

На правах рукописи

Альбов Максим Александрович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ВНУТРЕННИХ
ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ОБЪЁМНЫХ ОДНОВИНТОВЫХ МАШИН ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2025

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный

руководитель:

Гончаров Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологии машиностроения» ФГАОУ ВО «Московский государственный университет имени Н. Э. Баумана»

Официальные

оппоненты:

Зверовщиков Александр Евгеньевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологии и оборудование машиностроения» ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет»

Лебедев Валерий Александрович

Кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Ведущая

организация:

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II»

Защита состоится «__» _____ 2026 г. _____ на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 в ФГАОУ 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.

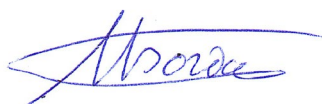
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» и на сайте www.bmstu.ru.

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

Автореферат разослан «_____» _____ 2026 г.

Ученый секретарь совета

к.т.н., доцент



Богданов А.В.

Актуальность работы

Снижение себестоимости продукции и повышение её качества в современном производстве достигается за счёт повышения степени автоматизации производственных процессов и внедрения интеллектуальных производственных систем. В условиях автоматического производства неизбежно возникает необходимость автоматизированной и бесперебойной подачи жидких технологических сред. Особенно актуальна задача автоматизированной транспортировки жидкостей в химической, нефтегазовой, фармацевтической, оборонной и других отраслях, где важно обеспечить программно-управляемую подачу жидкой среды с различными реологическими и химическими свойствами.

Для решения таких задач применяют одновинтовые насосы – машины объёмного типа, позволяющие реализовать программное управление параметрами процесса транспортирования жидких и вязких сред (скорость потока, давление, объём). В некоторых источниках одновинтовой насос называют просто винтовым или героторным. В нефтяной промышленности этот класс оборудования называется винтовым забойным двигателем. В настоящей работе будет использоваться термин «одновинтовой насос» или просто «насос». Возможность работы таких насосов с различными средами, в том числе и с химически агрессивными, обеспечивается за счёт изготовления рабочих органов из химически стойких материалов: высоколегированных коррозионностойких аустенитных нержавеющей сталей (материал ротора и корпусных частей) и фторполимеров - перфторированных каучуков, фторопластов (материал обоймы и уплотнений).

Наиболее ощутимой долей затрат при эксплуатации одновинтовых насосов является периодическая замена полимерной обоймы, поскольку именно износ этой детали провоцирует выход насоса из строя в 87% случаев. Производители насосов называют эту деталь по-разному: статор, обкладка, втулка и др. В данной работе будет использоваться термин „обойма“. Обойма является весьма дорогостоящей деталью насоса, что объясняется высокой стоимостью исходного сырья, а также значительной трудоемкостью формообразования винтового отверстия, обусловленной особенностями технологии переработки перфторкаучуков. В качестве более доступного и выгодного решения применяются обоймы из фторопласта. Эти обоймы появились на рынке недавно и производятся несколькими зарубежными компаниями: Heishin, Netzsch, National Oilwell Varco. Однако распространение фторопластовых обойм ограничено отсутствием доступных технологических решений.

Поэтому исследования, связанные с разработкой технологических подходов, позволяющих снизить себестоимость производства обойм одновинтовых насосов, содержащих внутренние **циклоидальные винтовые поверхности (ЦВП)**, являются важным направлением развития отечественного насосного оборудования и обеспечивают технологический суверенитет РФ.

Цель работы: Снижение затрат при производстве деталей объёмных одновинтовых машин, содержащих внутренние многозаходные циклоидальные винтовые поверхности, за счёт применения метода лезвийной обработки.

Основные задачи исследования:

1. Провести анализ технологических возможностей современных методов формообразования внутренней ЦВП.

2. Предложить метод лезвийной обработки внутренней ЦВП и разработать математическую модель его кинематики.
3. Предложить обкаточный однолезвийный режущий инструмент, обеспечивающий возможность реализации метода лезвийной обработки внутренней ЦВП.
4. Разработать методику проектирования режущего инструмента для реализации метода лезвийной обработки внутренней ЦВП, обеспечивающую изготовление детали с заданной шероховатостью и точностью формы.
5. Разработать методику измерения величины отклонения формы заданного профиля поперечного сечения внутренней ЦВП обойм одновинтовых насосов.
6. Разработать математическую модель зависимости шероховатости и отклонения формы заданного профиля внутренней ЦВП от режимов обработки.
7. Разработать рекомендации по выбору режимов обработки для реализации метода лезвийной обработки внутренней ЦВП, обеспечивающих изготовление детали с заданной шероховатостью и допуском формы внутренней поверхности.
8. Провести экспериментальное подтверждение влияния осевой подачи инструмента на шероховатость и отклонение формы поперечного сечения внутренней ЦВП, полученной методом лезвийной обработки.
9. Провести исследование эксплуатационных характеристик обойм одновинтового насоса, полученных методом лезвийной обработки внутренней ЦВП.
10. Провести оценку экономической эффективности предложенной технологии изготовления обойм одновинтовых насосов.

Объект исследования – технология обработки внутренних мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей, обеспечивающая снижение себестоимости рабочих органов одновинтовых насосов.

Предметная область исследования – лезвийная обработка внутренних мелкогабаритных циклоидальных винтовых поверхностей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Выявлена зависимость величины отклонения формы заданного профиля поперечного сечения внутренней ЦВП обоймы одновинтового насоса от осевой подачи инструмента при методе лезвийной обработки.
2. Выявлена зависимость величины шероховатости внутренней ЦВП обоймы одновинтового насоса от осевой подачи инструмента при методе лезвийной обработки.
3. Разработана методика проектирования инструмента для метода лезвийной обработки внутренних ЦВП.
4. Доказана возможность реализации метода лезвийной обработки внутренних ЦВП, который обеспечивает шероховатость R_{max} менее 6,3 мкм и отклонение формы заданного профиля поперечного сечения не более 0,1 мм.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Обработка внутренней ЦВП осуществима с помощью обкаточного однолезвийного режущего инструмента на специальном оборудовании с ЧПУ.

2. Предлагаемый метод лезвийной обработки внутренних ЦВП позволяет обеспечить заданные технические требования при формообразовании внутренней ЦВП обойм одновинтовых насосов.
3. Применение лезвийной обработки при производстве обойм одновинтовых насосов из полимерных материалов позволяет сократить производственные издержки и снизить эксплуатационные расходы на ремонт одновинтового оборудования.
4. На основании геометрических характеристик обрабатываемой поверхности осуществимо проектирование сложнопрофильного инструмента, позволяющего обеспечить заданное качество внутренней ЦВП.

Методы исследования и достоверность результатов

Теоретические методы исследования основаны на базе основных положений технологии машиностроения и общепринятом математическом аппарате. В ходе работы была продемонстрирована воспроизводимость результата. Полученные аналитические зависимости согласуются с экспериментальными данными. Достоверность разработанных методик и полученных зависимостей подтверждается работоспособностью в производственных условиях образцов из фторопласта, изготовленных методом лезвийной обработки внутренних ЦВП. Полученные зависимости шероховатости и отклонения формы внутренней ЦВП от осевой подачи профильного инструмента были подтверждены в ходе экспериментального исследования с применением современного цифрового контрольно-измерительного инструмента и оборудования: контурограф-профилометр M.ERA PLATINUM D1-1542 и бесконтактная видеоизмерительная система NORGAU Industrial NVM II-2010i.

