

На правах рукописи

Акулиничев Павел Дмитриевич

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА  
ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ОБРАБОТКОЙ ПОТОКОВОЙ ГАЛТОВКОЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: Кандидат технических наук  
**Гончаров Александр Александрович**  
Официальные оппоненты: **Максаров Вячеслав Викторович**  
доктор технических наук, профессор,  
декан механико-машиностроительного  
факультета ФГБОУ ВО «Санкт-  
Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II»  
**Смирнов Андрей Владимирович**  
кандидат технических наук  
заведующий лабораторией керамических  
материалов и технологий  
ФГБОУ ВО «МИРЭА - Российский  
технологический университет»

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Донской государственный  
технический университет» (ДГТУ)

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г. \_\_\_\_\_ на заседании  
диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГБОУ ВО «Московский  
государственный технический университет имени Н.Э. Баумана по адресу:  
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью,  
просим выслать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО  
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана и  
на сайте [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Телефон для справок 8(499) 263-66-33 доб. 36-28

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 г.

Ученый секретарь совета  
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

## **Актуальность работы**

В настоящее время одним из важных направлений развития науки «технология машиностроения» является выявление закономерностей взаимодействия элементов технологической системы «оборудование-оснастка-инструмент-заготовка», которые позволяют повысить качество изготавливаемых деталей за счет управления режимами обработки.

Одной из областей, которая находится в фокусе ученых-технологов, является обработка сложнопрофильных поверхностей.

Устройствами, в которых применяются миниатюрные сложнопрофильные поверхности, являются, например, одновинтовые дозаторы. Рабочим органам таких устройств является героторная пара, которая имеет циклоидальные винтовые поверхности с диаметром сечения в диапазоне 3..10 мм. К роторам рабочих органов предъявляются высокие требования к качеству поверхности, в частности величина шероховатости поверхности должна находиться в пределах  $Ra\ 0,04..0,06$  мкм. Эти требования обеспечиваются на этапе финишной обработки.

Сложность изготовления миниатюрных роторов одновинтовых дозаторов заключается в появлении отклонения формы, характеризуемого постоянством диаметра в продольном сечении (ПДПС), которое заготовка приобретает на этапе основного формообразования лезвийным инструментом. Отклонение ПДПС рабочей поверхности роторов более 0,005 мм недопустимо, так как это вызывает пульсации потока и снижает давление в героторной паре, поэтому важной научной задачей является разработка технологических подходов, позволяющих изготавливать роторы одновинтовых насосов с минимальными погрешностями формы, возникающие на этапе формообразования рабочей поверхности, при этом достигнув заданных параметров шероховатости.

## **Цель работы**

Повышение качества изготовления мелкоразмерных циклоидальных винтовых поверхностей обработкой потоковой галтовкой.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ современного состояния обеспечения качества мелкоразмерных циклоидальных винтовых поверхностей.
2. Разработать математическую модель обработки потоковой галтовкой, позволяющую прогнозировать изменение размеров и формы поверхностей заготовки при заданной величине шероховатости.
3. Экспериментально проверить разработанную математическую модель обработки потоковой галтовкой и определить значения абразивности наиболее распространенных материалов, применяемых для финишной обработки аустенитных нержавеющей сталей.
4. Разработать методику проектирования технологического процесса, обеспечивающего точность размеров и формы мелкоразмерных циклоидальных винтовых поверхностей в процессе их финишной обработки.
5. Выполнить анализ результатов практической реализации предложенных рекомендаций и оценить их эффективность при производстве рабочих органов прецизионных одновинтовых дозаторов высоковязких веществ.

**Предметная область** исследования – технологический процесс изготовления мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей.

**Объект исследования** – финишный этап обработки мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Обработка потоковой галтовкой позволяет проводить размерную обработку заготовок.

2. Режим обработки потоковой галтовкой следует назначать в соответствии с требованиями обеспечения точности размеров, формы и шероховатости поверхности.

3. Обработка потоковой галтовкой позволяет нивелировать конусность мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей, полученную на этапе формообразования обработкой лезвийным методом.

**Научная новизна работы**

1. Разработана аналитическая модель процесса размерной обработки заготовок потоковой галтовкой, позволяющая осуществить прогнозирование и управление их размерами и формой.

2. Установлены и экспериментально подтверждены зависимости влияния скорости потока абразивного материала и глубины обработки потоковой галтовкой на величину изменения размера при обработке мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей деталей из аустенитной нержавеющей стали

**Методы исследования**

Теоретические методы исследования основаны на базе основных положений технологии машиностроения и теории динамики сыпучих сред с использованием математического аппарата. Для теоретических расчетов режимов обработки использовались численные методы расчета с применением автоматизированных систем.

**Практическая значимость**

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований разработана методика проектирования технологического процесса финишной обработки мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей, выбору абразивного материала, назначению режимов и времени обработки.

Разработанная методика позволяет обеспечивать отклонение формы (по параметру ПДПС) циклоидальных винтовых поверхностей в пределах 0,005 мм при сохранении шероховатости поверхностей не более 0,06 мкм по Ra для широкой номенклатуры типоразмеров винтовых роторов.

Реализация методики при производстве рабочих органов прецизионных одновинтовых дозаторов высоковязких веществ, применяемых в общем и электронном машиностроении, приборостроении, медицине позволила повысить среднее давление в дозаторе на 20 % при снижении амплитуды его пульсации в 3,5 раза.

**Достоверность результатов** подтверждается корректным использованием методов математической статистики для оценки стабильности получаемых при обработке показателей качества, достаточной репрезентативностью

статистических выборок и соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований. Практическое подтверждение эффективности предложенной методики технологического обеспечения качества получено в ходе экспериментального исследования с применением современного цифрового контрольно-измерительного инструмента и оборудования: весы Jewelry Scale 8068-series, угломер SHANE 5520-200, микрометр Shan МКЦ 0-25 0.001, индикатор SHANE GS-5321-10-4/GS-5321-10-7, контурограф M.ERA PLATINUM D1-1542.

### **Личный вклад**

Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии в результате проведения экспериментальных и расчетных работ. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

### **Апробация работы**

Основные положения диссертации докладывались на XIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2020); Международной научно-технической конференции «Машиностроительные технологические системы» (International Scientific-Technical Conference «Mechanical Engineering Technological Systems») (Азов, 2021); на XV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 2022); на 15-ой Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 2023). Основные разделы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры технологий машиностроения МГТУ им. Н.Э.Баумана в 2020..2024 г.г.

### **Публикации**

По содержанию работы и основным результатам исследования опубликовано 4 научные работы, в том числе одна статья в издании, индексируемом базой Web of Science (RSCI), три статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, общим объемом 4,5 п.л., а также получен патент на полезную модель.

### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Общий объем работы составляет 117 страниц, список литературы содержит 95 наименований.

### **Содержание работы**

**Во введении** обосновывается актуальность решаемых научно-технических задач, формулируются цели, задачи исследования и научная новизна и практическая значимость предлагаемых решений.

**В Главе 1** проведен обзор и анализ существующих методов финишной обработки циклоидальных винтовых поверхностей (ЦВП). Рассмотрены существующие подходы к проектированию технологических процессов (ТП) обработки свободным абразивом.

