие прогнозирование параметров шероховатости поверхностей.

3. Разработана конструкция оборудования для обработки свободными средами каналов некруглого переменного сечения в мелкоразмерных деталях на основе новой схемы движения ЦПО.

На защиту выносятся:

1. Схема отделочной обработки поверхностей каналов малого размера с переменным некруглым сечением методом отделочной ЦПО.
2. Зависимости, устанавливающие взаимосвязи технологических параметров ЦПО с формируемым качеством поверхностей каналов малого размера переменного поперечного сечения.
3. Модели взаимодействия рабочих тел среды с внутренней обрабатываемой поверхностью, имеющей покрытие, учитывающие прочностные свойства материала покрытия и величину исходных неровностей.
4. Результаты экспериментальных исследований влияния технологических режимов ЦПО на качество поверхностей каналов некруглого переменного сечения с покрытием.
5. Конструкция оборудования для обработки поверхностей каналов малого размера с переменным некруглым сечением в мелкоразмерных деталях на центробежных планетарных установках.
6. Методика проектирования операции отделочной ЦПО поверхностей с покрытием каналов переменного сечения с обеспечением их функционального качества.

Реализация результатов работы. Результаты исследований внедрены в АО ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» (г. Заречный) при отделочной обработке деталей волноводов с каналами сложной формы. Достигнуто уменьшение уровня дефектности изделий и снижение трудоемкости отделочных операций. Годовой экономический эффект составил 8 955 102 руб.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях «Инновационные технологии в машиностроительном комплексе» (г. Пенза, Россия, 2012), «Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM» (г. Пенза, Россия, 2017) и «Машиностроительные технологические системы» (г. Азов, Россия, 2022).

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 13 печатных работах, из них четыре – в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получено 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 102 наименований и пяти приложений. Работа изложена на 161 странице основного текста, включает 102 рисунка и 50 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы работы, сформулирована цель исследований, приведены научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор методов финишной отделочной обработки поверхностей волноводов, обобщен опыт применения различных технологий шлифования и полирования. Показана перспективность совершенствования технологии центробежной обработки в контейнерах с планетарным вращением для каналов мелкогабаритных деталей. В процессе работы изучены труды ученых А. П. Бабичева, А. Н. Мартынова, М. А. Тамаркина, В. О. Трилисского, А. Е. Зверовщикова, А. П. Сергиева, С. Я. Грилихеса и других, внесших существенный вклад в развитие теории и практики объемной обработки деталей. Показана актуальность разработки, и сформулированы задачи исследования.

Во второй главе приведены результаты теоретических исследований кинематических и динамических характеристик рабочей среды. Предложен новый метод обработки, при котором рабочую среду загружают внутрь канала (рисунок 1,а). Равнодействующая сила $\bar{F}$, действующая на центр масс загрузки в полости детали при обработке в контейнерах с планетарным движением, определялась как

$$\sum \bar{F} = \bar{F}_G + \bar{F}_2 + \bar{F}_1 + \bar{F}_k + \bar{F}_{тр} + \bar{R}, \quad (1)$$

где $\bar{F}_G$ – сила тяжести, Н; $\bar{F}_2$ – сила инерции от вращения контейнера с угловой скоростью ω_2 , Н; $\bar{F}_1$ – сила инерции от вращения водила с угловой скоростью ω_1 , Н; $\bar{F}_k$ – кориолисова сила инерции, Н; $\bar{F}_{тр}$ – сила трения качения рабочих тел загрузки о стенки полости детали, Н; $\bar{R}$ – сила реакции стенок полости детали на воздействие загрузки, Н.