Практическая значимость

Разработан метод лезвийной обработки внутренних ЦВП, позволяющий получить рабочую поверхность обойм одновинтовых машин с заданной шероховатостью и точностью формы поперечного сечения. Это обеспечивается за счёт использования специального сложнопрофильного инструмента и аналитических зависимостей, связывающих параметры качества с режимами обработки. Совокупность предложенных технологических подходов к обработке внутренних ЦВП обеспечивает возможность производства в России химически стойких обойм для одновинтовых насосов.

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием методов математической статистики для оценки стабильности показателей качества, получаемых при обработке, а также достаточной репрезентативностью статистических выборок и соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Личный вклад

Все результаты диссертационной работы получены лично автором или при его непосредственном участии в экспериментальных и аналитических исследованиях. Была изготовлена специальная установка, реализующая метод лезвийной обработки внутренних ЦВП на базе лаборатории кафедры «Технологии машиностроения», на которой проводились основные экспериментальные исследования, также в лаборатории кафедры был изготовлен сложнопрофильный

инструмент. Проведено математическое моделирование процесса обработки внутренней ЦВП обкаточным лезвийным инструментом в графическом калькуляторе Desmos и программе Компас 3D. Во всех необходимых случаях заимствования чужих результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Апробация работы

Основные положения диссертации докладывались на XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 24-27 сентября 2019 г.); конференции Modern Power Engineering (MPME 2020) (Москва, 8 сентября 2020 г.); Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского (Москва, 14 февраля 2020 г.); XIV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (Москва, 21-24 сентября 2021 г.); научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки и техники Российской Федерации, доктора технических наук, профессора А.А. Рыжкина (Ростов-на-Дону, 21 января 2022 г.); 15-ой Международной научно-технической конференции «Наукоемкие технологии в машиностроении» (Москва, 1-3 ноября 2023 г.) Основные разделы диссертации докладывались на научных семинарах кафедры технологий машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2021...2025 г.г.

Публикации

По содержанию работы и основным результатам исследования опубликовано пять научных работ, входящих в перечень ВАК РФ, в том числе две статьи в изданиях, входящих в базу данных RSCI, общим объёмом 2,4 п.л. Также получен патент на полезную модель.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Общий объём работы составляет 122 страницы, список литературы содержит 82 наименования.

Содержание работы

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

В Главе 1 проведен обзор и анализ существующих методов формообразования внутренних ЦВП, исследованы технологические возможности методов.

В настоящее время выявлена тенденция применения одновинтовых машин в сложных автоматизированных производственных системах, преимущественно для высокоточной динамически изменяющейся подачи вязких материалов. Производством таких интеллектуальных систем занимаются такие компании как «ViscoTec Pumpen- u Dosiertechnik» (Германия), «Nordson» (США), «HEISHIN Ltd» (Япония), «NETZSCH» (Германия) и другие. Для расширения области применения таких систем производители предлагают продукцию, которая обеспечивает функционирование с широким спектром рабочих сред. Достигается это за счет применения дорогостоящих химически стойких материалов рабочих органов одновинтовых машин.

Изготовление героторной пары одновинтовой машины является сложной технологической задачей, поэтому передовые компании не разглашают свои инновации в этом направлении, тем самым защищая себя технологическим барьером в сфере производства автоматизированных систем подачи материалов. В связи с этим на производствах РФ, использующих современное зарубежное оборудование с целью автоматизации производственных процессов, применяются дорогостоящие расходные материалы для одновинтовых насосов, которые не производятся на территории РФ.

Над решением проблемы формообразования рабочих органов одновинтовых машин работали следующие отечественные ученые: Коротаев Ю.А., Чайковский Г.П., Степанов Ю.С., Киричек А.В., Тарапанов А.С., Харламов Г.А., Бородин М.В., Афанасьев Б.И., Фомин Д.С., Брусов А.С., Данилов В.А. В основном в своих трудах авторы делают акцент на методах изготовления ЦВП роторов и литейных стержней, используемых для формообразования внутренней поверхности обоймы.

В результате анализа существующих технологических методов формообразования внутренних сложнопрофильных поверхностей было выявлено, что внутреннюю полимерную часть обоймы зачастую изготавливают методами литья, прессования или экструдирования в форму с применением сложнопрофильного винтового литейного стержня, обладающего геометрией, соответствующей ротору одновинтовой машины. Однако, эти методы предполагают формообразование геометрии отверстия на начальных этапах технологического процесса: в процессе полимеризации или вулканизации. После этого заготовка подвергается нескольким этапам термического воздействия, что оказывает ощутимое влияние на точность получаемой поверхности за счет неравномерной усадки. Это обуславливает необходимость строгого контроля за свойствами и технологией подготовки сырья, необходимость внесения корректировок в геометрию литейных стержней, что значительно увеличивает трудоемкость и как следствие себестоимость производства винтовых обойм с требуемыми параметрами точности винтового отверстия.

Альтернативным вариантом является технологический процесс, при котором формообразование винтовой поверхности осуществляется после этапов полимеризации, спекания, вулканизации и термостатирования материала. В таком случае отверстие формируется лезвийным инструментом в сплошном материале с окончательными физико-механическими свойствами. Это позволяет на этапе механической обработки обеспечивать окончательно заданные технические требования к точности и качеству поверхности, что значительно снижает трудоемкость производства деталей, содержащих внутренние ЦВП. Распространение описанной технологии сдерживается отсутствием рекомендаций по технологической подготовке лезвийной обработки внутренних ЦВП. Это обуславливает техническую значимость и наукоёмкость проведённых исследований.

В Главе 2 представлены аналитические исследования формирования внутренней ЦВП обоймы методом лезвийной обработки, предложена конструкция инструмента, рассчитана геометрия режущей кромки инструмента и его основные режущие углы, разработана методика проектирования инструмента, представлена

математическая модель формирования шероховатости и точности формы поперечного сечения внутренней ЦВП от технологических параметров метода лезвийной обработки, а также предложена методика обработки данных измерения формы поперечного сечения внутренней ЦВП.

Для формообразования внутренней ЦВП ободом был предложен метод лезвийной обработки с двумя вращательными и одним линейным движениями резания согласно кинематической схеме №701 по классификации Г.И. Грановского (Рисунок 1).

В методе лезвийной обработки внутренних ЦВП помимо главного движения резания вращения инструмента $N_{\text{и}}$ присутствует вспомогательное движение вращения заготовки $N_{\text{з}}$, их оси вращения параллельны друг другу и находятся на расстоянии эксцентриситета героторной пары e , а третье поступательное движение подачи D_s осуществляется вдоль оси вращения инструмента или заготовки.

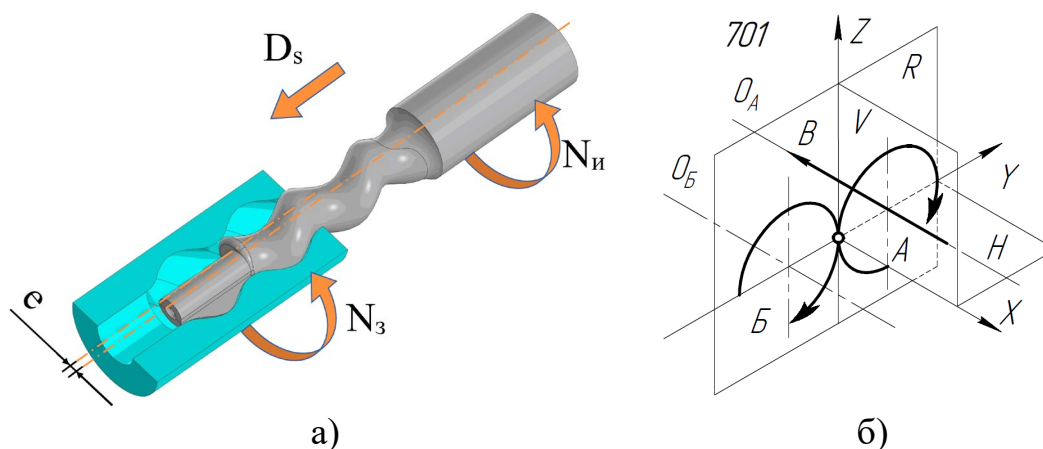


Рисунок 1. Метод лезвийной обработки внутренних ЦВП (а) и его принципиальная кинематическая схема №701 (б)