Растет применение рабочих органов, имеющих мелкогабаритные ЦВП, диаметр сечения которых составляет 3-10 мм, в медицине, электронике, пищевой промышленности, дозировании, нанесении уплотнений и покрытий, а также в 3D-печати. Производством систем, использующихся в указанных направлениях

промышленности, занимаются такие компании как «ViscoTec Pumpen- u Dosiertechnik» (Германия), «Nordson» (США), «HEISHIN Ltd» (Япония), «NETZSCH» (Германия), ПК «МОНОПОТОР» (Россия) и другие. Использование мелкогабаритных рабочих органов (ротора и статора) связано с необходимостью обеспечения высокой объемной точности подачи материалов. Это обуславливает необходимость обеспечения высокой геометрической точности, а также качества поверхности рабочих органов таких устройств. Допуски на диаметральные размеры мелкогабаритных ЦВП лежат в пределах 0,008-0,015 мм, качество поверхности достигает значений шероховатости поверхности Ra 0,04-0,06 мкм, а отклонения формы не более 0,005-0,01 мм.

Анализ технологических возможностей современных методов финишной обработки показал, что большинство из них имеют ограниченную применимость в области обработки ЦВП. Особенно актуальна проблема обработки мелкогабаритных ЦВП. Кроме того, характерной проблемой при обработке мелкогабаритных ЦВП является необходимость нивелировать обратную конусность, полученную на этапе формообразования поверхности лезвийными методами.

Выявлено, что наиболее подходящим и универсальным методом обработки мелкогабаритных ЦВП является обработка потоковой галтовкой, которая позволяет обеспечивать высокое качество поверхности. Кроме того, при изготовлении роторов с мелкогабаритными ЦВП на Российском производстве уже используют обработку потоковой галтовкой. На данный момент потоковой галтовкой удалось обеспечить требования по шероховатости поверхности и геометрической точности формы (Рисунок 1).

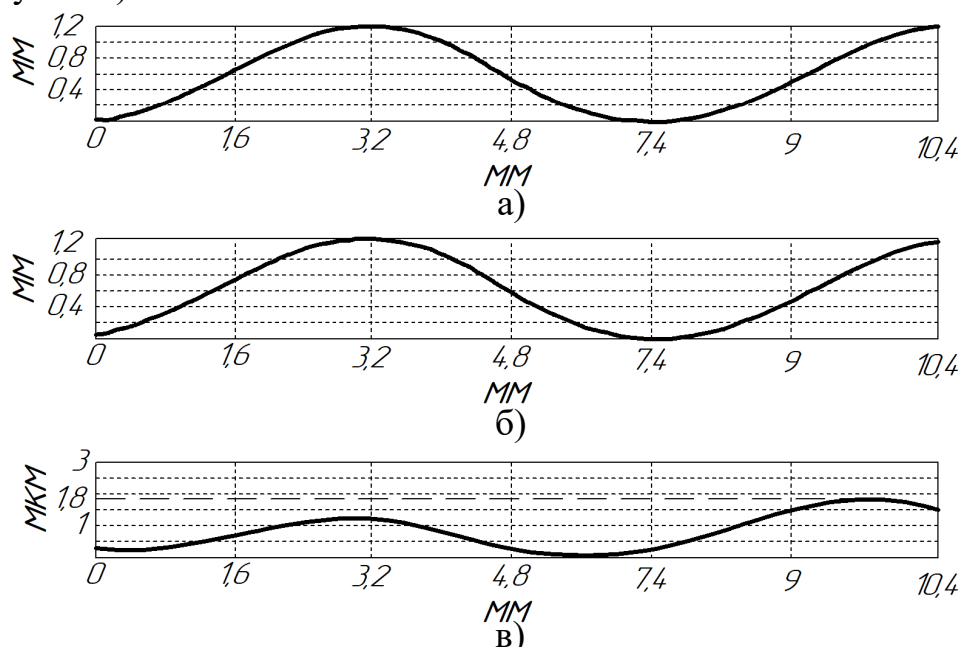


Рисунок 1. Геометрическая форма ЦВП на разных этапах обработки: а) фрезерование, б) потоковая галтовка, в) разница геометрических форм

Разработкой подходов к проектированию ТП обработки свободным абразивом занимались следующие ученые: Бабичев А.П., Тамаркин М.А., Лебедев В.А., Зверовщиков А.В., Зверовщиков В.З, Barletta M., Бабаев А.С., Дягтерев В.В.,

Uhlmann E., Malkorra I., Лаптев Н.В. Большинство работ направлены на определение режимов обработки, обеспечивающих заданную шероховатость поверхности при виброабразивной, центробежной галтовке и обработке уплотненным абразивом.

Существующие подходы к проектированию ТП обработки свободным абразивом направлены лишь на обеспечение качества поверхности, в частности низкого значения шероховатости, при этом никак не учитывая размерный съем материала с заготовки. Определение изменения размера заготовки достаточно важно при обработке ответственных деталей, так как, зачастую, при обеспечении шероховатости поверхности снимается около 3-12 мкм материала с поверхности заготовки, что соизмеримо с допуском на диаметральный размер мелкогабаритных ЦВП. При этом до 25 % заготовок поступает на этап финишной обработки имея отклонения формы (по параметру ПДПС) в пределах 0,015-0,02 мм при допустимом не более 0,005 мм. Так как традиционно обработка свободным абразивом направлена лишь на обеспечение шероховатости, то отклонение ПДПС в процессе галтовки не изменяется. В результате в готовом изделии происходят пульсации потока жидкости и снижение давления в героторной паре.

Соответственно существует необходимость в разработке математической модели размерной обработки потоковой галтовкой и методики проектирования ТП финишной обработки мелкогабаритных ЦВП с учетом изменения их размеров и формы.

**В Главе 2** проведен анализ изменения шероховатости поверхности и съема материала с заготовки при обработке свободным абразивом. Разработаны математическая модель обработки потоковой галтовкой и методика проектирования ТП обработки потоковой галтовкой, позволяющие обеспечивать требуемое качество мелкогабаритных ЦВП.

Анализ существующих работ, связанных с обработкой свободным абразивом, показал, что законы изменения шероховатости поверхности, массы образцов и размерного съема материала от времени обработки имеют характерный вид (Рисунок 2).