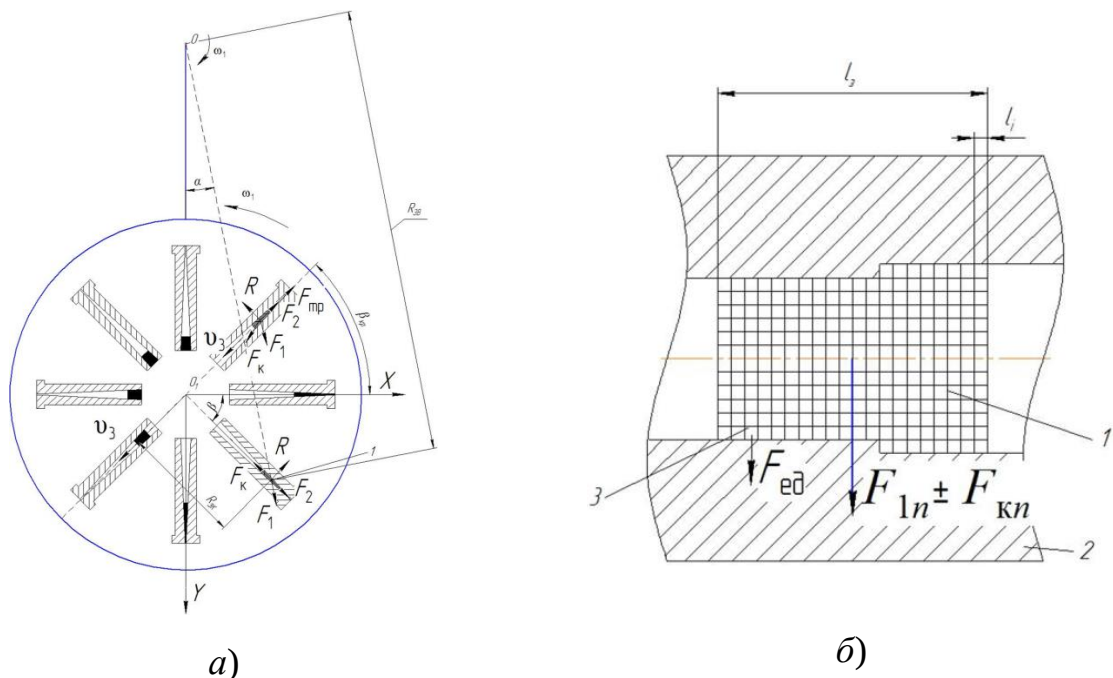


Рисунок 1 – Схема способа обработки:

а – схема действия сил на загрузку при ее движении в полости детали при обработке; б – схема взаимодействия единичного объема загрузки с обрабатываемой поверхностью

Тогда тангенциальная проекция $a_{з\tau}$ результирующего ускорения массива загрузки в полости детали примет вид

$$a_{з\tau} = \frac{F_{2\tau} + F_{1\tau} + F_{к\tau} \pm F_{тр\tau}}{m_3}, \quad (2)$$

где $a_{з\tau}$ – проекции результирующего ускорения массива загрузки на ось полости детали, м/с².

Скорость центра масс загрузки в произвольный момент времени t_i может быть определена численным способом:

$$v_3 = a_{з\tau} \cdot t_i + v_{3(i-1)}, \quad (3)$$

где $v_{3(i-1)}$ – скорости массива загрузки относительно стенок полости детали в момент времени, предшествующий расчету, м/с.

Для единичного контакта сила $F_{ед}$ взаимодействия рабочего тела с обрабатываемой поверхностью (рисунок 1,б):

$$F_{ед} = \frac{F_{1n} \pm F_{кн}}{n_k} \cdot \cos(\theta), \quad (4)$$

где $F_{ед}$ – сила взаимодействия рабочего тела с обрабатываемой поверхностью, Н; n_k – количество контактов рабочих тел с обрабатываемой поверхностью в каждый момент времени; θ – угол наклона поверхности полости детали к ее оси, рад.

Разработано ПО «Канал» для расчета скоростей рабочих тел загрузки относительно стенок полости детали и сил взаимодействия рабочего тела с обрабатываемой поверхностью в каждой точке внутренней поверхности канала, количества n_k контактов рабочих тел. Проведен вычислительный эксперимент с варьированием передаточного числа между угловыми скоростями водила и контейнера z ; степени заполнения полости детали C , %; частоты вращения водила n_1 , мин⁻¹; коэффициента трения рабочих тел k . Наиболее значимым фактором оказалась частота вращения водила n_1 (таблица 1).

Таблица 1 – Значения скоростей v_3 и сил $F_{ед}$ при различной частоте вращения водила n_1

Значение частоты вращения водила n_1 , мин ⁻¹	Значение скорости v_3 при движении загрузки, м/с		Значение силы $F_{ед}$ при движении загрузки, Н	
	от оси контейнера	к оси контейнера	от оси контейнера	к оси контейнера
60	–7,59...–9,69	7,36...9,39	–0,086...–0,102...–0,079	0,066...0,117
80	–9,52...–13,01	9,15...12,51	–0,143...–0,175...–0,141	0,109...0,207
100	–11,09...–16,2	11,02...15,97	–0,206...–0,263...–0,219	0,163...0,328
120	–12,89...–19,89	12,76...19,54	–0,286...–0,378...–0,323	0,225...0,48
140	–14,49...–23,59	14,36...23,18	–0,373...–0,51...–0,448	0,295...0,661

Выявлено нелинейное влияние коэффициента трения рабочих тел с обрабатываемой поверхностью на результат обработки (рисунок 2).