Соотношение угловой скорости вращения инструмента, угловой скорости вращения заготовки и их относительной прямолинейной скоростью движения описывается следующей кинематической зависимостью:

$$\frac{d\varphi_{\text{и}}}{dt} = 2 \cdot \frac{d\varphi_{\text{з}}}{dt} \cdot \left(1 + \frac{1}{h} \cdot \frac{dx}{dt}\right), \quad (1)$$

где $d\varphi_{\text{и}}$ – угловое смещение инструмента, рад.; $d\varphi_{\text{з}}$ – угловое смещение заготовки, рад.; dx – линейное перемещение инструмента относительно заготовки, мм; dt – приращение времени, с.; h – шаг ЦВП, мм.

С целью обеспечения формирования полного профиля внутренней ЦВП, была определена необходимая геометрия режущей кромки инструмента, которая описывается на передней поверхности инструмента относительно проекции оси его вращения:

$$r_{\gamma}(z) = \cos \gamma \cdot \left(e \cdot \sin \left(\frac{2\pi z}{h} - \frac{\pi}{2} \right) + \sqrt{e^2 \cdot \sin^2 \left(\frac{2\pi z}{h} - \frac{\pi}{2} \right) + \left(\frac{d}{2} \right)^2 - e^2} \right), \quad (2)$$

где γ – главный передний угол, рад.; d – номинальный диаметр ЦВП, мм; h – шаг ЦВП, мм; e – эксцентриситет ЦВП, мм; z – координата вдоль оси инструмента, мм.

Были определены главные режущие углы инструмента. В процессе обработки главный передний и задний кинематические углы инструмента изменяются согласно следующей зависимости:

$$\gamma(\theta) = -\alpha(\theta) = \arccos \left(\frac{\frac{d}{2} - e \cdot \cos \left(\theta \cdot \frac{\pi}{180} \right)}{\sqrt{\frac{d^2}{4} + e^2 - d \cdot e \cdot \cos \left(\theta \cdot \frac{\pi}{180} \right)}} \right) \cdot \frac{180}{\pi}, \quad (3)$$

где θ – угол положения инструмента, градус; d – номинальный диаметр ЦВП, мм; e – эксцентриситет ЦВП, мм.

На основе зависимости (3) назначаются такие значения переднего и заднего углов, чтобы в процессе обработки их величины не опускались ниже рекомендованных для полимерных материалов:

$$\gamma = |\min \gamma(\theta)| + \Delta_\gamma; \quad (4)$$

$$\alpha = \Delta_\alpha, \quad (5)$$

где $\min \gamma(\theta)$ – максимальное отклонение переднего угла в отрицательном направлении, град., Δ_γ – рекомендованное значение переднего угла, град., Δ_α – рекомендованное значение заднего угла, град.

Исходя из заданных параметров героторной пары (h, d, e), рассчитанных параметров инструмента ($r_\gamma(z), \gamma, \alpha$), а также принимая во внимание общепринятые принципы конструирования инструмента, была разработана методика проектирования профильного однолезвийного режущего инструмента для обработки внутренней ЦВП методом лезвийной обработки (Рисунок 2).

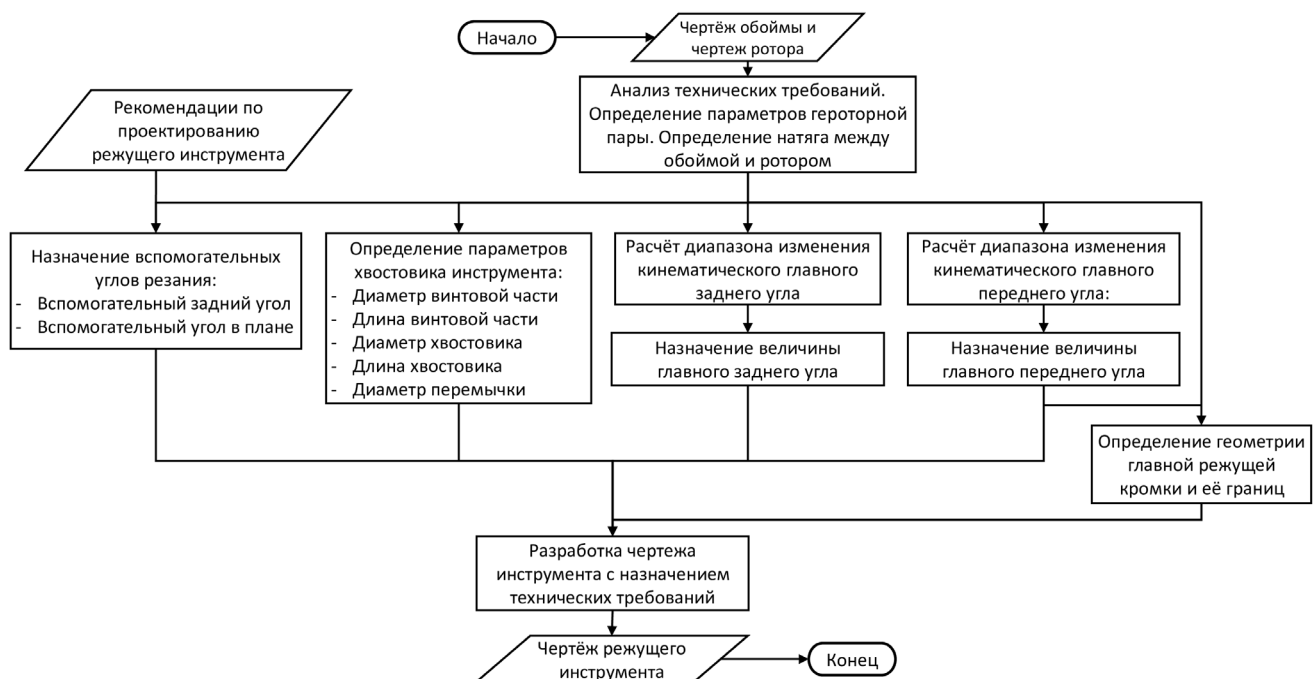


Рисунок 3. Методика проектирования инструмента для метода лезвийной обработки внутренних ЦВП

По предложенной методике был разработан чертеж режущего инструмента под конкретный типоразмер винтовой обоймы с параметрами: эксцентриситет $e = 1,5$ мм; диаметра $d = 9$ мм и шага ЦВП $h = 15$ мм (Рисунок 3).