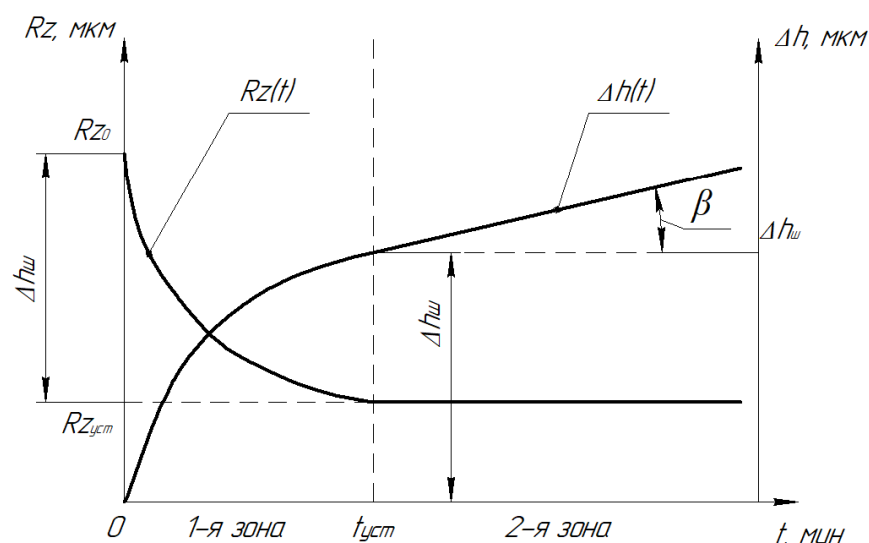


Рисунок 2. Теоретическая модель обработки свободным абразивом

Можно выделить две зоны. В первой зоне, от 0 до  $t_{уст}$ , происходит интенсивное изменение шероховатости поверхности от исходного значения ( $Rz_0$ ) до некоторого установившегося уровня шероховатости поверхности ( $Rz_{уст}$ ).  $Rz_{уст}$  имеет постоянное значение для конкретного абразивного материала. При этом изменение размера также происходит по нелинейному закону. После достижения  $Rz_{уст}$  во второй зоне (от  $t_{уст}$  и далее) шероховатость поверхности не изменяется несмотря на продолжающееся изменение размера заготовки, имеющее теперь линейный характер.

Научный и практический интерес предшествующих работ был связан с интенсивностью изменения шероховатости поверхности. Поэтому исследования были сосредоточены на рассмотрении только первой зоны до достижения  $Rz_{уст}$ . Последующая обработка во второй зоне представлялась нецелесообразной, т.к. не изменяла параметр шероховатости.

Однако, учитывая, что величина снимаемого слоя материала при обработке зачастую составляет от 3 до 12 мкм, при допуске на размер порядка 0,008 мм, может быть целесообразно обеспечивать на финишных операциях не только шероховатость поверхностей, но и ее точность размеров и формы осуществляя размерную обработку. Поэтому необходимо рассматривать совместное изменение шероховатости поверхности и размеров заготовки.

Нелинейное изменение шероховатости поверхности и размера заготовки в первой зоне обработки связано со срезанием вершин микронеровности и зависит от формы исходной шероховатости. При этом можно предположить, что изменение размера заготовки будет соизмеримо с изменением параметра  $Rz$  шероховатости поверхности и будет описываться формулой (1):

$$\Delta h_{ш} = Rz_0 - Rz_{уст} \quad (1)$$

где  $\Delta h_{ш}$  – изменение размера заготовки в зоне изменения шероховатости поверхности, мкм;  $Rz_0$  – исходная шероховатость поверхности, мкм;  $Rz_{уст}$  – установившаяся шероховатость поверхности, мкм.

В результате анализа существующих математических моделей обработки свободным абразивом выдвинута гипотеза, что на интенсивность изменения размера заготовки в наибольшей степени влияют давление в зоне резания, твердость поверхности заготовки и зернистость абразивного материала. Изменение размера во второй зоне имеет линейную зависимость и описывается формулой (2):

$$\Delta h(t) = A \cdot P \cdot K_{HRC} \cdot t \quad (2)$$

где  $A$  – абразивность материала, мкм/мин·Па;  $P$  – давление абразивного материала на заготовку, Па;  $K_{HRC}$  – коэффициент, учитывающий твердость поверхности заготовки;  $t$  – время обработки, мин.

При этом скорость изменения размера заготовки можно описать формулой (3):

$$tg(\beta) = A \cdot P \cdot K_{HRC} \quad (3)$$

где  $\beta$  – угол, характеризующий скорость изменения размера заготовки, град.



Давление абразивного материала на заготовку можно определить исходя из кинематики движения абразивного материала относительно заготовки (Рисунок 3).

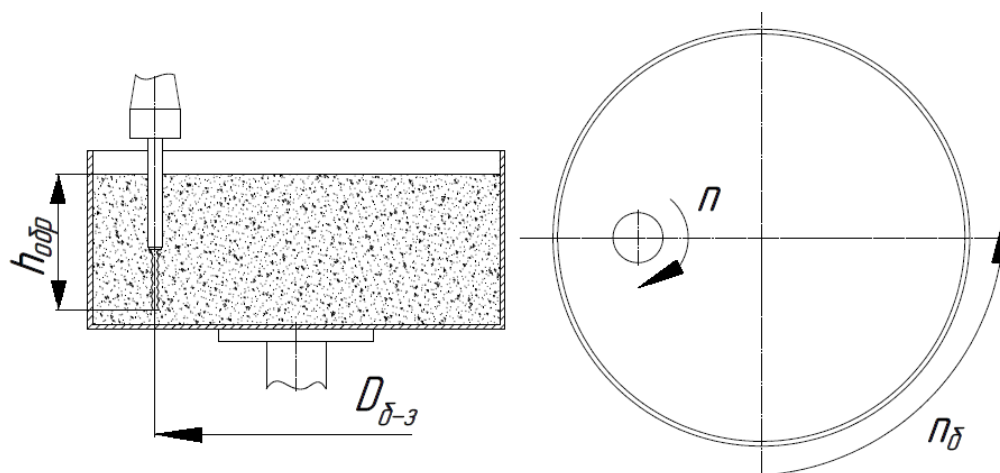


Рисунок 3. Схема обработки потоковой галтовкой

При обработке потоковой галтовкой управляемыми технологическими параметрами являются скорость потока абразивного материала, зависящая от частоты вращения барабана ( $n_b$ ), глубина обработки ( $h_{обр}$ ) и время обработки. Частота вращения заготовки ( $n$ ) является вспомогательным движением. Это обуславливает необходимость разделения давления абразивного материала на две составляющие: статическое давление (возникает от давления массы абразивного материала и зависит от глубины обработки) и динамическое давление (возникает от импульсов гранул абразивного материала и зависит от скорости потока).

Абразивный материал по определению является сыпучей средой. Это позволяет рассматривать абразивный материал с точки зрения динамики движения сыпучих тел. В таком случае статическое давление ( $P_{ст}$ ) распределяется прямо пропорционально высоте засыпки абразивного материала (Рисунок 4).

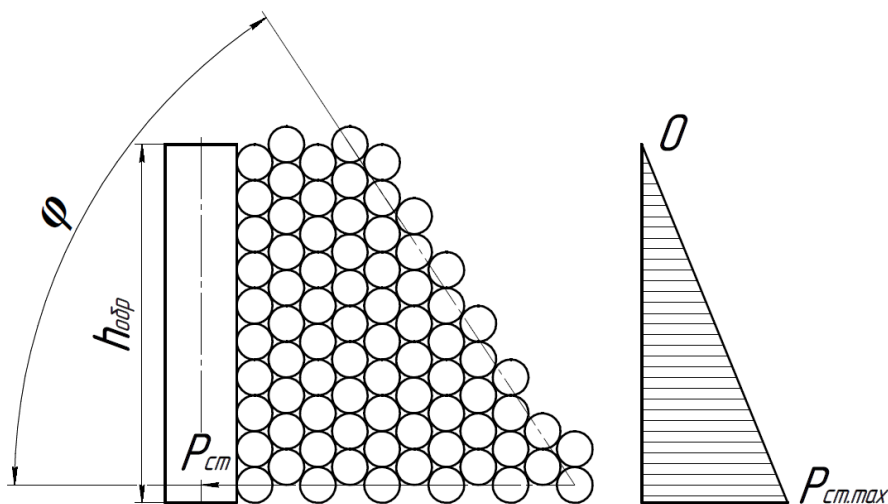


Рисунок 4. Схема распределения статического давления в зависимости от глубины обработки в абразивном материале

Исходя из представленной схемы статическое давление [Па] определяется по следующей формуле:

$$P_{ст} = \gamma \cdot h_{обр} \cdot K \quad (4)$$

$\gamma$  – удельный вес абразивного материала, Н/м<sup>3</sup>;  $h_{обр}$  – глубина обработки, мм;  
 $K$  – коэффициент бокового давления абразивного материала.