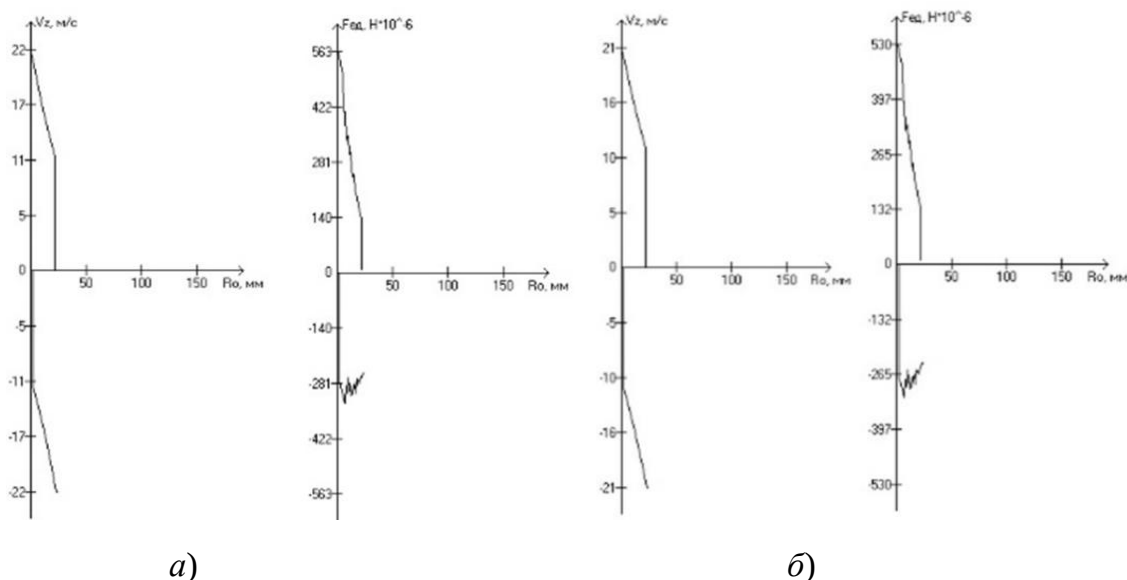


Рисунок 2 – Скриншот ПО «Канал»: графики значений скоростей v_z и сил $F_{ед}$ при коэффициенте трения качения:
 $a - k = 0,0005$; $б - k = 0,001$

В третьей главе приведены результаты моделирования контактного взаимодействия рабочих тел диаметром D с поверхностями канала методом конечных элементов (рисунок 3).

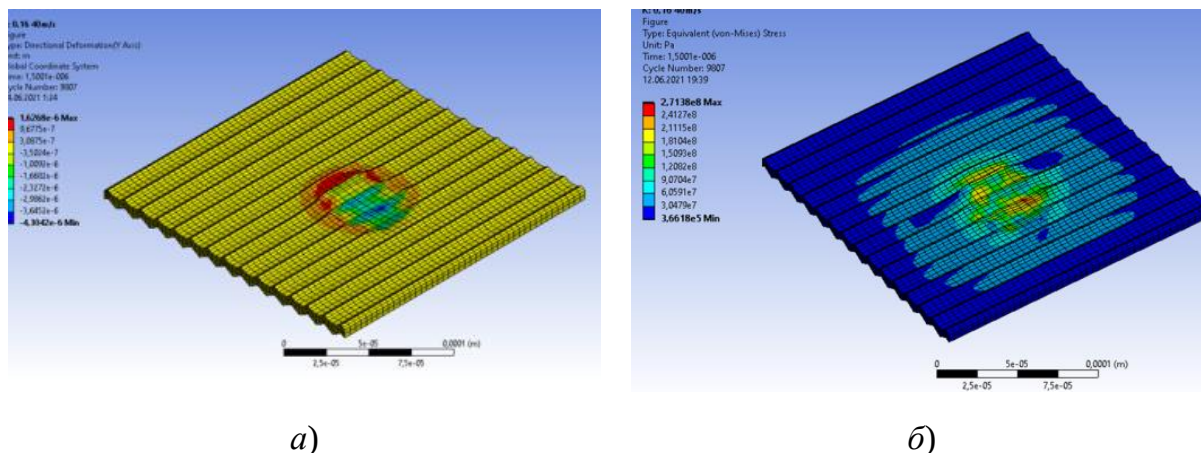


Рисунок 3 – Схема и результат моделирования:
 a – деформации покрытия детали, тело $D = 0,16$ мм, скорость контакта 40 м/с;
 $б$ – напряжения в покрытии, скорость 40 м/с и $D = 0,16$ мм