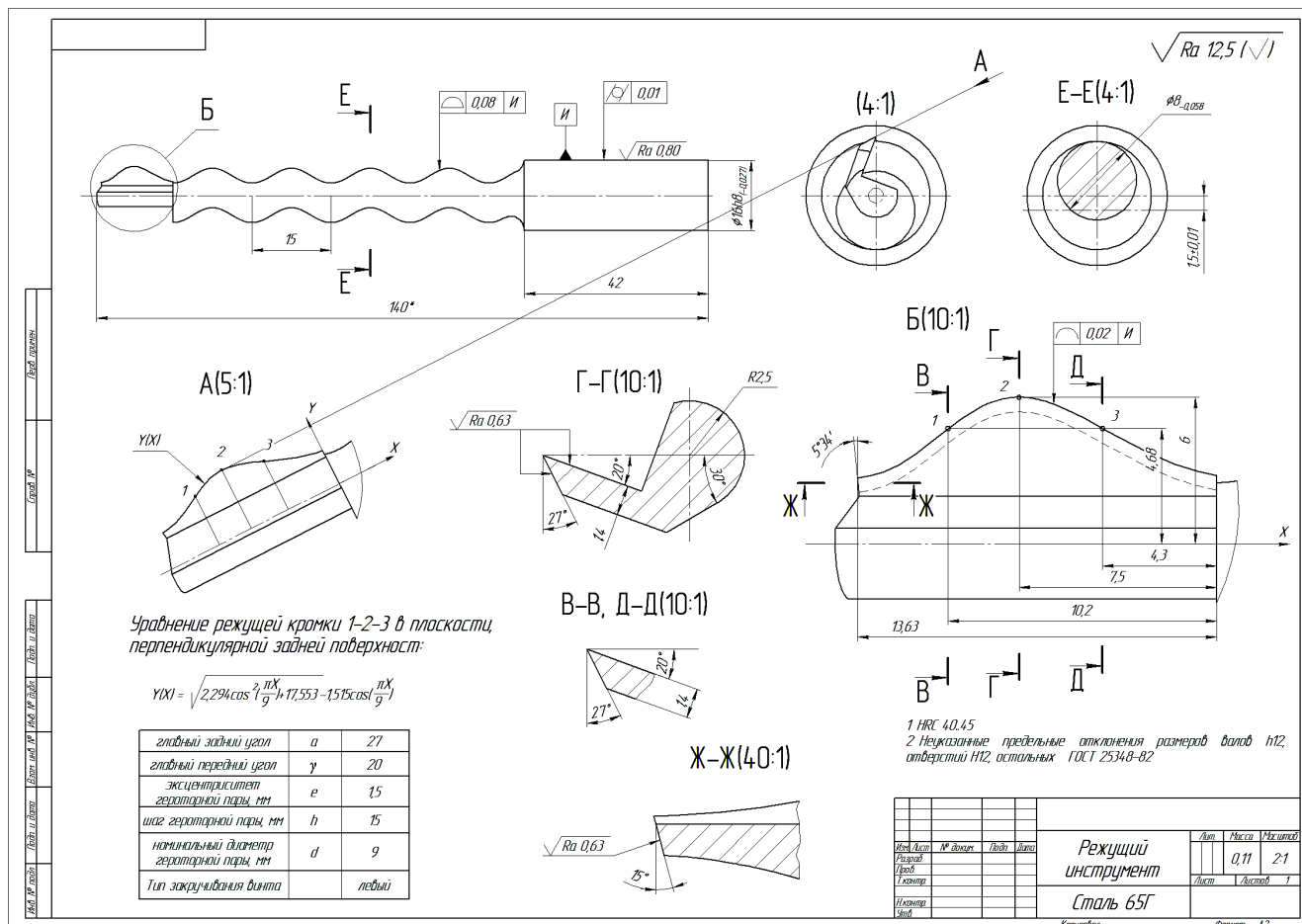


Рисунок 3. Чертеж режущего инструмента для обоймы с параметрами $d = 9$ мм, $e = 1,5$ мм, $h = 15$ мм.

Для определения режимов обработки и точности обработки внутренней ЦВП лезвийным методом, был проведен аналитический расчёт зависимости шероховатости и точности формы поперечного сечения от осевой подачи инструмента. Характер формирования микронеровности можно оценить по траектории движения точки, лежащей на режущей кромке инструмента в произвольном сечении заготовки. Траектория представлена системой уравнений (4), описывающих координаты X и Y этой точки относительно заготовки с ограничением длины режущей кромки в один шаг винтовой поверхности h .

$$\begin{cases} X = e \cos(\theta) + \cos\left(\frac{\theta S}{h} - \theta\right) \left(e \cos\left(\frac{\theta S}{h}\right) - \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2\left(\frac{\theta S}{h}\right)} \right); \\ Y = e \sin(\theta) + \sin\left(\frac{\theta S}{h} - \theta\right) \left(e \cos\left(\frac{\theta S}{h}\right) - \sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - e^2 \sin^2\left(\frac{\theta S}{h}\right)} \right); \\ \theta \in \left(0; 2\pi \frac{h}{S}\right), \end{cases} \quad (6)$$

где θ – угол положения инструмента, рад.; d – номинальный диаметр ЦВП, мм; e – эксцентриситет ЦВП, мм; S – подача инструмента, мм/об; h – шаг ЦВП, мм.

Формообразование геометрии профиля поперечного сечения обоймы происходит неравномерно по его границе, что видно на (Рисунок 4). Количество вершин траектории в виде эллипсов, соприкасающихся с овальным контуром

сечения заготовки, равняется $2h/S-1$. Пересечение этих эллипсов формируют микронеровность на поверхности заготовки.

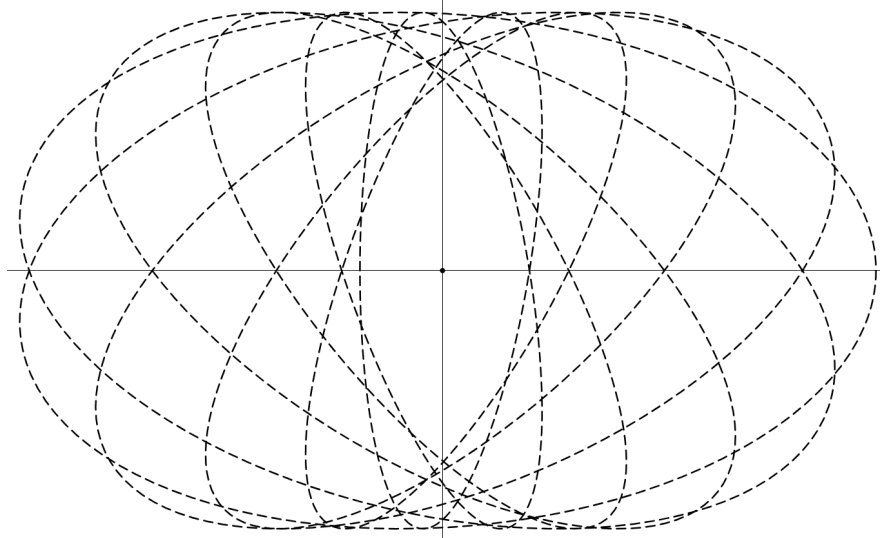


Рисунок 4. След режущей кромки инструмента в поперечном сечении заготовки

В результате исследования траектории движения инструмента (6) была получена зависимость R_{max} от e, d, h, S в неявном виде:

$$e \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{(R_{max} - 2e)^2}{2e^2} - 1 \right) \right) \times \sin \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{(R_{max} - 2e)^2}{2e^2} - 1 \right) \left(\frac{S}{h} - 1 \right) + \pi \frac{S}{h} \right) - e \cos \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{(R_{max} - 2e)^2}{2e^2} - 1 \right) \right) + 2e + \frac{d}{2} - R_{max} = 0, \quad (7)$$

где d – номинальный диаметр ЦВП, мм; e – эксцентриситет ЦВП, мм; S – подача инструмента, мм/об; h – шаг ЦВП, мм.

По уравнению (7) возможно аналитически рассчитать формирующуюся шероховатость внутренней ЦВП в зависимости от осевой подачи инструмента, удовлетворяющую заданным техническим требованиям.