Коэффициент бокового давления материала определяется по формуле (5):

$$K = tg^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) \quad (5)$$

где  $\varphi$  – угол внутреннего трения или угол естественного откоса.

Динамическую составляющую давления абразивного материала можно определить по закону Паскаля учитывая, что масса абразивного материала будет определяться как сумма масс гранул абразивного материала, находящихся в контакте с заготовкой за определенный промежуток времени, так как абразивный материал контактирует с заготовкой непрерывным потоком (Рисунок 5).

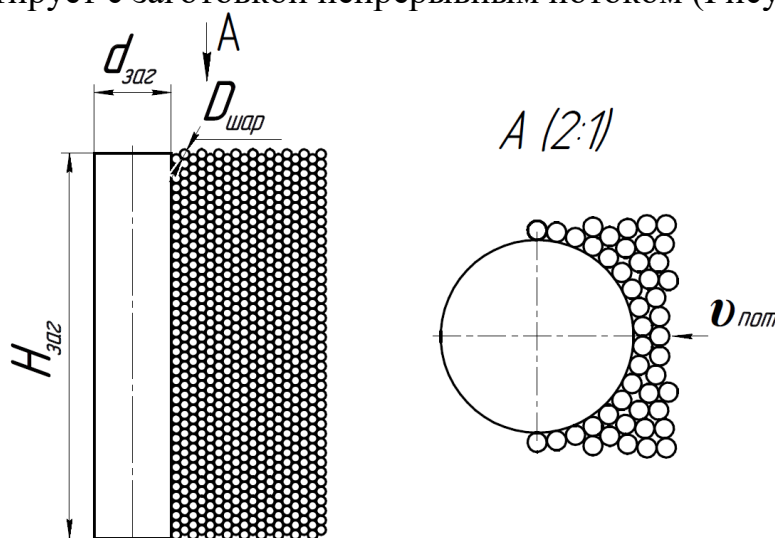


Рисунок 5. Схема распределения гранул, находящихся в контакте с заготовкой

Количество гранул, находящихся в контакте с заготовкой равно:

$$N(t) = \frac{H_{заг} \cdot d_{заг} \cdot v_{пот} \cdot t}{D_{шар}^3 \cdot 2} \quad (6)$$

где  $N(t)$  – количество гранул, находящихся в контакте с заготовкой, шт·мин;  
 $H_{заг}$  – длина заготовки, мм;  $d_{заг}$  – диаметр заготовки, мм;  $v_{пот}$  – скорость потока абразивного материала, м/мин;  $t$  – время обработки, мин;  $D_{шар}$  – диаметр гранулы абразивного материала, мм.

Исходя из этого, динамическое давление, действующее на заготовку во время обработки, Па:

$$P_{дин} = \frac{m_{гр} \cdot v_{пот}^2}{D_{шар}^3} \quad (7)$$

Тогда, давление абразивного материала, действующее на заготовку при обработке, Па:

$$P = P_{\text{ст}} + P_{\text{дин}} = \gamma \cdot h_{\text{обр}} \cdot tg^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) + \frac{m_{\text{гр}} \cdot v_{\text{пот}}^2}{D_{\text{шар}}^3} \quad (8)$$

В конечном итоге можно выразить следующую формализованную математическую модель размерной обработки потоковой галтовкой, позволяющую определить изменение размера заготовки в любом сечении в зависимости от режимов и времени обработки:

$$\Delta h(t) = (Rz_0 - Rz_{\text{уст}}) + A \cdot \left( \gamma \cdot h_{\text{обр}} \cdot tg^2(45^\circ - \frac{\varphi}{2}) + \frac{m_{\text{гр}} \cdot v_{\text{пот}}^2}{D_{\text{шар}}^3} \right) \cdot K_{HRC} \cdot t \quad (9)$$

Таким образом, для прогнозирования изменения размера в процессе обработки необходимо эмпирически определить значение абразивности материала и коэффициента твердости. В случае, если используется конкретное сочетание материала заготовки и материала абразива, то величина съема материала в определенном сечении зависит только от времени обработки и давления потока абразива, определяемого глубиной обработки и режимами обработки.

Для определения абразивности материала необходимо обработать образцы известного размера при заданном давлении и твердости поверхности образца в течении заданного времени обработки. После обработки проводят измерение образцов и вычисляют абразивность материала по формуле:

$$A = \frac{D_{\text{обр.исх}} - D_{\text{обр}}}{t \cdot P} \quad (10)$$

где  $D_{\text{обр.исх}}$  – диаметр образца до обработки, мкм;  $D_{\text{обр}}$  – диаметр образца после обработки, мкм.

В работе коэффициент твердости не рассматривался, так как проводится обработка образцов из одного материала с одинаковой твердостью поверхности. Материал образцов сталь 12Х18Н10Т выбрана эталоном с коэффициентом твердости равным единице. Характеристики используемых при обработке абразивных материалов представлен в Таблице 1.

Таблица 1.

Характеристика абразивов при обработке аустенитных нержавеющей сталей

| Абразив                                    | $Rz_{\text{уст}}$ , мкм | $A$ , мкм/мин·кПа |
|--|-------------------------|-------------------|
| Керамические шарики Ball MC диаметром 4 мм | 0,6                     | 0,192             |
| Скорлупа ореха Н2/100                      | 0,2                     | 0,08              |
| Скорлупа ореха Н1/300                      | 0,05                    | 0,05              |

Исходя из проведенных теоретических исследований разработана методика проектирования ТП финишной обработки заготовок потоковой галтовкой (Рисунок 6).