Была принята гипотеза, что обеспечить уменьшение средней высоты и дисперсии высот неровностей, сохранив точность поверхностей канала, может воздействие рабочих тел, при которых: 1) напряжения в зоне контакта достаточны для пластической деформации выступов микронеровностей покрытия; 2) напряжения в материале подложки меньше значения ее предела текучести; 3) величина пластической деформации покрытия не превышает $0,9 \dots 1,1$ значения исходной шероховатости по параметру R_{max} ; 4) максимальная пластическая деформация основания статистически неотличима от нулевого значения.

В качестве исходных данных использованы параметры взаимодействия, полученные в главе 2. Функциями отклика были величина максимальной деформации покрытия и основы материала, напряжения по Фон Мизесу (рисунок 4).

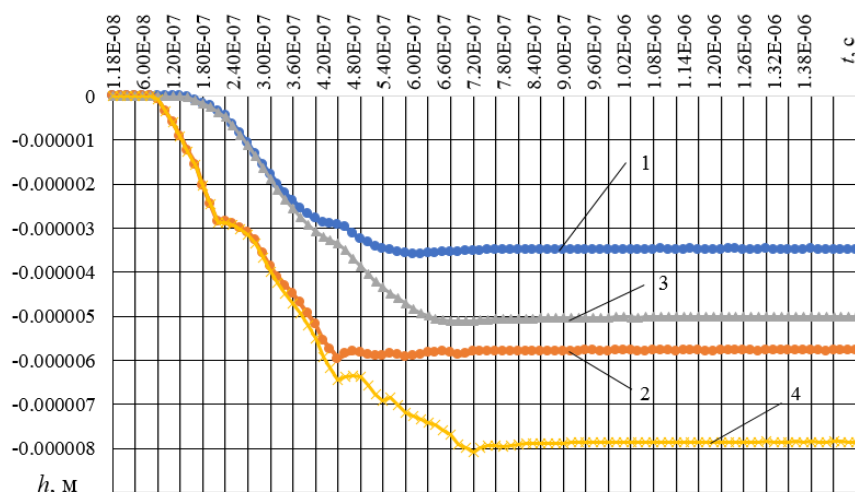


Рисунок 4 – Динамика деформации h в зоне контакта ($V = 70$ м/с $D = 0,16$ мм):
1 – для основания, тела – сталь CHRONITAL; 2 – для покрытия, тела – сталь CHRONITAL; 3 – для основания, тела – ВК6; 4 – для покрытия, тела – ВК6

При скорости от 10 до 20 м/с происходит необходимое смятие микронеровностей поверхности покрытия и при этом деформации основы детали незначительны (рисунок 5), что обеспечивается при частоте вращения водила проектируемой центробежной установки от 105 до 120 мин⁻¹. Избежать ударных взаимодействий можно заполнением рабочей средой не более 25–30 % от объема канала.