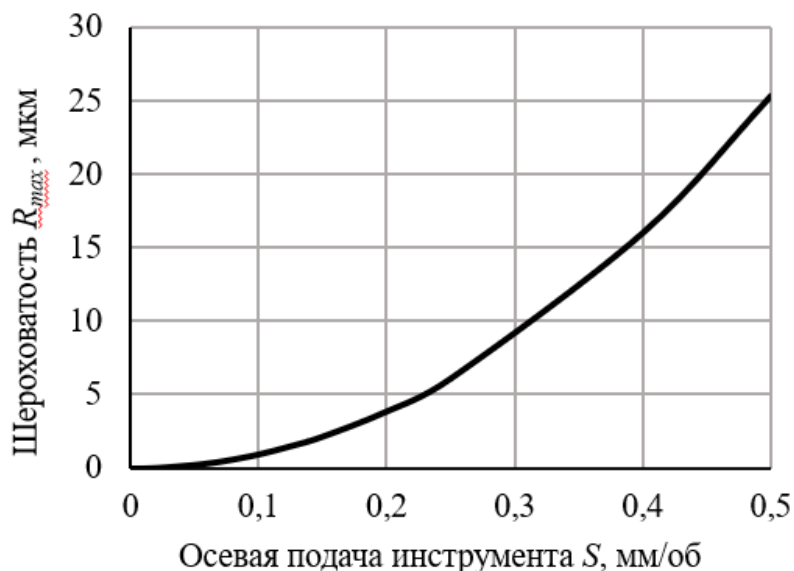


Рисунок 5. Зависимость величины R_{max} мкм от осевой подачи инструмента S , мм/об при $e = 1,5$ мм, $d = 9$ мм, $h = 15$ мм

Измерение точности геометрии поперечного сечения внутренней ЦВП поверхности является сложной технологической задачей. Согласно ГОСТ Р 53442-2015 отклонение формы поперечного профиля внутренней ЦВП определяется в плоскости, перпендикулярной оси внутренней ЦВП (Рисунок 6).

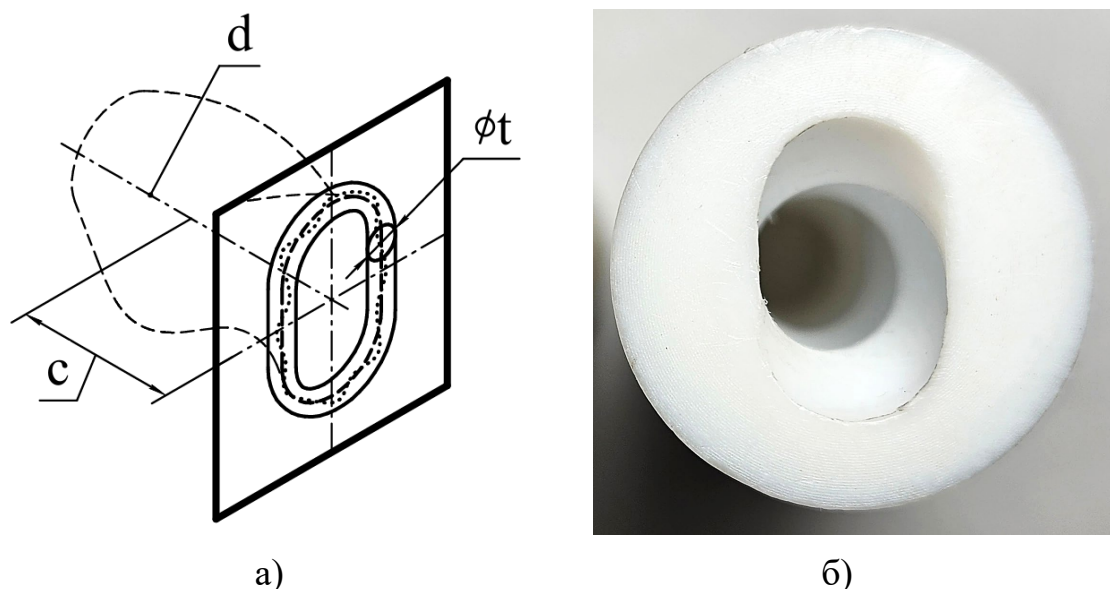


Рисунок 6. Определение допуска формы заданного профиля (а) и вид реального контура поперечного сечения обоймы (б)

Для определения возможной величины отклонения формы поперечного сечения, связанной с действием сил резания в процессе обработки, было проведено аналитическое исследование. В процессе обработки консольно закрепленный инструмент имеет возможность отклоняться под действием сил резания. Было предложено оценить это отклонение следующим образом. Зная траекторию движения инструмента (6) и его геометрию (Рисунок 3), строится совокупность 3D-моделей обрабатываемой поверхности с определенной дискретной подачей. Следующим шагом для каждого значения подачи определяется максимальная площадь контакта инструмента с заготовкой. Эта площадь используется для определения максимальной величины отклонения инструмента в процессе обработки под действием сил резания (Рисунок 7).

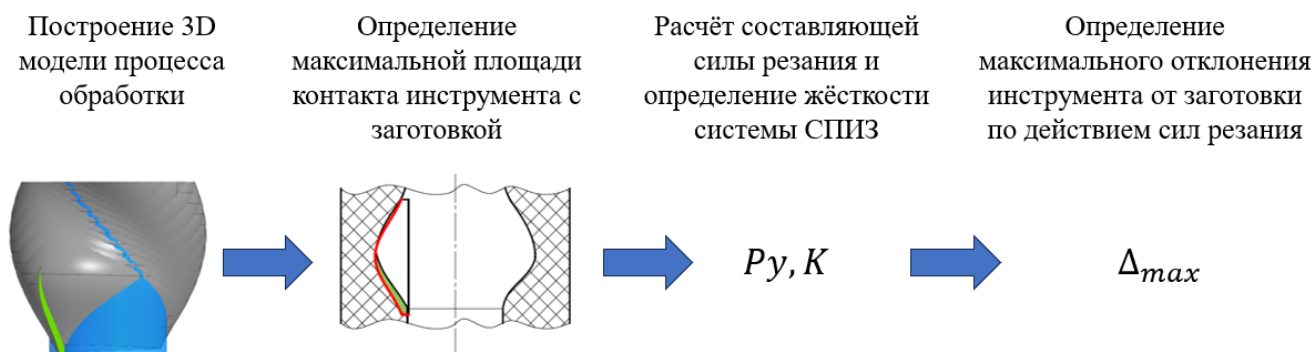


Рисунок 7. Алгоритм расчёта отклонения инструмента в процессе обработки под действием сил резания

В результате аналитического исследования зависимость отклонения формы поперечного сечения от осевой подачи инструмента имеет следующий вид:

$$\Delta_{\max} = k_1 S^3 - k_2 S^2 + k_3 S, \quad (8)$$

где S – осевая подача инструмента, мм/об, k_1, k_2, k_3 – коэффициенты, зависящие от параметров героторной пары (e, d, h).

Коэффициенты $k_1 = 1,05$; $k_2 = 1,24$; $k_3 = 0,708$ получены в ходе машинного эксперимента для следующих параметров героторной пары: эксцентриситет $e = 1,5$ мм; диаметра $d = 9$ мм и шага ЦВП $h = 15$ мм.

Зависимость величины отклонения формы поперечного сечения внутренней ЦВП от осевой подачи инструмента имеет следующий вид (Рисунок 8), инвариантно параметрам геометрии героторной пары.