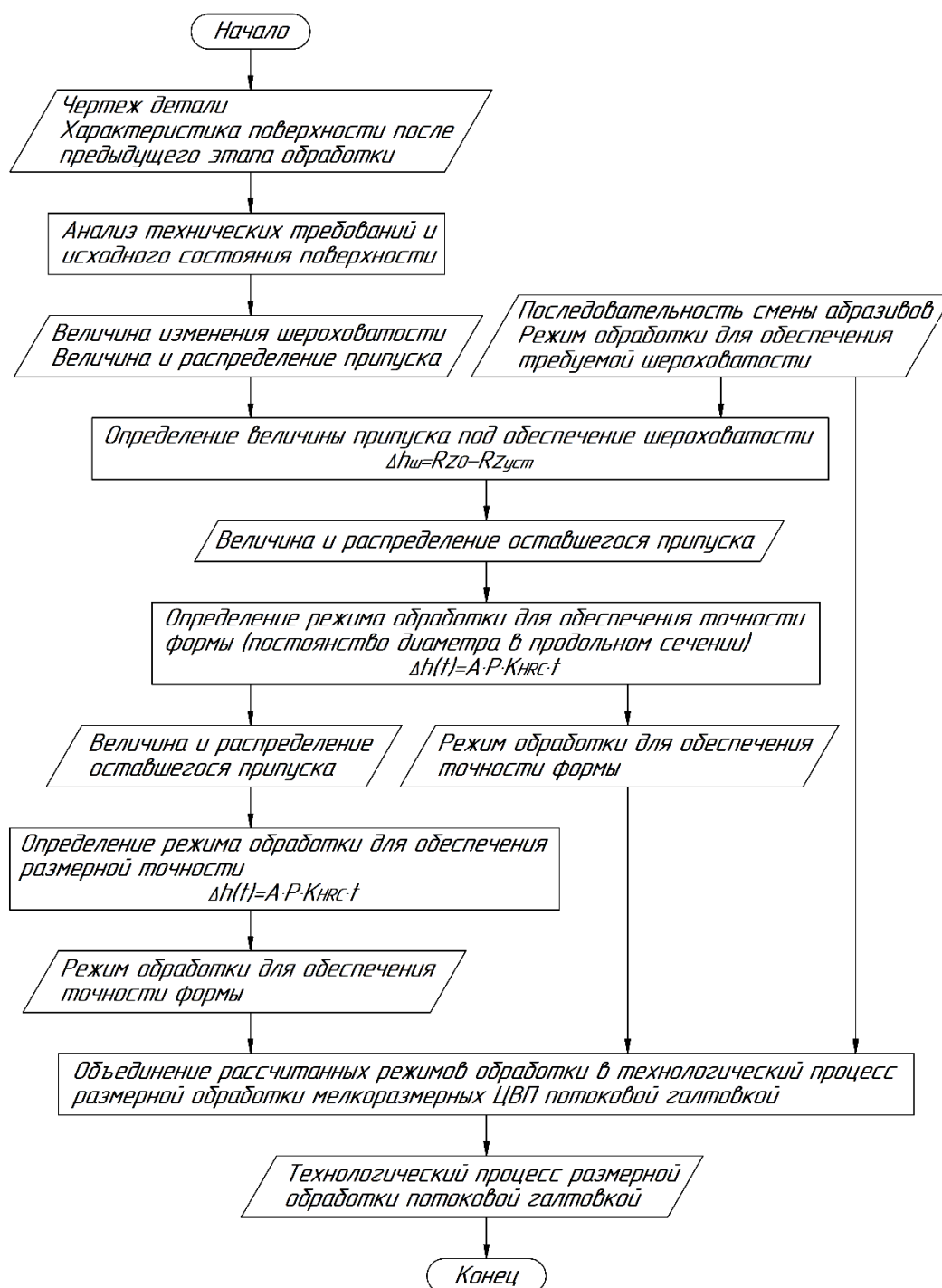


Рисунок 6. Методика проектирования ТП размерной обработки потоковой галтовкой

В Главе 3 приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение гипотезы о зависимости давления абразивного материала от скорости потока и глубины обработки и разработанной на её основе математической модели и методики проектирования ТП, обеспечивающего качество изготовления мелкоразмерных ЦВП.

Эксперимент проводился на лабораторной установке для потоковой галтовки. В качестве образцов использовались прутки Ø6 мм и длиной 150 мм из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т и абразивный материал керамические шарики Ball

МС диаметром 4 мм. Измерения проводились микрометром гладким электронным Shan МКЦ 0-25 0.001 в 9 точках каждого образца, расположенных на разных глубинах обработки в абразивном материале с шагом 10 мм.

В результате проведенного эксперимента получена зависимость диаметрального изменения размера от скорости потока абразивного материала и глубины обработки для времени обработки 30 минут (Рисунок 7, а). По (10) определено диаметральное изменение размера для тех же входных величин (Рисунок 7 б).

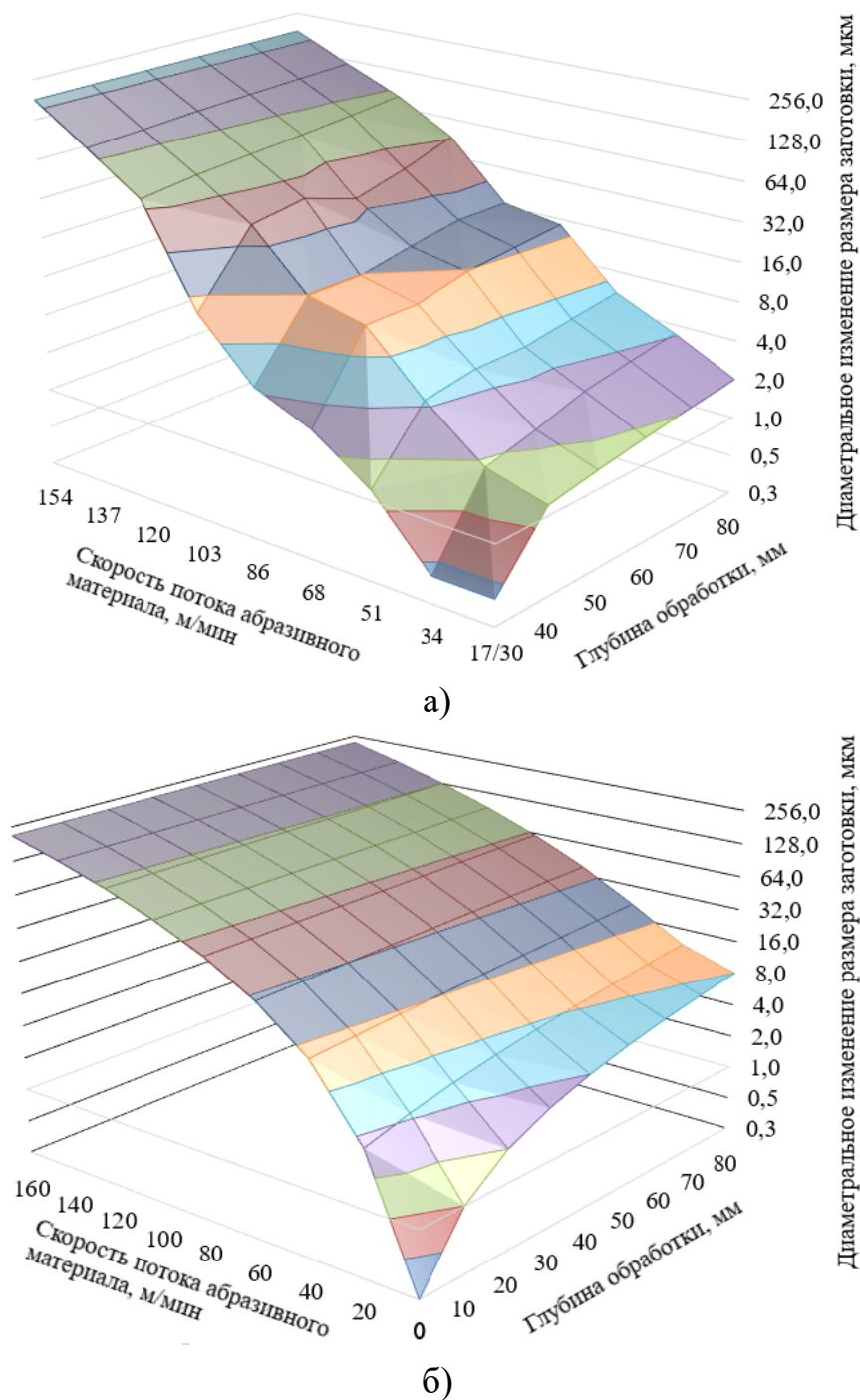


Рисунок 7. Экспериментальная (а) и теоретическая (б) зависимости диаметрального изменения размера от скорости потока абразивного материала и глубины обработки

Сопоставляя экспериментальные и теоретические результаты получено, что полученные значения близки: коэффициент корреляции около 0,77, что соответствует высокому уровню интенсивности корреляционных связей в соответствии со шкалой Чеддока, а наибольшее относительное отклонение фактических значений от рассчитанных не превышает 50%. Это подтверждает выдвинутую ранее гипотезу о пропорциональности давления со стороны абразивного материала и интенсивности съема материала.