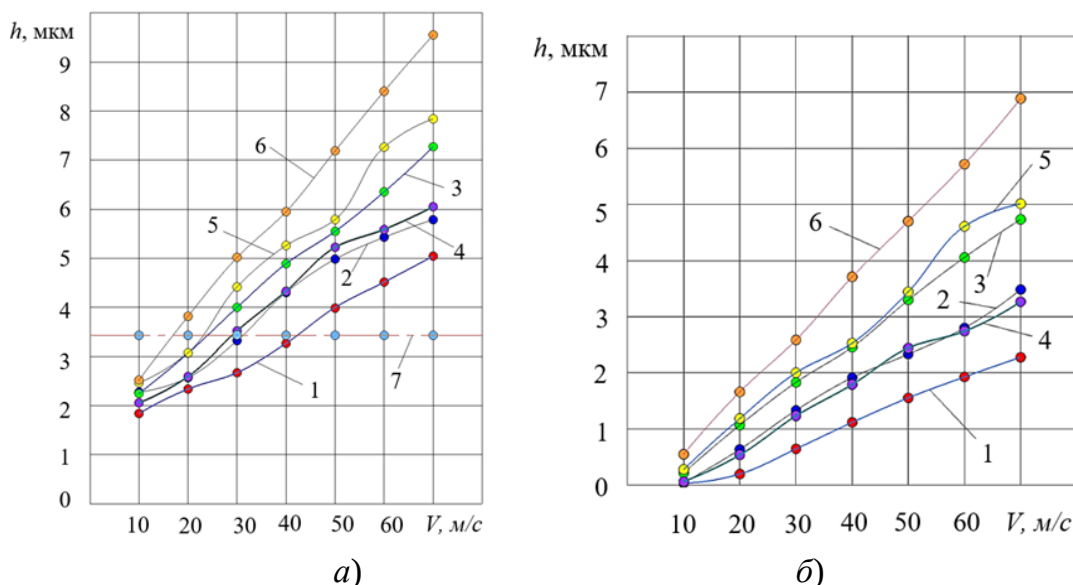


Рисунок 5 – Влияние скорости V рабочих тел на максимальные пластические деформации h : а – покрытия; б – основания детали в зоне контакта: 1 – $D = 0,12$ мм, сталь CHRONITAL; 2 – $D = 0,16$ мм, сталь CHRONITAL; 3 – $D = 0,2$ мм, сталь CHRONITAL; 4 – $D = 0,12$ мм, ВК6; 5 – $D = 0,16$ мм, ВК6; 6 – $D = 0,2$ мм, ВК6; 7 – граница допустимой деформации покрытия h

В четвертой главе описаны экспериментальное оборудование, методика и результаты экспериментальных исследований влияния технологических факторов на качество поверхности, обоснован выбор технологической жидкости для проведения эксперимента.

Исследования годных деталей-представителей позволили определить функциональные требования к шероховатости. Критерий для параметра Ra составил $\leq 0,67$ мкм.

По известным методикам работ Зверовщикова А. Е. через величину единичного отпечатка рассчитана теоретическая величина параметра Ra шероховатости, формируемой при деформационной обработке.

Реальные экспериментальные исследования подтвердили формирование требуемой шероховатости внутренней поверхности на теоретически определенных режимах (рисунок 6).

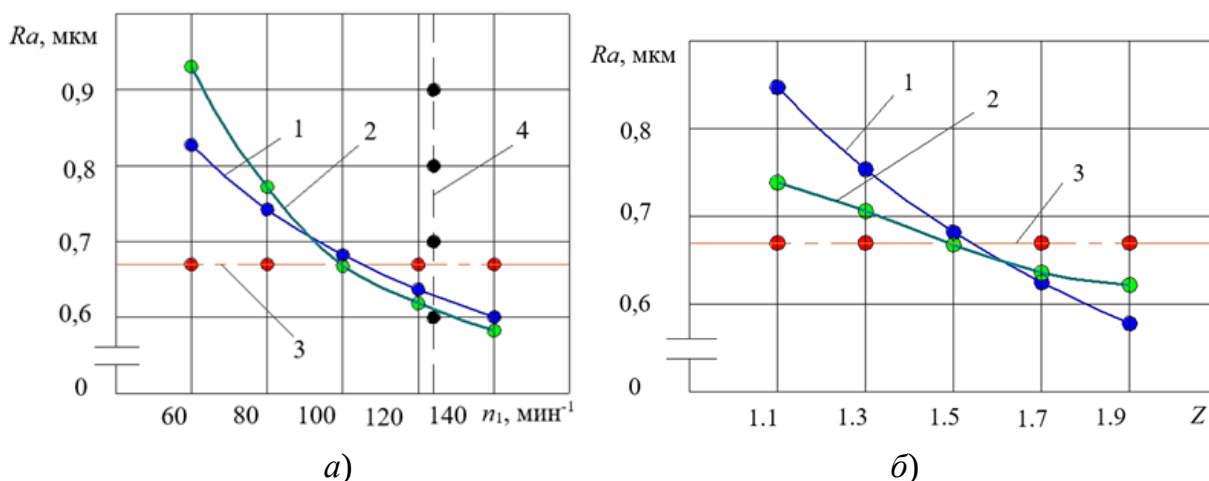


Рисунок 6 – Влияние на шероховатость поверхности Ra : а – частоты вращения водила n_1 на шероховатость поверхности Ra , установившуюся после обработки ($z = 1,5$; $C = 40\%$; $t = 6$ мин): 1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость; 3 – граница допустимой шероховатости Ra ; 4 – граница допустимых деформаций покрытия; б – передаточного отношения z ($n_1 = 100$ мин^{-1} ; $C = 40\%$; $t = 6$ мин): 1 – экспериментальная зависимость; 2 – теоретическая зависимость; 3 – граница допустимой шероховатости Ra