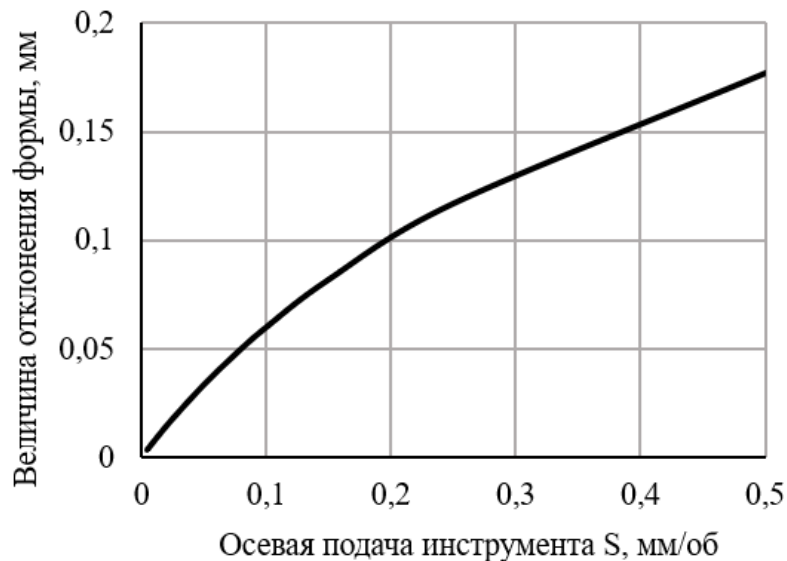


Рисунок 8. Зависимость величины $\Delta_{\max}$, мм от осевой подачи инструмента S , мм/об при $e = 1,5$ мм, $d = 9$ мм, $h = 15$ мм

Были получены аналитические зависимости шероховатости и отклонения формы заданного профиля внутренней ЦВП от осевой подачи инструмента, оказывающей наибольшее влияние на формирование поверхности. Эти зависимости позволяют назначить режимы обработки, удовлетворяющие заданным техническим требованиям чертежа.

В Главе 3 приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение полученных расчётных значений зависимости шероховатости и отклонения формы поперечного сечения ЦВП от осевой подачи инструмента.

Эксперименты проводились на специально изготовленной установке, реализующей метод лезвийной обработки внутренних ЦВП и обеспечивающей кинематическую связь (1) инструмента и заготовки посредством ЧПУ и высокоточного сервопривода.

Был изготовлен специальный профильный инструмент с ранее представленными геометрическими параметрами героторной пары. Направление закручивания ЦВП против часовой стрелки, геометрия обоймы двухзаходная. В качестве материала инструмента была взята инструментальная сталь У8А, закаленная и отпущенная до 45 HRC.

Для определения влияния подачи на шероховатость внутренней ЦВП была обработана партия образцов в количестве девяти штук из фторопласта марки Ф-4 с разными значениями подач. Образцы разрезались вдоль оси отверстия пополам. Шероховатость измерялась вдоль оси отверстия на контурограф-профилометре Platinum D1. Из профилограммы шероховатости вычиталась кривизна поверхности и оценивался только профиль шероховатости из которого определялась R_{max} .

Для определения влияния подачи на отклонение формы поперечного сечения внутренней ЦВП обрабатывалась другая партия образцов так же из фторопласта марки Ф-4 с разными значениями подач. Измерения проводились не на самих образцах, а на слепках внутренней ЦВП, полученных с помощью эпоксидной смолы марки R&G Epoxidharz Harz L и отвердителя Härter L. Этот эпоксидный компаунд обладает усадкой менее 0,1%. Подготавливались поперечные сечения слепков, у каждого слепка снимался контур, состоящий из массива точек от 50 до 100 штук с шагом от 0,5 до 1,0 мм посредством видеоизмерительной системы NVM-2010. Массивы точек контуров слепков обрабатывались с применением специальной методики измерения внутренней ЦВП, которая позволяет определить значение отклонения формы заданного профиля поперечного сечения образца от осевой подачи инструмента.

В результате проведенных исследований были получены экспериментальные зависимости изменения шероховатости внутренней ЦВП от осевой подачи инструмента (Рисунок 9, а) и отклонения формы поперечного сечения внутренней ЦВП от осевой подачи инструмента (Рисунок 9, б)

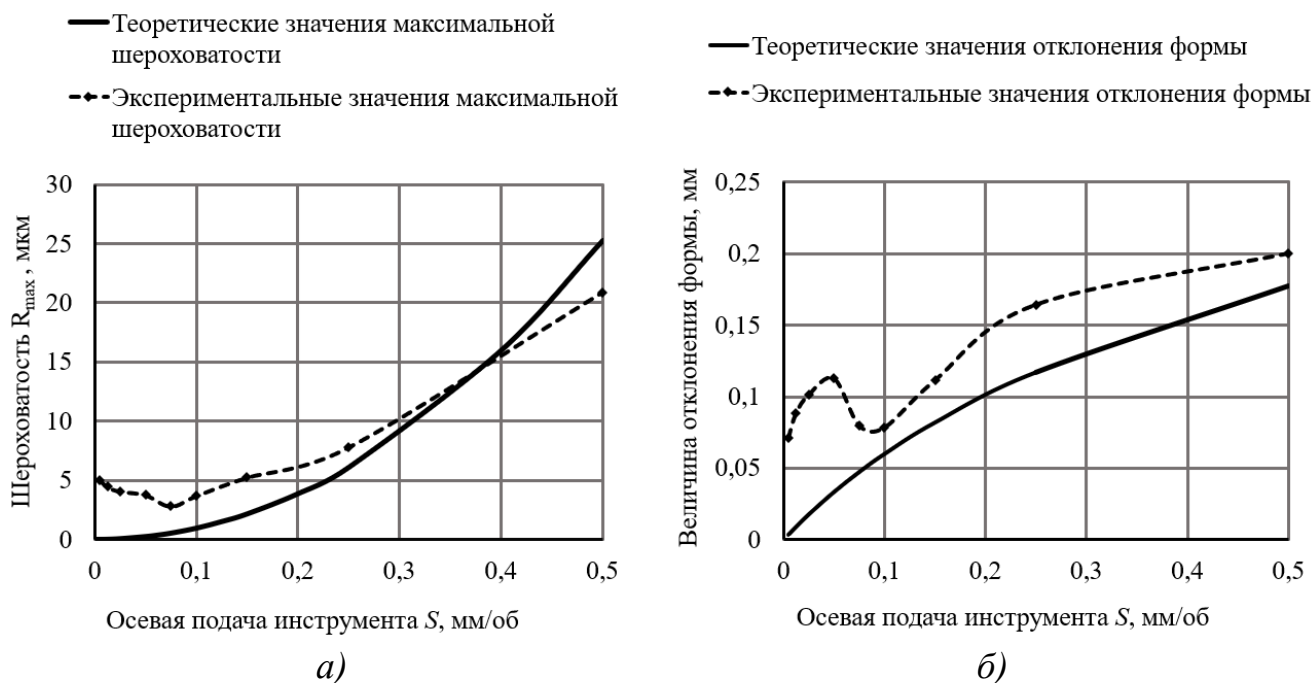


Рисунок 9. Экспериментальные и теоретические зависимости при лезвийной обработке внутренней ЦВП: а) – Зависимости шероховатости внутренней ЦВП от осевой подачи инструмента; б) – Зависимости величины отклонения формы заданного профиля поперечного сечения внутренней ЦВП от осевой подачи инструмента.

Сопоставляя экспериментальные и теоретические результаты установлено, что полученные значения имеют достаточно высокую сходимость: коэффициент корреляции около 0,86 для шероховатости и 0,91 для отклонения формы, что соответствует высокому уровню интенсивности корреляционных связей в соответствии со шкалой Чеддока. Это подтверждает работоспособность и объективность метода лезвийной обработки внутренних ЦВП и выдвинутых аналитических зависимостей определения шероховатости и отклонения формы для назначения режимов обработки. Как видно из графиков, в области с подачей менее 0,1 мм/об наблюдается хаотическое изменение шероховатости и точности геометрии, что может быть связано с физическими ограничениями процесса резания. Это накладывает ограничения области применения метода.

В Главе 4 приведены результаты экспериментально-производственной апробации по определению эксплуатационных характеристик обойм и их ресурсу.

На современных отечественных производствах широко распространено применение химически стойких одновинтовых насосов с обоймами из перфторкаучука. Предлагается заменить дорогостоящую зарубежную расходную обойму из перфторкаучука, изготавливаемую методом прессования на обойму из фторопласта марки Ф-4, обработанную лезвийным методом. Чертеж обоймы представлен на рисунке 10.

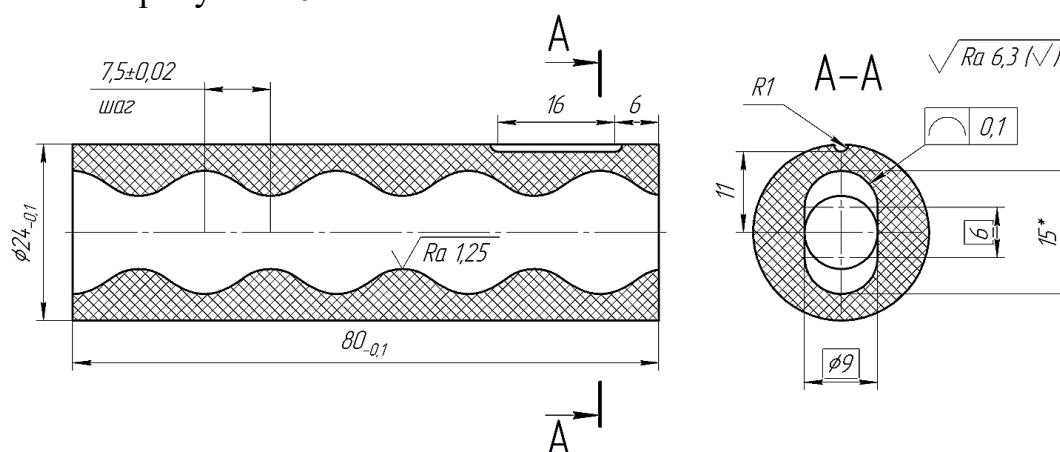
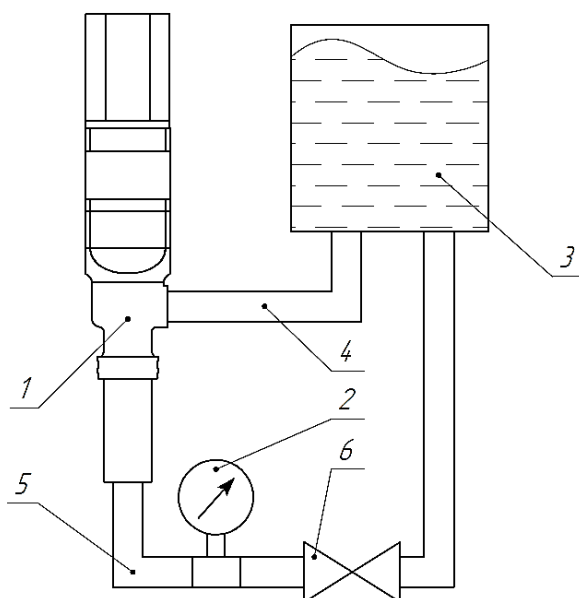
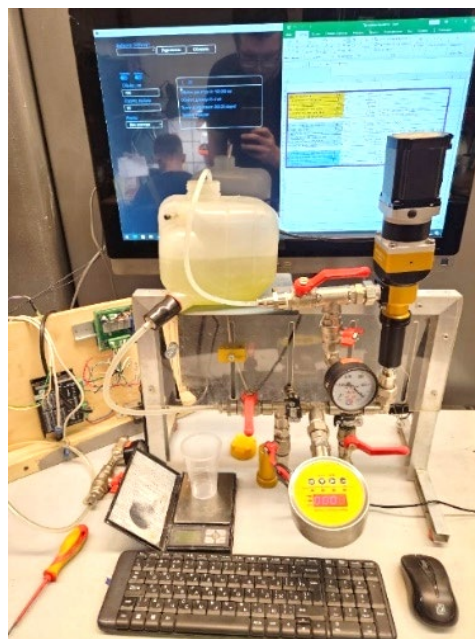


Рисунок 10. Эскиз изготавливаемой обоймы

Суть эксперимента заключалась в сравнении эксплуатационных характеристик одновинтового насоса, оснащенного прессованной обоймой, с тем же насосом, но оснащенный механически обработанной обоймой. Сравниваемые эксплуатационные характеристики: минимальное нагнетаемое давление (рекомендуется не менее 20 атмосфер), максимальное нагнетаемое давление (рекомендуется не более 60 атмосфер). Для проведения эксперимента был разработан испытательный стенд (Рисунок 11), представляющий из себя замкнутую систему, по которой циркулирует технологическая жидкость, в данном случае – дистиллированная вода. К одновинтовому насосу 1 подводится перекачиваемая среда через подводной трубопровод 4 из ёмкости 3. Насос 1 прокачивает жидкость через отводной трубопровод 5 обратно в ёмкость 3. В процессе перекачивания жидкости насос заполняется водой. Выходной трубопровод 5 перекрывается шаровым краном 6, тем самым при работе насоса 1 давление в выходном трубопроводе повышается и фиксируется манометром 2.



а)



б)

Рисунок 11. Схема испытательного стенда (а) и стенд для исследования эксплуатационных характеристик героторной пары (б)

Измерение нагнетаемого насосом давления проводились с подачей 2 мл/мин в течении 10 минут, за это время ротор совершил примерно 10 оборотов. Графики, представленные на рисунке 12, отражают зависимость нагнетаемого насосом давления от углового положения ротора относительно обоймы.



Рисунок 12. Диаграмма распределения давления одновинтового насоса для прессованной обоймы и лезвийно обработанной обоймы

Исходя из анализа диаграмм распределения давления для разных методов получения обойм было выявлено, что механически обработанная обойма проходит порог рекомендованного минимального и максимального нагнетаемого давления в 20 и 60 атмосфер соответственно, что позволяет применять изготовленные обоймы с одновинтовыми насосами.

Для определения экономической целесообразности применения обоем, обработанных лезвийным методом взамен зарубежным обоям, изготавливаемым методом прессования, была проведена экспериментально-производственная апробация. Рассмотрено практическое применение результатов исследования.

Целью проведенного эксперимента являлось определение ресурса обоем из фторопласта марки Ф-4, изготовленной методом лезвийной обработки, и сопоставление его с ресурсом штатной обоем из перфторкаучука, изготовленной методом прессования в форму, в условиях реального производства.

Условия работы производственного стенда (Рисунок 13, а): дозируемая суспензия на основе бутилацетата с пластификатором-загустителем пироженным диоксидом кремния (Аэросил) заливается в ёмкость 3 объёмом 5 литров из которой через подводящий трубопровод 4 суспензия попадает в насос 1. Насос подаёт материал на движущийся конвейер 2 с подачей 10 мл/мин через выходное сопло 5 диаметром 2 мм, которое формирует геометрию наносимой суспензии 6. В процессе работы каждые 4 часа контролируется и при необходимости регулируется объёмная подача насоса. Эксперимент продолжается, пока обоем не выйдет из строя. Критерий выхода обоем из строя: разрыв контура наносимой суспензии (Рисунок 13, б).

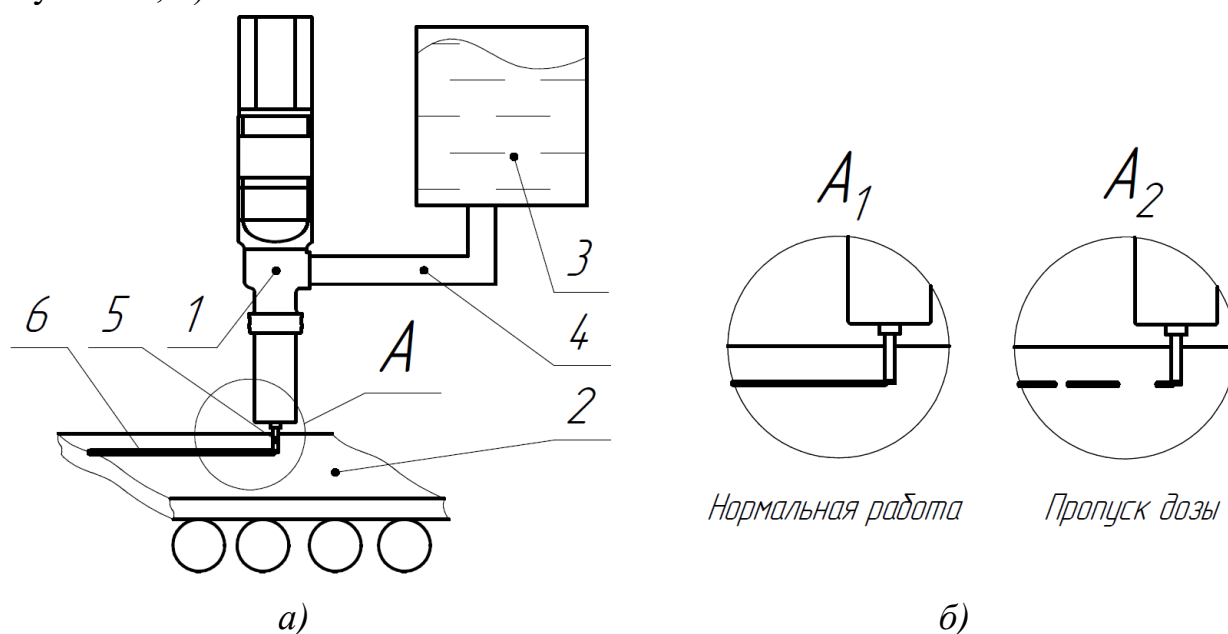


Рисунок 13. Схема системы нанесения суспензии а) и критерий выхода обоем из строя б)

Таблица 1.

Сравнение результатов эксплуатации обоем, полученных различными методами

	Обоем, изготовленная методом прессования из перфторкаучука	Обоем, изготовленная методом лезвийной обработки из фторопласта
Объём перекаченного материала, л.	195	140
Время работы, часов	325	233
Стоимость обоем, руб.	40 000	7 000

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что при уменьшении ресурса механически обработанной обоймы на 28% и снижении её стоимости на 82,5%, итоговые затраты на замену расходного материала насоса – обоймы снизились на 76% в течении одного года эксплуатации оборудования.

Практическое применение предложенного технологического подхода к изготовлению обойм лезвийным методом обеспечивает работоспособность одновинтового насоса и снижает себестоимость его эксплуатации.

Общие выводы по диссертации

1. Проведенный анализ литературных источников показал, что промышленное распространение лезвийной технологии производства обойм одновинтовых насосов сдерживается технологическим барьером, связанным с отсутствием рекомендаций по технологической подготовке лезвийной обработки внутренних ЦВП.

2. Предложена математическая модель кинематики метода лезвийной обработки внутренних ЦВП, позволяющая обеспечить кинематическую взаимосвязь между частотами вращения заготовки, инструмента и осевой подачей инструмента.

3. Доказана возможность реализации метода лезвийной обработки внутренней ЦВП за счет применения специального сложнопрофильного инструмента и программного управления кинематикой взаимного движения инструмента и заготовки.

4. Доказана возможность разработки и изготовления сложнопрофильного инструмента, позволяющего реализовать обработку внутренней ЦВП с заданными геометрическими параметрами.

5. Предложена методика измерения величины отклонения формы заданного профиля поперечного сечения внутренней ЦВП, позволяющая определить не только величину отклонения, но и пределы нижнего и верхнего отклонений.

6. Экспериментально установлено, что метод лезвийной обработки внутренних ЦВП позволяет производить обработку внутренней ЦВП в заготовках из полимерных материалов, обеспечивая допуск формы заданного профиля поперечного сечения в пределах 0,1 мм и шероховатость поверхности не более Ra 1,25.

7. Впервые получены и верифицированы зависимости параметров качества поверхности и точности формы внутренней ЦВП от величины осевой подачи инструмента, позволяющие производить расчет режимов обработки инвариантно геометрическим характеристикам обрабатываемой поверхности.

8. Получены и экспериментально подтверждены зависимости влияния подачи на шероховатость и точность геометрии поперечного профиля внутренней ЦВП позволяют прогнозировать параметры качества внутренней поверхности с высокой корреляцией результатов при условии ограничения применимости метода по осевой подаче инструмента не менее 0,1 мм/об.

9. Доказано, что лезвийная технология изготовления обойм позволяет обеспечить заданные эксплуатационные характеристики одновинтового насоса при амплитуде пульсации давления на выходе насоса от 25 до 50 атмосфер.

10. Доказано, что применение метода лезвийной обработки внутренних ЦВП позволяет снизить затраты при производстве обойм одновинтовых машин более чем в 5 раз. При этом время формообразования поверхности не превышает 3 минут.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:

1. Альбов, М. А. Современные методы получения внутренних циклоидальных винтовых поверхностей / М. А. Альбов, П. Д. Акулиничев, А. А. Гончаров // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. – 2024. – Т. 22, №3. – С. 81–91. (1,0 п.л. / 0,5 п.л.)

2. Альбов, М. А. Исследование влияния режимов обработки на шероховатость мелкоразмерных внутренних циклоидальных винтовых поверхностей при обработке методом героторного сверления / М. А. Альбов, П. Д. Акулиничев, П. Э. Гнатенко, А. А. Гончаров // Технология машиностроения. – 2024. – № 12(270). – С. 17–23. (0,51 п.л. / 0,25 п.л.)

3. Альбов, М. А. Проектирование профильного инструмента для реализации метода героторного сверления мелкоразмерных внутренних циклоидальных винтовых поверхностей / М. А. Альбов, П. Д. Акулиничев, А. А. Гончаров // Справочник. Инженерный журнал. – 2025. – № 2(335). – С. 50–55. (0,38 п.л. / 0,19 п.л.)

4. Альбов, М. А. Исследование точности внутренних циклоидальных винтовых поверхностей, полученных методом героторного сверления / М. А. Альбов, П. Д. Акулиничев, А. А. Гончаров, А. А. Крансуцкая // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2025. – № 1. – С. 125–130. (0,52 п.л. / 0,26 п.л.)

Патент:

Патент № 2740725 С1 Российская Федерация, МПК F04C 2/107, F04C 5/00. Одновинтовой микродозатор: № 2020113087 : заявл. 08.04.2020: опубл. 20.01.2021 / А. А. Гончаров, П. Д. Акулиничев, И. О. Зенин, М. А. Альбов ; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОМПАНИЯ "МОНОРОТОР". – 3 с. : ил. – Текст : непосредственный.