Также можно отметить, что от поверхности абразивного материала до глубины обработки до 30 мм изменения диаметрального размера практически отсутствует, по сравнению с изменением размера на больших глубинах обработки. Это вызвано разбросом абразивного материала из-за соударения с заготовкой, что ведет к значительному снижению давления абразивного материала на заготовку и соответственно отсутствию процессов резания.

В таком случае стоит ввести граничное значение по глубине обработки: обработку потоковой галтовкой следует проводить на глубине обработки заготовки в абразивном материале больше 30 мм.

При таком ограничении коэффициент корреляции равен 0,96, а относительное отклонение не более 20%, что соответствует весьма высокому уровню интенсивности корреляционных связей в соответствии со шкалой Чеддока.

Анализ полученных зависимостей показал, что, при небольшом значении скорости абразивного потока ( $v = 10 \dots 50$  м/мин) изменение размера заготовки сильно зависит от глубины обработки (Рисунок 8, а), что позволяет управляемо изменять форму заготовки. При увеличении скорости абразивного потока до величин  $120 \dots 160$  м/мин размерное изменение заготовки практически не зависит от глубины обработки (Рисунок 8, б). Это позволяет осуществлять корректировку размера заготовки оставляя достигнутую ранее форму без изменений.

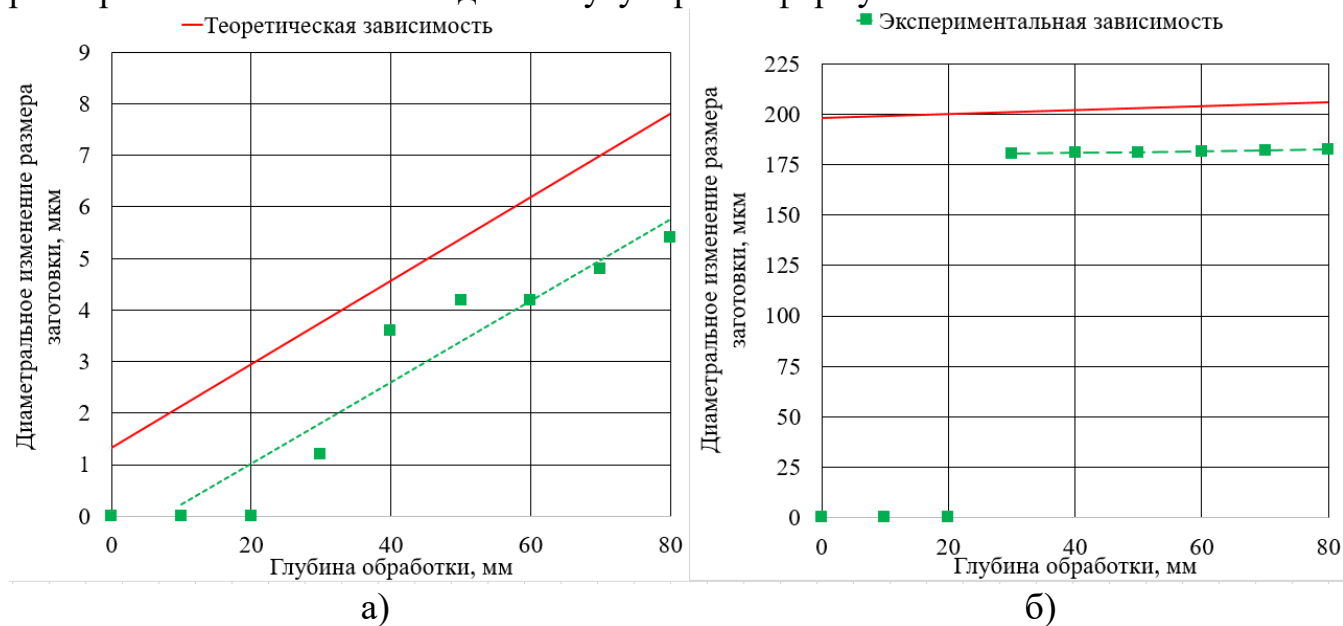


Рисунок 8. Влияние глубины обработки на изменение диаметрального размера при скорости потока абразивного материала 34 м/мин (а) и 154 м/мин (б).

Разработанная методика проектирования ТП финишной обработки мелкоразмерных ЦВП была проверена на 10 образцах роторов диаметром сечения 4,8 мм длиной циклоидальной винтовой поверхности 50,1 мм и эксцентриситетом 0,6 мм из аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T. Использовались следующие абразивные материалы керамические шарики Ball MC диаметром 4 мм, скорлупа ореха H2/100 размером гранул 1,7-2,4 мм, скорлупа ореха H1/300 размером гранул 0,8-1,3 мм. Измерения проводились на специальном контрольно-измерительном приспособлении для измерения диаметра роторов с индикатором SHANE GS-5321-10-4/GS-5321-10-7 для каждого образца диаметр измеряли в 3 сечениях. Шероховатость поверхности измерялась на контурографе M.ERA PLATINUM D1-1542 щупом rs-ztr-ir-01 с радиусом при вершине 5 мкм.

Результаты обработки приведены в Таблица 2.

Таблица 2.

Параметры качества образцов

| Номер образца                                | Max диаметр образца, мм | Min диаметр образца, мм | Отклонение ПДПС, мм | Шероховатость поверхности образца, Ra мкм |
|--|-------------------------|-------------------------|---------------------|---|
| 1  | 4,807                   | 4,805                   | 0,002               | 0,06                                      |
| 2  | 4,808                   | 4,804                   | 0,004               | 0,05                                      |
| 3  | 4,806                   | 4,803                   | 0,003               | 0,05                                      |
| 4  | 4,807                   | 4,802                   | 0,005               | 0,04                                      |
| 5  | 4,808                   | 4,804                   | 0,004               | 0,06                                      |
| 6  | 4,806                   | 4,804                   | 0,002               | 0,06                                      |
| 7  | 4,804                   | 4,802                   | 0,002               | 0,06                                      |
| 8  | 4,807                   | 4,804                   | 0,003               | 0,05                                      |
| 9  | 4,805                   | 4,802                   | 0,003               | 0,05                                      |
| 10   | 4,804                   | 4,802                   | 0,002               | 0,06                                      |
| Наибольший / наименьший размер в партии, мм  |                         |                         |                     | 4,808 / 4,802                             |
| Допуск на размер в партии (квалитет), мм     |                         |                         |                     | 0,006 (IT6)                               |
| Наибольшее отклонение ПДПС, мм               |                         |                         |                     | 0,005                                     |
| Наибольшая шероховатость поверхности Ra, мкм |                         |                         |                     | 0,06                                      |

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что разработанная математическая модель обработки потоковой галтовкой позволяет прогнозировать и управлять размерной обработкой заготовок, а предложенная методика проектирования ТП обработки циклоидальных винтовых поверхностей обеспечивает требуемые технические требования: точность размера и формы, шероховатость поверхности.