Полученные эмпирические данные и модели на их основе показали удовлетворительную сходимость с результатами теоретических расчетов. Эмпирическая модель имеет вид

$$Ra = 2,2 \cdot z^{0,699} \cdot C^{0,332} \cdot n^{-0,378} \cdot t^{-0,208}. \quad (5)$$

Дополнительно был проведен эксперимент для определения рационального времени обработки детали-представителя. Время установления шероховатости для наиболее рациональных режимов составило не более $t = 10$ мин.

В пятой главе приведено описание практической реализации технологии обработки поверхностей каналов мелкоразмерных деталей в контейнерах с планетарным вращением.

Схема взаимодействия ПО «Канал» представлена на рисунке 7.

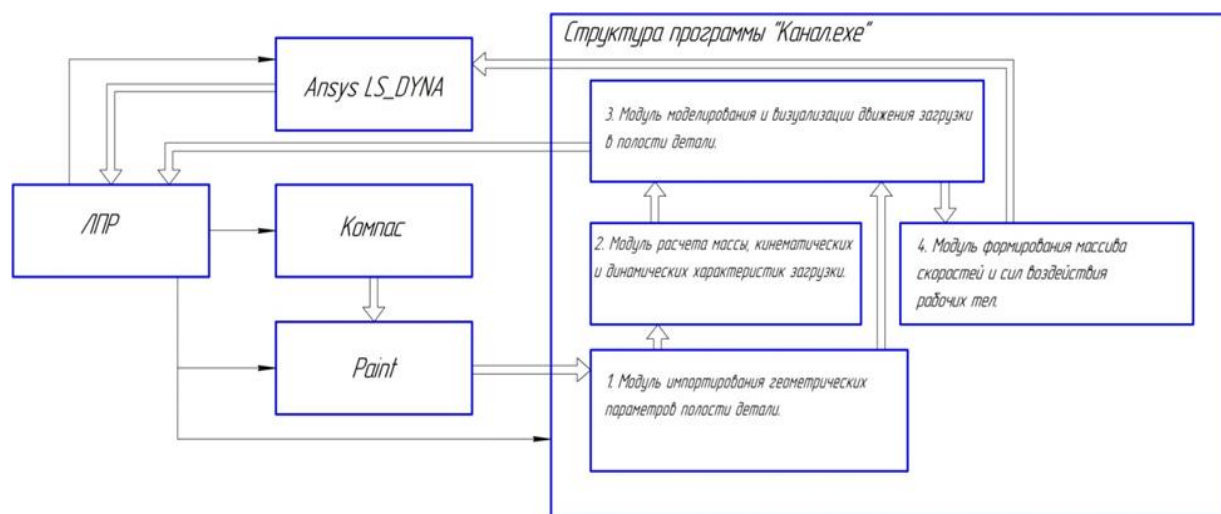


Рисунок 7 – Функциональная схема программы «Канал» и взаимодействие с внешним ПО

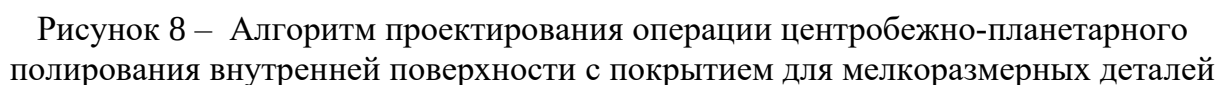
Алгоритм определения технологических режимов представлен на рисунке 8.

Исходными данными служат: геометрия каналов, ФМС материалов покрытия и подложки, высота неровностей до и после покрытия, толщина покрытия, радиусы водила планетарного механизма и контейнера, диапазон частот вращения водила, соотношение частот вращения водила и контейнеров. Первоначально проводится проверка проникающей способности рабочих тел, обеспечивающей равномерность обработки зон ограниченного доступа, и рассчитываются параметры гранулированной рабочей среды: плотность рабочей среды, коэффициент внутреннего трения, необходимые для моделирования динамики. Начальные значения – заполнения контейнера и утяжеления – принимаются в соответствии с выводами глав 2, 4.

Модуль импортирования ПО «Канал» служит для загрузки геометрических параметров канала произвольной конфигурации детали из файлов с расширением *.bmr, конфигурация полости детали и примыкающие полости технологической оснастки задаются эскизами двух проекций.

Затем выполняется построение распределения скоростей V_z и усилий контакта $F_{ед}$ по поверхности канала, оценивается его неравномерность и предпринимается действия по выравниванию динамических характеристик, разработанные в главе 2.

Разработанная технология внедрена для обработки каналов переменного профиля некруглого сечения в АО ФНПЦ «ПО «Старт» им. М. В. Проценко» с годовым экономическим эффектом свыше 8 млн рублей.



13

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена новая схема ЦПО, и разработан новый способ центробежной обработки поверхностей каналов малого размера с переменным некруглым сечением.

2. Получены модели движения массива рабочих тел в полости переменного сечения канала в процессе ЦПО и аналитические выражения для вычисления скоростей взаимодействия рабочих тел и обрабатываемой поверхности.

3. Математически описано движение массива рабочих тел в полости канала некруглого переменного сечения в процессе ЦПО, получены аналитические выражения для вычисления скоростей взаимодействия рабочих тел и обрабатываемой поверхности, показавшие, что скорость контакта для стальных рабочих тел диаметром 0,2 мм достигает 24 м/с, а размах скоростей в различных зонах поверхности – до 11 м/с при усилии единичного контакта до 0,68 Н.

4. Разработаны критерии, позволяющие выявить допустимые параметры контакта единичного рабочего тела с покрытой поверхностью канала.

5. Получена методика моделирования, включающая моделирование шероховатости подложки и исходной шероховатости покрытия, позволяющая оценить величины напряжений и деформаций как покрытия, так и основания.

6. Определены диапазоны скоростей рабочих тел от 10 до 20 м/с и степень загрузки объема канала рабочими телами 25–30 %, обеспечивающие уменьшение шероховатости поверхности покрытия для детали-представителя и при сохранении геометрии канала. Рассчитаны требуемые частоты вращения водила установки, составившие для стальных рабочих тел около 120 мин^{-1} , для рабочих тел из твердого сплава 105 мин^{-1} .

7. Разработана методика трехмерного моделирования взаимодействия рабочих тел среды с обрабатываемой поверхностью, имеющей покрытие, учитывающая прочностные свойства материала покрытия.

8. Разработана методика и технологическая оснастка для экспериментального определения достаточной для работоспособности шероховатости поверхности каналов волноводов.

9. Получены эмпирические зависимости, устанавливающие взаимосвязи геометрии каналов, технологических параметров метода ЦПО и среды с формируемыми параметрами шероховатости поверхностей каналов и пригодные для расчета технологических режимов. Расхождение экспериментальных и расчетных значений не превышает 6 %.

10. Подтвержден диапазон технологических режимов, определенный теоретически для обеспечения требуемого качества внутренней поверхности. Установлено, что для достижения требуемого результата обработки стальными шарами диаметром 0,2 мм необходимо поддерживать частоту вращения водила

в пределах от 105 до 120 мин⁻¹ при передаточном отношении около 1,5 и степени заполнения контейнера от 25–30 %.

11. Разработаны алгоритм и модуль проектирования операции ЦПО каналов мелкоразмерных деталей, обеспечивающий выбор технологических режимов, прогнозирование качества и стабильности параметров шероховатости поверхностей каналов, разработано промышленное оборудование для реализации технологии ЦПО поверхностей с покрытием каналов некруглого переменного сечения мелкоразмерных деталей.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. **Стешкин, А. В.** Механизация удаления заусенцев на труднообрабатываемых материалах / А. В. Стешкин, С. А. Нестеров // Новые промышленные технологии. – 2008. – № 3. – С. 28–29.

2. **Стешкин, А. В.** Технология и устройство для доводки глубоких отверстий и каналов диаметром менее 1 мм / А. В. Стешкин, А. С. Скотников, С. В. Холмогорцев // Новые промышленные технологии. – 2006. – № 4. – С. 8–9.

3. **Стешкин, А. В.** Финишная обработка сферических поверхностей со смещенным фокусом / А. В. Стешкин, В. Я. Обушников, А. С. Барсуков // Новые промышленные технологии. – 2010. – № 4. – С. 8–10.

4. Технологическое обеспечение центробежной отделочно-упрочняющей и зачистной обработки поверхностей деталей / В. З. Зверовщиков, С. А. Нестеров, А. В. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, **А. В. Стешкин** // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2022. – № 2 (62). – С. 117–133.