**В Главе 4** приведены результаты экспериментально-производственной апробации применения методики проектирования ТП, обеспечивающего качество изготовления мелкоразмерных ЦВП. Рассмотрено практическое применение результатов исследования.



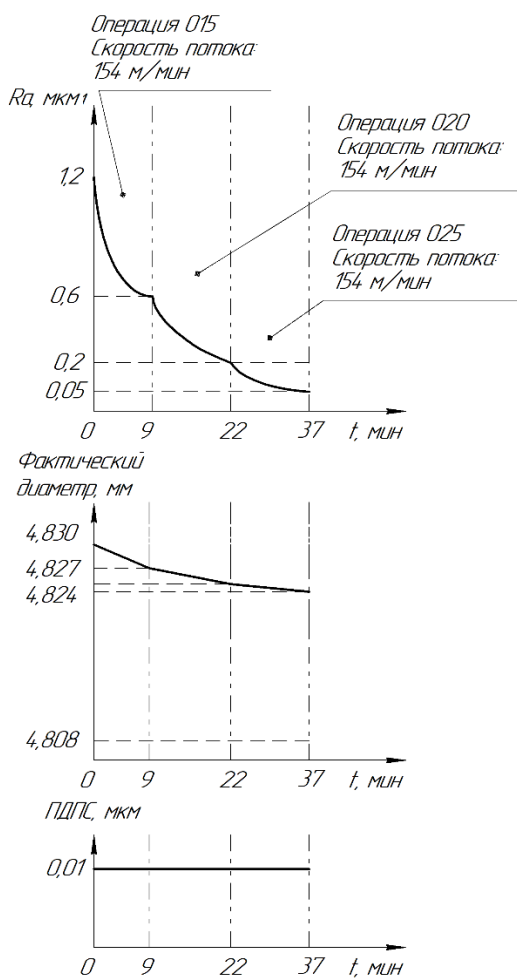
На основе разработанной методики проектирования ТП финишной обработки заготовок потоковой галтовкой переработан технологический процесс финишной обработки мелкогазовых роторов одновинтового дозатора.

Ротор имеет следующие технические требования: диаметр  $4,8^{+0,008}$  мм, отклонение ПДПС не более 0,005 мм, шероховатость поверхности по параметру Ra 0,06 мкм.

Основное формообразование ротора осуществляется лезвийной обработкой до Ra 1,2 мкм. Особенностью предварительной обработки является то, что циклоидальная винтовая поверхность приобретает отклонение от ПДПС до 0,01 мм.

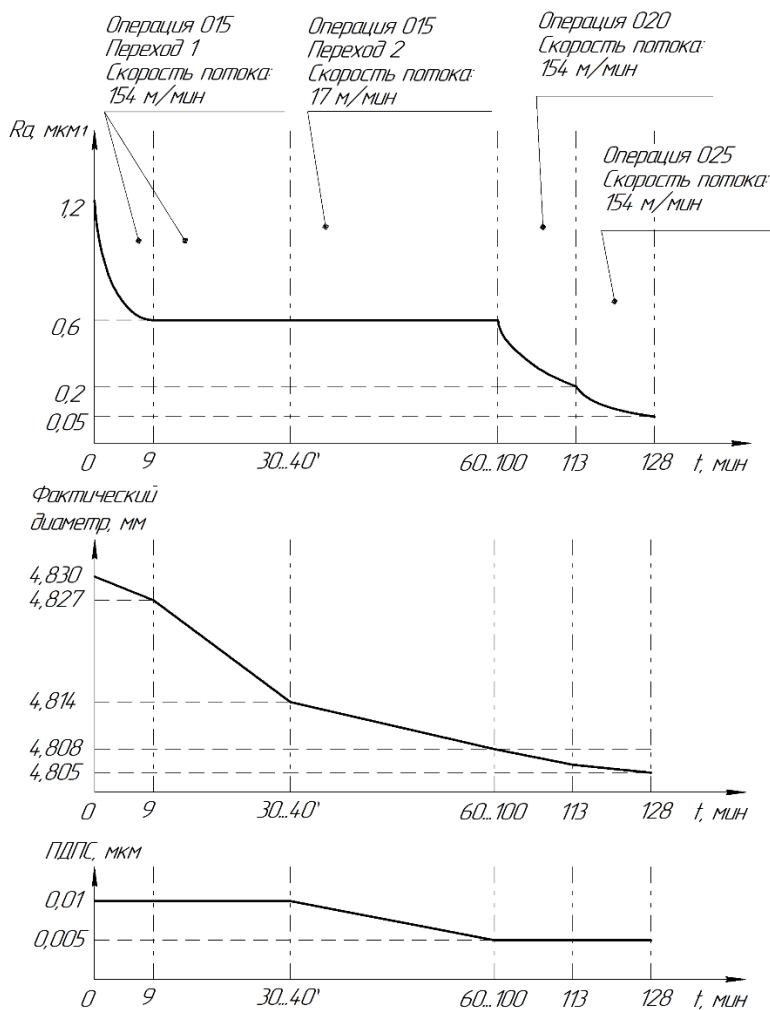
В базовом ТП на финишном этапе применяют последовательную галтовку в трех абразивных материалах, обеспечивающих грубую шлифовку (операция 015: керамический абразив Ball MC Ø4 мм), тонкую шлифовку (операция 020: гранулы скорлупы ореха H2/100) и полирование поверхности (операция 025: гранулы скорлупы ореха H1/300). Такой технологический процесс рекомендует производитель оборудования и абразивного материала для галтовки. При этом обеспечивают заданную шероховатость поверхностей (Рисунок 9, а).

*Базовый технологический процесс*



а)

*Разработанный технологический процесс*



б)

Рисунок 9. Базовый (а) и разработанный (б) ТП обработки потоковой галтовкой.



Так как, помимо обеспечения заданной шероховатости необходимо обеспечить размерную точность и заданное отклонение ПДПС, то необходимо добавить дополнительную обработку во второй зоне галтовки. Для повышения производительности это следует выполнять в более грубом абразивном материале. Поэтому в операцию 015 в переходе 1 увеличено время обработки для обеспечения размерной точности и добавлен переход 2 для обеспечения заданного постоянства диаметра в продольном сечении (Рисунок 9, б), выполняемый на режимах, обеспечивающих скорость абразивного потока  $v_{\text{пот}} = 17$  м/мин.

Для повышения точности размеров в переходе 1 операции 015 обработка дополнительно ведется в зоне установившейся шероховатости поверхности при высокой скорости абразивного потока  $v_{\text{пот}} = 154$  м/мин. Время обработки зависит от фактических размеров заготовки, что позволяет уменьшить разброс размеров в партии заготовок.

Таким образом в измененном ТП финишную обработку можно разделить на три составляющие: исправление погрешности формы (обработка ведется в абразивном материале для грубого шлифования), обеспечение размерной точности (обработка ведется в абразивном материале для грубого шлифования на наиболее производительном режиме) и обеспечение шероховатости поверхности (обработка ведется в трех абразивных материалах на наиболее производительных режимах) (Рисунок 7, б).

Разработанная методика была внедрена в ТП изготовления роторов в ООО «ПК «МОНОРОТОР». Проводилась изготовление роторов прецизионных одновинтовых дозаторов высоковязких веществ из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т с циклоидальной винтовой поверхностью диаметром 4,8 мм, длиной 50,1 мм и эксцентриситетом 0,6 мм.

Измерения параметров качества заготовок и готовых деталей выполнялись аналогично образцам, см. Главу 3.

Полученные результаты представлены в Таблице 3.

Таблица 3.

Результаты обработки сравниваемых технологических процессов

|   | Базовый ТП | Разработанный ТП |
|---|------------|------------------|
| Диаметр ротора, мм                                    | 4,82±0,01  | 4,804±0,003      |
| Отклонение ПДПС, мм                                   | 0,012      | 0,005            |
| Шероховатость поверхности, Ra мкм                     | 0,06       | 0,06             |
| Давление, создаваемое рабочими органами дозатора, МПа | 3,61..5,29 | 5,14..5,6        |
| Амплитуда колебания давления, МПа                     | 1,68       | 0,46             |

Анализируя полученные результаты видно, что оба ТП обеспечивают заданную шероховатость поверхности. При этом обработка по предложенной методике обеспечивает заданное требование по точности диаметрального размера и отклонению ПДПС, в то время как при классической обработке диаметральный размер и отклонение ПДПС выходят за пределы поля допуска. Обработка роторов по предложенной методике обеспечения качества мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей позволяет повысить точность в 2 раза.

Проведено исследование влияния ТП обработки роторов одновинтовых дозаторов «МОНОРОТОР 48» на рабочее давление, создаваемое рабочим органом. Исследование проводилось компанией ООО «ПК «МОНОРОТОР» на собственном испытательном стенде на изделиях с роторами, обработанными по базовому ТП и обработанным по разработанному ТП с использованием предложенной методики.

Для проведения эксперимента использовались одновинтовые дозаторы с роторами из аустенитной нержавеющей стали 12Х18Н10Т с циклоидальной винтовой поверхностью диаметром 4,8 мм, длиной 50,1 мм и эксцентриситетом 0,6 мм.

Результаты экспериментального исследования по измерению давления приведены в Таблице 3.

Анализируя полученные данные видно, что среднее давление, создаваемое рабочими органами одновинтового дозатора, повысилось на 20 %, а амплитуда пульсации давления снижена в 3,5 раза. Соответственно обработка роторов по доработанному технологическому процессу позволяет повысить эксплуатационные характеристики высокоточных одновинтовых дозаторов.

Практическое применение предложенной математической модели обработки потоковой галтовки и методики проектирования ТП, обеспечивающего качество поверхностей возможно для:

- Повышения качества изделий, доработкой существующих ТП
- Проектирования новых ТП обработки потоковой галтовкой
- Проектирования ТП размерной обработки ответственных сложнопрофильных поверхностей (например, деталей газотурбинных двигателей)
- Внедрения алгоритмов в системы управления оборудованием
- Классификации и нормирования абразивных материалов.

### **Общие выводы по диссертации**

1. Проведенный анализ современного состояния изготовления мелкогабаритных ЦВП показал актуальность научной задачи технологического обеспечения качества изготовления таких поверхностей обработкой свободным абразивом, в частности, потоковой галтовкой, имеющей важное значение для машиностроения РФ.
2. Существующие подходы к проектированию ТП финишной обработки потоковой галтовкой не позволяют обеспечить все технические требования, предъявляемые к мелкогабаритным циклоидальным винтовым поверхностям, что показывает необходимость в разработке технологических подходов к проектированию ТП размерной обработки мелкогабаритных ЦВП потоковой галтовкой, позволяющих обеспечить заданные технические требования.
3. Разработана аналитическая модель процесса размерной обработки потоковой галтовкой, позволяющая прогнозировать изменения размеров и формы поверхности заготовки при заданной величине шероховатости, что обеспечивает точность размеров в соответствии с 6 качеством точности.
4. Анализ аналитической модели позволил определить влияние скорости потока абразивного материала и глубины обработки на интенсивность изменения размера заготовки. Теоретически показана возможность управления процессом потоковой галтовки как для исправления формы заготовки, так и для стабильного изменения

её размера, что позволяет снизить отклонение постоянства диаметра в продольном сечении роторов высокоточных одновинтовых дозаторов в два раза.

5. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность разработанной модели реальному процессу потоковой галтовки. Коэффициент корреляции теоретических и экспериментальных результатов равен 0,96 при наибольшем относительном отклонении 20%.

6. Экспериментально определены значения абразивности для различных абразивных материалов, применяемых при потоковой галтовке аустенитных нержавеющей сталей, что позволяет спрогнозировать динамику изменения размеров заготовки в процессе обработки и определить необходимые для достижения заданных параметров качества режимы обработки.

7. На основании проведенных исследований разработана и внедрена методика проектирования ТП обработки потоковой галтовкой, позволяющая обеспечить требуемые точности размеров и формы мелкоразмерных циклоидальных винтовых поверхностей.

8. Практическая реализация разработанной методики позволила обеспечить повышение точности формы роторов высокоточных одновинтовых дозаторов и повышение точности размеров в 2 раза по сравнению с базовым вариантом технологического процесса при обеспечении заданной шероховатости поверхности Ra 0,06 мкм, что позволило повысить давление одновинтовых дозаторов на 20 % при одновременном снижении амплитуды его пульсации в 3,5 раза.

9. Теоретически и экспериментально установлено, что процессы потоковой галтовки следует проектировать с учетом изменения размеров заготовки, а режимы и время обработки необходимо назначать исходя из поставленных технологических задач: обеспечение точности размеров, формы или шероховатости поверхности.

### **Основные публикации по теме диссертации**

#### **Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ:**

1. Современные методы финишной обработки циклоидальных винтовых поверхностей / П. Д. Акулиничев [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. 2021. № 9(294). С. 3-11. (1,3 п.л./1,1 п.л.)

2. Современные методы отделочно-упрочняющей обработки циклоидальных винтовых поверхностей / П. Д. Акулиничев [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 11(308). С. 16-23. (1,15 п.л./0,3 п.л.)

3. Акулиничев П. Д., Альбов М. А., Гончаров А. А. Современные математические модели обработки свободным абразивом // Справочник. Инженерный журнал. 2023. № 8(317). С. 11-16. (0,9 п.л./0,7 п.л.)

4. Акулиничев П. Д., Альбов М. А., Гончаров А. А. Анализ влияния динамического воздействия абразивного материала на заготовку при обработке сложнопрофильных поверхностей потоковой галтовкой // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2024. № 2 (767). С. 44-51. (1,15 п.л./0,95 п.л.)

5. Одновинтовой микродозатор: пат. 2020113087 Рос. Федерация. № 2740725 С1 / Акулиничев П.Д. [и др.]; заявл. 08.04.2020; опубл. 20.01.2021. Бюл. №2. 7 с.