Патенты РФ

1. Патент 2572684, МПК В24В31/104. Способ центробежной обработки внутренних поверхностей мелкоразмерных деталей / В. З. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, **А. В. Стешкин**; заявитель и патентообладатель Пензенский государственный университет – № 2014128140/02; заявл. 09.07.2014; опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

2. Патент 2441727, МПК В21D35/00 Н01Р11/00. Способ изготовления внутренних каналов, волноводных трактов от миллиметрового диапазона и устройство для его реализации / В. Я. Обушников, **А. В. Стешкин**, И. А. Гусаров, В. И. Осипов, В. А. Мельников; заявитель и правообладатель ФГУП ФНПЦ «ПО «Старт» имени М. В. Проценко» – № 2010141254/02 ; заявл. 07.10.2010 ; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4.

Публикации в других изданиях

1. **Стешкин, А. В.** Моделирование контактного взаимодействия абразивных гранул на керамической связке с поверхностями деталей при объемной центробежной обработке / А. В. Стешкин, В. З. Зверовщиков, А. Е. Зверовщиков, Д. Ю. Комаров // Инновационные технологии в машиностроительном комплексе : сборник трудов I Международной научно-практической конференции / под редакцией В. З. Зверовщикова, М. В. Белашова. – Пенза : Издательство ПГУ, 2012. – С. 83–88.

2. **Стешкин, А. В.** Интенсификация объемной обработки мелких деталей путем циклического реверсирования вращения контейнеров / А. В. Стешкин, В. Я. Обушников, В. З. Зверовщиков // Инновационные технологии в машиностроительном комплексе : сборник трудов I Международной научно-практической конференции / под ред. В. З. Зверовщикова, М. В. Белашова. – Пенза : Издательство ПГУ, 2012. – С. 34–37.

3. **Стешкин, А. В.** Нанесение равномерного гальванического покрытия на внутренние каналы волноводных трактов постоянного и (или) переменного сечения / А. В. Стешкин, В. Я. Обушников, В. И. Осипов // Новые промышленные технологии. – 2011. – № 2. – С. 26–27.

4. Зверовщиков, А. Е. Моделирование обработки внутренних поверхностей сложного сечения мелкогабаритных деталей / А. Е. Зверовщиков, П. А. Гурин, **А. В. Стешкин**, В. В. Павлуткин // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сборник статей VIII Международной научно-практической конференции. – Пенза, 2014. – С. 20–24.

5. Нестеров, С. А. Моделирование кинематики перемещения рабочих тел в контейнерах с планетарным вращением / С. А. Нестеров, **А. В. Стешкин**, Е. Ю. Прошина // Техника и технология современных производств : сборник статей Всероссийской научно-практической конференции. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2019. – С. 47–50.

6. **Стешкин, А. В.** Программа для моделирования объемной обработки внутренних полостей деталей в контейнерах с планетарным вращением «Канал.EXE» / А. В. Стешкин, А. Е. Зверовщиков // Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. (Saint-Louis), 2018. URL: elib.pnzgu.ru

7. Моделирование контактного взаимодействия рабочих тел с поверхностью волновода при центробежной отделочно-упрочняющей обработке / В. З. Зверовщиков, **А. В. Стешкин**, А. А. Китаев, Н. В. Сорокина, А. С. Лялин // Системы проектирования, моделирования, подготовки производства и управление проектами CAD/CAM/CAE/PDM : сборник статей XI Международной

научно-практической конференции. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2017. – С. 52–55.

8. О движении рабочих тел при центробежной отделочной обработке внутренних поверхностей деталей пластическим деформированием / В. З. Зверовщиков, **А. В. Стешкин**, А. Е. Зверовщиков, С. А. Нестеров, А. В. Зверовщиков // Машиностроительные технологические системы : сборник трудов Международной научно-технической конференции / под редакцией В. А. Лебедева. – Ростов-на-Дону : Донской государственный технический университет, 2022. – С. 56–58.

Научное издание

Стешкин Артем Вячеславович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ КАНАЛОВ НЕКРУГЛОГО СЕЧЕНИЯ
В МЕЛКОРАЗМЕРНЫХ ДЕТАЛЯХ ПРИ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ
ОБРАБОТКЕ**

**Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения
(технические науки)**

Редактор *Т. Н. Судовчихина*
Технический редактор *Р. Б. Бердникова*
Компьютерная верстка *Р. Б. Бердниковой*

Распоряжение №

Подписано в печать 0.0.2022. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,04. Заказ № 0. Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, Пенза, Красная, 40.
Тел.: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru