

На правах рукописи

Зенин Илья Олегович

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ СЛОЖНОПРОФИЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ
ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ
НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Специальность 2.5.6 Технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2024

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

Научный руководитель: Кандидат технических наук
Гончаров Александр Александрович

Официальные оппоненты: **Чигиринский Юлий Львович** доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»
Пивкин Петр Михайлович кандидат технических наук, доцент кафедры инструментальной техники и технологии формообразования ФГБОУ ВО «Московского государственного технического университета «СТАНКИН».

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет» (БГТУ).

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.

Телефон для справок +7(499) 263-66-33 доб. 36-28

Автореферат разослан «_____» _____ 2024 г.

Ученый секретарь совета
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

Актуальность работы

Совершенствование конструкции и повышение эксплуатационных характеристик машин зачастую сопряжено с увеличением доли деталей со сложнопрофильными поверхностям. Характерным изделием, включающим в себя такие детали, является насосная и компрессорная техника, в частности, одновинтовые насосы. В основе конструкции одновинтовых насосов лежит винтовая пара, состоящая из ротора и статора, рабочие поверхности которых имеют форму циклоидальной винтовой поверхности. На данный момент преобладающей отраслью, в которой используются винтовые насосы, является нефтедобывающая и газодобывающая промышленность.

Отдельной группой одновинтовых машин являются высокоточные одновинтовые дозаторы, отличительной чертой которых является высокая точность и повторяемость объемного расхода дозируемого вещества. На сегодняшний день прослеживается рост спроса на такое оборудование: за последний год по всему миру выпущено около 15 тысяч единиц высокоточных винтовых насосов. Не смотря, на то, что первые промышленные изделия подобного типа появились лишь в 2008 году, в настоящий момент в мире насчитывается уже порядка 10 крупных производителей дозаторного оборудования.

В конструкции дозаторов применяются мелкогабаритные циклоидальные винтовые поверхности: сечение ротора не превышает 10 мм, шаг винтовой поверхности ротора – до 20 мм. В качестве перекачиваемой среды в процессе эксплуатации винтовых дозаторов могут выступать разнообразные вещества: жидкости, пасты, содержащие абразивные частицы, химически активные вещества, продукты пищевой промышленности и т.д. Область применения высокоточного дозирующего оборудования постоянно расширяется и имеет стратегическое значение для промышленности страны. Так, например, известно о применении дозаторов для 3D-печати керамических изделий, для нанесения термопаст, для дозирования и подготовки различных компаундов. Работа одновинтовых дозаторов осуществляется в автоматизированном режиме, что накладывает особые требования к безотказности их работы. Одной из наиболее распространённых причин выхода из строя винтового насоса является абразивный износ ротора. Повысить стойкость ротора к абразивному износу можно путем повышения показателей качества поверхностного слоя: снижение шероховатости, повышение микротвердости. Обеспечить эти требования применительно к роторам, изготовленным из аустенитной нержавеющей стали можно методами поверхностного пластического деформирования.

В настоящее время наблюдается постоянное расширение сфер применения одновинтового оборудования и, соответственно, постоянно растущий спрос, достигший к 2024 году тысяч единиц дозирующего оборудования в год. Одной из наиболее перспективных сфер применения дозирующего оборудования является автоматизированное производство, что вызывает ужесточение требований к его надежности и ресурсу. Такие тенденции делают актуальными исследования, направленные на разработку новых методов, позволяющих технологически обеспечить качество поверхностного слоя циклоидальных винтовых поверхностей.

Цель работы

Обеспечить равномерность распределения микротвердости и глубины упрочненного слоя циклоидальных винтовых поверхностей деталей из аустенитных нержавеющей сталей поверхностным пластическим деформированием за счет применения алгоритма управления движением инструмента, обеспечивавшего постоянство давления в зоне контакта.

Основные задачи исследования:

1. Проанализировать существующие методы обработки поверхностным пластическим деформированием с точки зрения обеспечения равномерного распределения микротвердости при обработке циклоидальных винтовых поверхностей.

2. Разработать метаматематическую модель, обеспечивающую стабильность давления в зоне контакта в процессе программного обкатывания циклоидальных винтовых поверхностей, позволяющую определить координаты инструмента для системы ЧПУ станка на основе геометрических параметров обрабатываемой поверхности, геометрии инструмента и параметров жесткости технологической системы.

3. Разработать методику подготовки управляющей программы, которая позволяет реализовать обкатывание циклоидальной винтовой поверхности для заданных значений геометрии заготовки, инструмента, характеристик материала и жесткости технологической системы.

4. Провести экспериментальную проверку эффективности методики подготовки управляющей программы с точки зрения равномерности распределения микротвердости и глубины упрочненного слоя.

5. Провести промышленную апробацию методики подготовки управляющей программы для деталей, содержащих циклоидальные винтовые поверхности и работающих в условиях абразивного износа.

Предмет исследования – повышение качества поверхностного слоя сложнопрофильных заготовок методом поверхностного-пластического деформирования.

Объект исследования – мелкогабаритные циклоидальные винтовые поверхности.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Наиболее перспективным методом упрочнения поверхностного слоя деталей, содержащих циклоидальные винтовые поверхности является программное обкатывание.

2. Программное обкатывание сложнопрофильных поверхностей на станках с ЧПУ за один установ с их формообразованием позволяет обеспечить равномерное упрочнение всей обрабатываемой поверхности инвариантно её геометрическим параметрам.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана математическая модель движения тороидального ролика при обкатывании циклоидальной винтовой поверхности, обеспечивающая неравномерность распределения микротвердости не более 5% и глубины

измененного слоя не более 18% инвариантно геометрическим параметрам обрабатываемой поверхности.

2. Разработана методика подготовки управляющей программы для реализации программного обкатывания циклоидальных винтовых поверхностей тороидальным роликом, обеспечивающая равномерное упрочнение циклоидальной винтовой поверхности, что позволяет повысить качество и микротвердость поверхности.

3. Разработан и программно реализован алгоритм расчета траектории и формирования кода управляющей программы для станка с ЧПУ на основе формализованного описания кинематики движения инструмента длиной более 600 000 кадров менее чем за 2 минуты, позволяющий реализовать программное обкатывание циклоидальной винтовой поверхности.

4. Выявлены взаимосвязи показателей качества поверхностного слоя циклоидальных винтовых поверхностей и траектории движения инструмента при обкатыванием с помощью тороидального ролика.

Методы исследования

Теоретические методы исследования основаны на базе основных положений технологии машиностроения с использованием математического аппарата. Метрологическое подтверждение взаимосвязи показателей качества поверхностного слоя циклоидальных винтовых поверхностей и методики подготовки управляющей программы получено в ходе экспериментального исследования с применением современного цифрового контрольно-измерительного инструмента и оборудования.

Практическая значимость

На основе разработанной математической модели кинематики движения инструмента и заготовки в процессе обкатывания роликом представлена методика подготовки управляющей программы при программном обкатывании тороидальным роликом циклоидальных винтовых поверхностей мелкоразмерных роторов высокоточных дозаторов, выпускаемых в условиях мелкосерийного производства, что позволяет повысить ресурс ротора на 80 % при перекачивании сред, содержащих абразивные частицы, без изменения состава оборудования и материальных затрат.

Достоверность результатов подтверждается корректным использованием методов математической статистики для оценки стабильности получаемых при обработке показателей качества поверхностного слоя, 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 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 XV Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России»

(Москва, 2022). 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 научных работы общим объёмом 4,18 п.л., в том числе 2 статьи в издании, индексируемом базой Web of Science (RSCI), 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы. Общий объём работы составляет 114 страниц, список литературы содержит 113 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 существующих методов обработки поверхностным пластическим деформированием сложнопрофильных деталей поверхностным пластическим деформированием, исследованы технологические возможности методов и проведен анализ их применимости к обработке циклоидальных винтовых поверхностей в условиях мелкосерийного производства.

На данный момент для обработки поверхностным пластическим деформированием заготовок, имеющих сложный профиль поверхности, применяют различные методы. Одни из них является использование специальных охватывающих приспособлений. Авторы Киричек А.В., Степанов Ю.С., Афанасьев В.И., работая в коллективе, предложили несколько конструкций таких приспособлений: устройство для статико-импульсной обработки, устройство для импульсно-ударного упрочнения, охватывающий деформирующий инструмент. Также применяется обработка свободными инденторами, например, дробеструйная обработка. Нарботки по данной тематике публиковали Букатый А.С., Блурцян Р.Ш., Поляков Ю.А., Бардинова С.Н. Вопросом упрочнения с применением ультразвуковой обработки занимался коллектив северо-западного центра ультразвуковых технологий, а также такие авторы работ по этой тематике как Лопухов Ю.И., Приходько В.М., Казанцев В.Ф. Прослеживается тенденция применения самоустанавливающегося инструмента для обкатывания и выглаживания. Конструкции таких приспособлений предложены Абросимовым С.К. Известно об использовании следящих устройств для упрочнения сложнопрофильных поверхностей. Дерибо А.В. предложил конструкцию и рекомендации по использованию электрогидравлического следящего привода устройства для обработки поверхностным пластическим деформированием. Для обработки галтельных переходов, конических поверхностей и фасонных поверхностей Учайкин С.Е. предлагает использовать много осевые станки с ЧПУ, реализуя тем самым программное управление инструментом. Различные подходы к применению обкатывания роликами и алмазного выглаживания подробно

рассмотрены в работах Смелянского В.М. Технологические возможности обкатывания и алмазного выглаживания рассматриваются в работах Кокоревой О.Г.

Большинство современных способов обработки сложнопрофильных заготовок методом поверхностного деформирования основаны на использовании сложного специального инструмента. Зачастую переналадка оборудования при смене типоразмера обрабатываемой заготовки связана со сложной настройкой инструмента, что значительно повышает время на технологическую подготовку производства.

Анализ существующих методов обработки поверхностным пластическим деформированием показал, что все они имеют ограниченные технологические возможности с точки зрения применения в условиях мелкосерийного производства роторов высокоточных дозаторов. Наиболее перспективным является обкатывание с программным управлением инструментом. Реализовать такую обработку можно на 4-х осевом фрезерном станке с ЧПУ. На основе этого вывода построены дальнейшие исследования в представленной работе.

В Главе 2 рассмотрены проблемы, связанные с реализацией обработки обкатыванием сложнопрофильных поверхностей на четырех осевом фрезерном станке с ЧПУ, предложена математическая модель процесса программного обкатывания, позволяющая обеспечить постоянство распределения микротвердости и глубины упрочненного слоя инвариантно типоразмеру циклоидальной винтовой поверхности, параметрам инструмента и жесткости технологической системы. Модель описывает кинематику инструмента и заготовки в процессе обкатывания для поверхностей, имеющих форму циклоидальной винтовой поверхности с заданными геометрическими параметрами (Рисунок 1). Также в Главе 2 представлены зависимости, позволяющие компенсировать неоднородность жесткости технологической системы, рассмотрены существующие рекомендации для выбора режимов обработки.

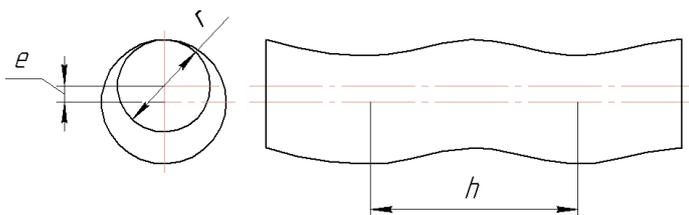


Рисунок 1. Параметризованный чертеж винта: h – шаг винтовой поверхности, e – эксцентриситет, r – радиус сечения.

Реализация программного метода обкатывания в первую очередь связана с получением соответствующего кода управляющей программы. Сложность профиля заготовки, имеющей форму циклоидальной винтовой поверхности, делает невозможным написание управляющей программы вручную. Применение САМ-систем для генерации кода также ограничено, т. к. модель заготовки описывается в виде конечно-элементной модели. При экспорте САД-модели в САМ-систему сгенерированная траектория инструмента также наследует дискретность

Ввиду того, что ролик имеет профильный радиус, действительное положение точки касания отличается от расчетного (Рисунок 4).

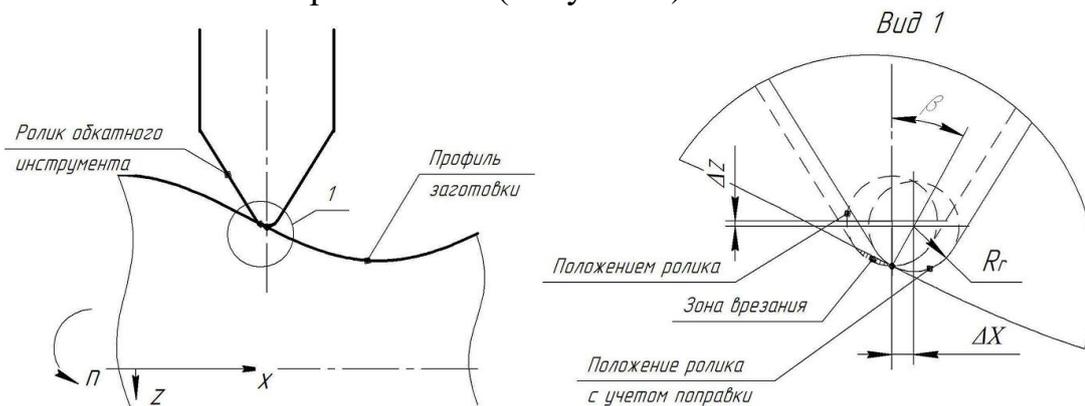


Рисунок 4. Координаты точки касания при обкатывании

Необходимо внести поправки в предложенные зависимости:

$$\begin{cases} X_i = \frac{s \times t}{360} + \Delta X; \\ Y_i = e \times \cos(t); \\ Z_i = e \times \sin(t) + r + R + \Delta Z; \\ A_i = \frac{(360 + \Delta A) \times t}{360}; \end{cases} \quad (2)$$

где $\Delta X = Rr \times \sin \beta$, $\Delta Z = Rr \times (\cos(\beta) - 1)$, $\beta = \beta_m \times \sin(t)$, $\beta_m = \frac{360 \times e}{h}$ - максимальный угол отклонения ролика.

Подставив выражения, учитывающие необходимые поправки, в (2) для определения координат заготовки и инструмента получим:

$$\begin{cases} X_i = \frac{s \times t}{360} + Rr \times \sin\left(\frac{360 \times e}{h} \times \sin t\right); \\ Y_i = e \times \cos(t); \\ Z_i = e \times \sin(t) + r + R + Rr \times \left(\cos\left(\frac{360 \times e}{h} \times \sin(t)\right) - 1\right); \\ A_i = \frac{\left(360 + \frac{360 \times s}{h}\right) \times t}{360}; \end{cases} \quad (3)$$

В конструкцию обкатного инструмента (Рисунок 5) входит упругий элемент, за счет деформации которого создается сила нагружения.

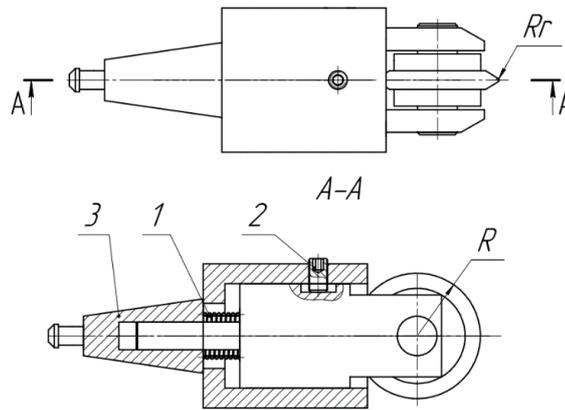


Рисунок 5. Эскиз приспособления для обкатывания ($R=54$ мм, $r=0,8$ мм). 1 – упругий элемент, 2 – установочный винт, тороидальный ролик, 3 – инструментальный конус

Величина деформации упругого элемента определяется поперечным перемещением инструмента после касания заготовки. Для обеспечения требуемой силы нагружения необходимо ввести поправку в выражение для определения координаты Z :

$$Z_i = e \times \sin(t) + r + R + Rr \times \left(\cos \left(\frac{360 \times e}{h} \times \sin(t) \right) - 1 \right) + \Delta Z_{y3}; \quad (4)$$

где $\Delta Z_{y3} = \frac{P}{k_{y3}}$ – функция, связывающая создаваемую силу нагружения и величину деформации упругого элемента.

Также необходимо учесть влияние отжатия заготовки вследствие смещения патрона и центра для каждого положения ролика. Схема (Рисунок 6) позволяет определить силы реакций, возникающих в каждом элементе закрепления в произвольном сечении заготовки, к которому приложена нагружающая сила.

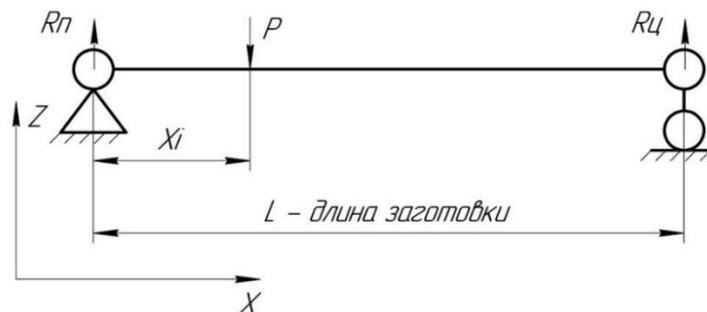


Рисунок 6. Схема для расчета силы реакция в элементах закрепления, где $R_{ц}$ и $R_{п}$ – силы реакции центра и патрона соответственно, P – нагружающая сила, x_i – координата точки приложения силы вдоль оси заготовки.

Зависимости для расчета $R_{п}$ и $R_{ц}$:

$$R_{ц} = \frac{P \times x_i}{L}; \quad (5)$$

$$R_{п} = P - \frac{P \times x_i}{L}; \quad (6)$$

Зная возникающие реакции опор (5) и (6), по схеме (Рисунок 7) можно определить перемещения, возникающие в опорах.

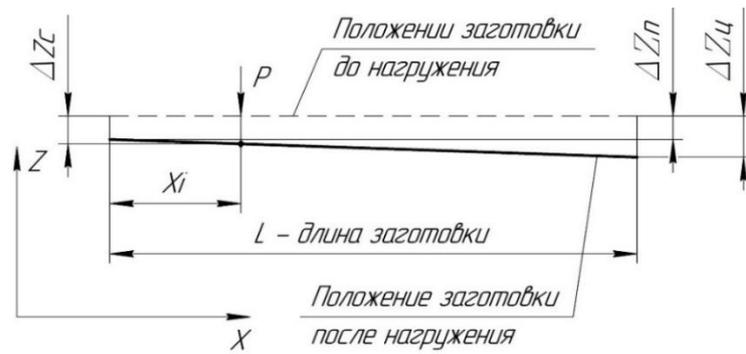


Рисунок 7. Схема для расчета перемещения элементов закрепления

При этом смещение сечения ΔZ_c , в котором приложена сила обкатывания составит:

$$\Delta Z_c = \Delta Z_n + \frac{\Delta Z_{ц} - \Delta Z_n}{L} \times x_i; \quad (7)$$

где $\Delta Z_n = \frac{P}{J_n} - \frac{P \times x_i}{L \times J_n}$, $\Delta Z_{ц} = \left(\frac{P \times x_i}{L \times J_{ц}} - \frac{P}{J_n} + \frac{P \times x_i}{L \times J_n} \right) \times \frac{x_i}{L}$ – отжатие патрона и центра соответственно, возникающие под действием нагружающей силы, рассчитанные с учетом данных полученных после измерения жесткости, расчета реакции в опоре.

Подставив (7) и (4) в (2), получим математическую модель процесса обкатывания:

$$\left\{ \begin{array}{l} X_i = \frac{s \times t}{360} + Rr \times \sin\left(\frac{360 \times e}{h} \times \sin t\right) \\ Y_i = e \times \cos(t) \\ Z_i = e \times \sin(t) + r + R + Rr \times \left(\cos\left(\frac{360 \times e}{h} \times \sin(t)\right) - 1 \right) + \\ + \frac{P}{k_{уп} \times \cos\left(\frac{360 \times e}{h} \times \sin(t)\right)} + \frac{P}{J_n} - \frac{P \times x_i}{L \times J_n} + \left(\frac{P \times x_i}{L \times J_{ц}} - \frac{P}{J_n} + \frac{P \times x_i}{L \times J_n} \right) \times \frac{x_i}{L} \\ A_i = \frac{\left(360 + \frac{360 \times s}{h}\right) \times t}{360} \end{array} \right.$$

где R – радиус ролика, мм, Rr – профильный радиус ролика, мм, r – радиус сечения циклоидальной винтовой поверхности, мм, e – эксцентриситет циклоидальной винтовой поверхности, мм, L – длина заготовки, мм, P – сила обкатывания, Н, $k_{уп}$ – коэффициент жесткости упругого элемента инструмента, Н/мм, $J_{ц}$ и J_n – жесткость центра и патрона поворотной оси соответственно, Н/мм

Прогиб заготовки под действием силы обкатывания можно определить при помощи моделирования, например, в программном комплексе «SOLIDWORKS Similation» и также учесть при подготовке управляющей программы.

Анализ существующих зависимостей для определения режима обработки показал, что величину подачи выбирают достаточно широкого диапазона значений 0,1...1,5 мм/б, величину скорости обкатывания назначают равной 20...200 м/мин. Единого подхода к расчету силы обкатывания на данный момент не сформировано. Был рассмотрен ряд зависимостей, основанных на положениях различных теорий,

которые позволили определить силу прижима инструмента к заготовке. Было выявлено, что все они требуют проведения экспериментальных исследований для уточнения режимов обработки.

Опираясь на вышеизложенное, можно сказать, что методика подготовки управляющей программы при упрочнении циклоидальной винтовой поверхности методом программного обкатывания подразумевает следующую последовательность действий на этапе технологической подготовки производства (Рисунок 8):

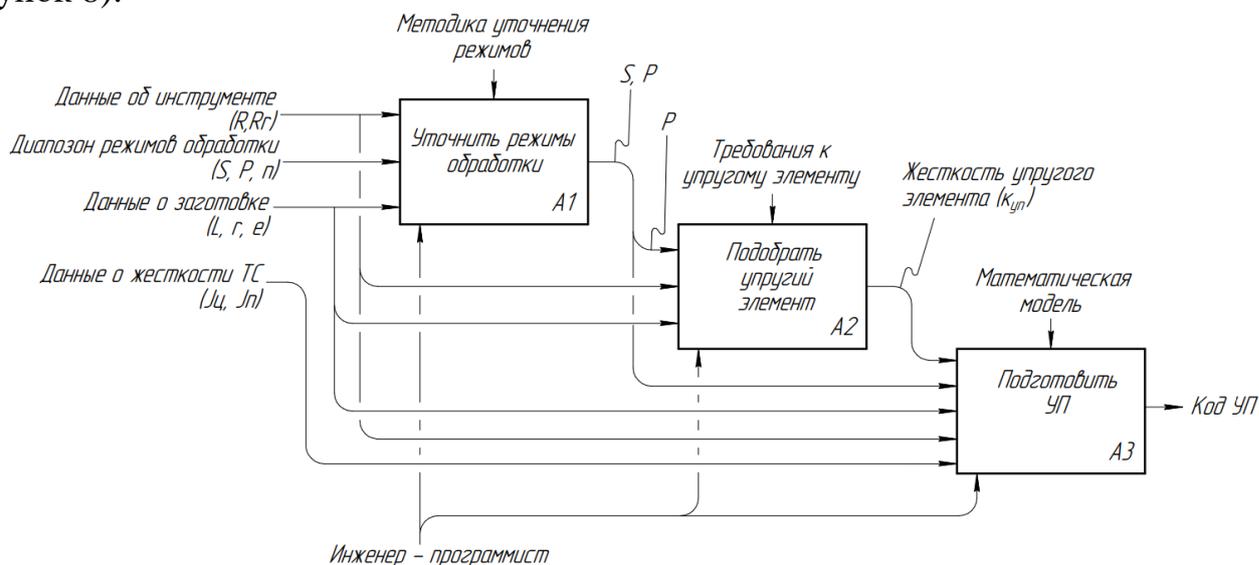


Рисунок 8. Методика подготовки управляющей программы

В Главе 3 для валидации ранее полученных расчетных режимов обработки было проведено экспериментальное исследование влияния режимов обработки на показатели шероховатости и микротвердости поверхностного слоя на цилиндрических образцах, проведено экспериментальное исследование качества циклоидальной винтовой поверхности после обкатывания с применением предлагаемой методики подготовки управляющей программы и показано, что показатели качества, достигнутые при обкатывании цилиндрической поверхности удалось достичь на сложнопрофильных образцах.

На этапе подготовки к экспериментальному исследованию была определена жесткость узлов используемого оборудования. Полученные данные о жесткости элементов технологической системы использовались при подготовке к эксперименту.

При исследовании влияния режимов обработки на показатели качества поверхности было реализовано обкатывание цилиндрической заготовки с последующим измерением интересующих величин, в результате чего получены зависимости микротвердости и шероховатости от величины подачи (Рисунок 9) и зависимости глубины упрочненного слоя от силы нагружения (Рисунок 10).

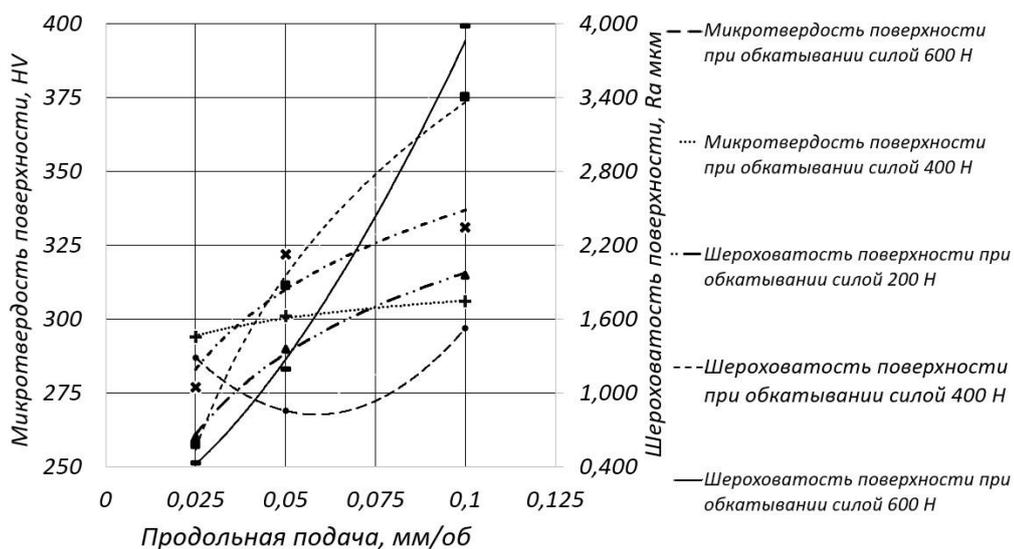


Рисунок 9. Зависимость микротвердости и шероховатости от величины подачи

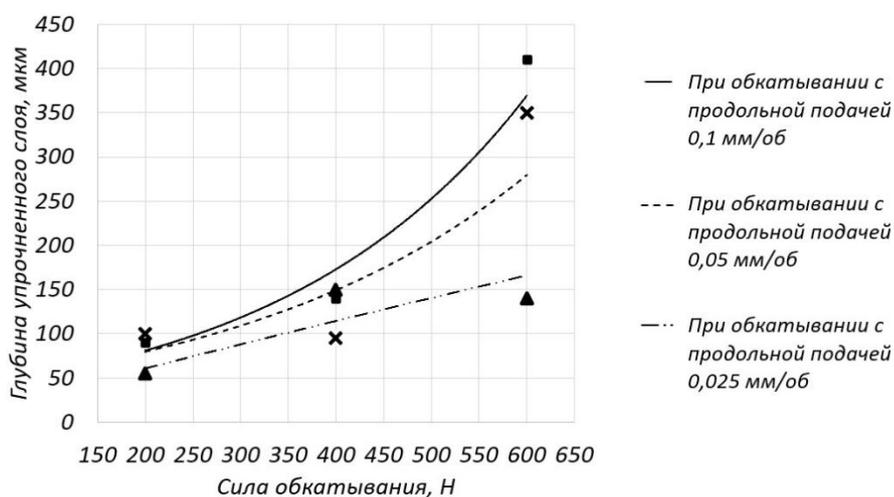


Рисунок 10. Зависимость глубины упроченного слоя от величины силы нагружения

Исходя из полученных данных, был выбран режим экспериментальной обработки циклоидальной винтовой поверхности по предложенной методике. Для сокращения времени на технологическую подготовку программы была разработана автоматизированная система подготовки управляющей программы. Автоматизированная система разработана с применением среды программирования «Visual Basic». Она позволяет сгенерировать код управляющей программы для отправки. При использовании данной системы необходимо в рабочем окне ввести данные о геометрии обрабатываемой циклоидальной винтовой поверхности (шаг винта, радиус сечения винта, эксцентриситет винта, длина винтовой поверхности), о форме профиля обкатного инструмента (диаметр ролика, профильный радиус ролика) и о режиме обработки. На основе сгенерированного кода управляющей программы была получена траектория инструмента.

Обработка проводилась на фрезерном четырех осевом станке с ЧПУ за один установ с формообразованием (Рисунок 11). Также была произведено обкатывание

идентичного образца без применения методики, что позволило сравнить полученные показатели качества поверхностного слоя, получаемые после обработки (Таблица 1).



Рисунок 11. Обработка циклоидальной винтовой поверхности

Таблица 1.

Сравнение результатов обработки поверхностным пластическим деформированием

Параметр поверхностного слоя	Результат обработки методом обкатывания	
	с программным обкатыванием	без программного обкатывания
Средняя глубина упрочненного слоя, мкм	379	264
Минимальная глубина упрочненного слоя, мкм	347	65
Максимальная глубина упрочненного слоя, мкм	412	402
Неравномерность глубины упрочненного слоя, %	16	84
Среднее значение микротвердости, Нv (% от исходного значения)	308 (18)	286 (9)
Минимальное повышение микротвердости, %	14	0
Максимальное повышение микротвердости, %	22	18

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

-Применение программного обкатывания позволяет повысить среднюю глубину упрочненного слоя на 58% при идентичных режимах обработки.

-За счет программного обкатывания удастся повысить равномерность распределения глубины упрочненного слоя вдоль заготовки, имеющей форму циклоидальной винтовой поверхности, более чем в 5 раз.

-Использование рассматриваемой методики подготовки управляющей программы повысить значение средней микротвердости на 14...22 % от исходного значения, в то время как обработка без использования программного обкатывания фактически свидетельствует о невозможна, т. к. присутствуют неупрочненные участки.

При помощи контурогрофа-профилометра была измерена шероховатость обработанной циклоидальной винтовой поверхности и шероховатость заготовки после формообразования. Результаты измерения свидетельствуют о снижении шероховатости (с Ra1,09 мкм до Ra0,6 мкм) и образовании на поверхности упрочненной заготовки волнистого микрорельефа. Такая форма микронеровностей является предпочтительной в тех случаях, когда в технологический процесс включена финишная абразивная обработка, например, свободным абразивом.

В Главе 4 рассмотрено опытно-экспериментальное внедрение предлагаемой методики на действующем производстве высокоточных дозаторов, в ходе которого было подтверждено, что применение обкатывания с программным управлением позволяет значительно повысить ресурс винтовой пары при перекачивании сред, содержащих абразивные частицы.

Суть эксперимента заключалась в сравнении ресурса роторов винтовой пары дозатора упрочненным обкатыванием с применением предлагаемой методики и без применения. Для проведения эксперимента был разработан испытательный стенд (Рисунок 12), представляющий из себя замкнутую систему, по которой в процессе эксперимента циркулирует абразивосодержащая паста. Емкость 6 заполнена перекачиваемой средой, в качестве которой использовалась основная паста силиконового компаунда «Силагерм 2113 марка АЕД» от компании «ПО«Технология-Пласт». Данный компаунд содержит в себе абразивные включения (Рисунок 13) и применяется для защиты, изоляции, отвода тепла изделий радиотехнической и электронной техники. К винтовому дозатору 1 перекачиваемая среда подводится трубопроводом 7. При прохождении пасты через сужение трубопровода 3 в выходном трубопроводе 2 создается давление, фиксируемое в процессе эксперимента манометром 5, оснащенным устройством разделения сред. После прохождения сужения трубопровода 3, при помощи отводящего трубопровода перекачиваемая среда сбрасывается обратно в емкость 6.

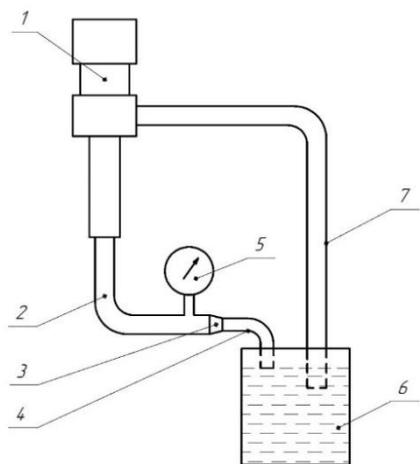


Рисунок 12. Схема стенда.

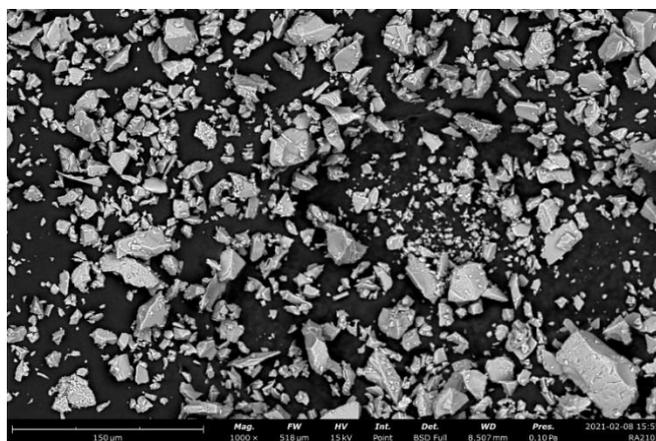


Рисунок 13. Гранулометрический состав абразивных частиц перекачиваемой среды

Стенд в собранном виде представлен на фото (Рисунок 14)



Рисунок 14. Стенд для исследования стойкости роторов винтовых насосов

Система управления дозатором при была настроена таким образом, что в начале эксперимента обеспечивался массовый расход перекачиваемой среды составлял 150 г/мин. Продолжительность эксперимента фиксировалась с помощью таймера. В процессе эксперимента с периодичностью 2 часа производилось контрольное дозирование перекачиваемой среды в течение минуты в отдельную емкость. Затем полученная доза взвешивалась. Это позволило оценивать износ винтовой пары в течение эксперимента. Также каждые 2 часа оценивалась способность винтовой пары создавать давление. Для этого отводящий трубопровод перекрывался и включался дозатор, по манометру отслеживалось давление в пределах трех полных оборотов ротора. Фиксировалось минимальное давление и максимальное. Как только минимальное давление снижалось до 5 атм, эксперимент прекращался и винтовая пара считалась вышедшей из строя. После прекращения эксперимента осуществлялась замена ротора на не эксплуатируемый ранее, измерялась масса контрольной дозы. Такой подход позволяет понять, какая из составных частей винтовой пары вышла из строя: произошел абразивный износ ротора, или же обойма не обеспечивает герметичность рабочего органа по причине истирания абразивными частицами.

В результате было установлено, что причиной выхода винтовой пары из строя является абразивный износ ротора (Рисунок 15), были получены графические зависимости создаваемого дозатором давления от продолжительности эксперимента (Рисунок 16) и массы контрольной дозы от времени с начала эксперимента (Рисунок 17).

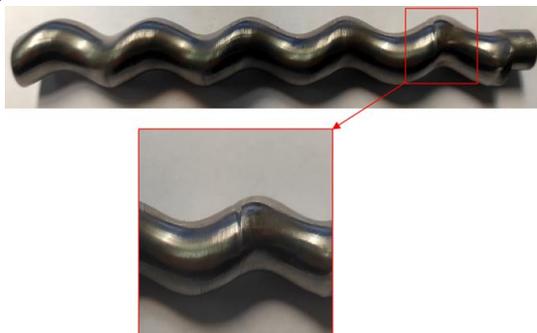


Рисунок 15. Ротор со следами абразивного износа

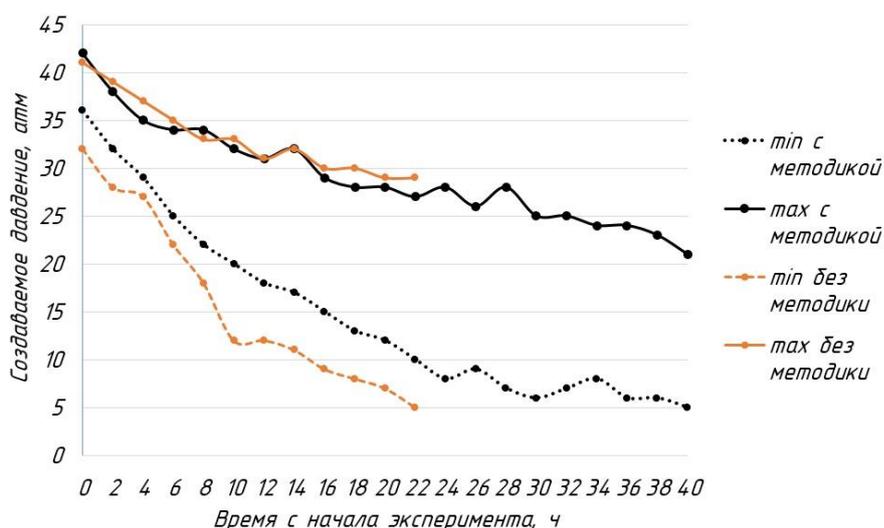


Рисунок 16. Зависимость давления от времени эксперимента

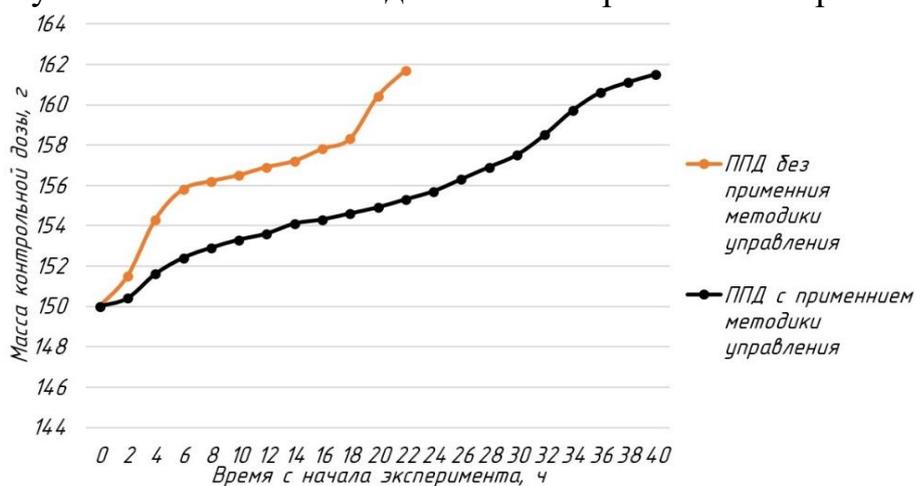


Рисунок 17. Зависимость массы контрольной дозы перекачиваемой среды от времени, прошедшего с начала эксперимента

Полученные данные, позволяют сделать следующие выводы:

- Экспериментально доказано, что главной причиной выхода из строя винтовой пары при перекачивании среды, содержащей агрессивные абразивные частицы, является абразивный износ именно ротора, а не полимерной обоймы.

- Выявлено, что применение предлагаемой методики подготовки управляющей программы позволяет увеличить ресурс ротора и винтовой пары в целом на 82%, не меняя при этом номенклатуру оборудования, используемого при производстве роторов.

- Использование ротора, упрочненного с применением предлагаемой методики, обеспечивает стабильность характеристик винтового дозатора в процессе перекачивания сред, содержащих абразивные частицы: к моменту выхода из строя винтовой пары, оснащенной ротором, обкатанного без программного обкатывания, минимальное давление, создаваемое дозатором, в 2,5 раза выше, отклонение от заданного объемного расхода в 2 раза меньше.

Общие выводы по диссертации

1. Обоснована актуальность задачи повышения ресурса высокоточных винтовых насосов за счет обеспечения равномерного распределения микротвердости поверхности их рабочих органов методом поверхностного пластического

деформирования, решение которой позволит увеличить объем внутреннего рынка до 70 раз при их повсеместном внедрении в автомобилестроении, пищевой промышленности, производстве высокоточных боеприпасов, медицине, фармакологии, производстве микроэлектроники.

2. Анализ существующих методов обработки поверхностным пластическим деформированием показал, что наиболее перспективным методом упрочнения поверхностного слоя сложнопрофильных роторов диаметром 3...12 мм из аустенитных нержавеющей сталей, обеспечивающим равномерность распределения микротвердости, является обкатывание тороидальным роликом с постоянным давлением в зоне обработки, что достигается программным обкатыванием.

3. Установлено, что неравномерность распределения микротвердости поверхности сложнопрофильной заготовки обусловлена факторами: переменной жесткостью технологической системы, изменением положения точки контакта инструмента с заготовкой, изменением угла между силой обкатывания и нормалью к поверхности заготовки. На основе указанных факторов была разработана математическая модель обкатывания, позволяющая упрочнять циклоидальные винтовые поверхности с неоднородностью распределения микротвердости не более 5%.

4. Разработанная на основе представленной математической модели обкатывания система автоматизированного программирования позволяет автоматически подготовить управляющую программу длиной более 600 000 кадров менее чем за 2 минуты.

5. Сформулирована методика подготовки управляющей программы с применением разработанной системы автоматизированного программирования позволяет производить технологическую подготовку обкатывания, обеспечивающую повышение микротвердости на 18% и среднюю глубину упрочненного слоя 379 мкм.

6. Программное обкатывание циклоидальной винтовой поверхности снижает шероховатость по параметрам Ra более чем в 2,5 раза и $t_{50\%}$ в 1,7 раза что позволяет значительно сократить трудоемкость последующей отделочной обработки до 3 раз.

7. Обеспеченная равномерность распределения микротвердости по циклоидальной винтовой поверхности, обработанной по управляющей программе, полученной с помощью предложенной методики, позволяет более чем на 80% повысить ресурс винтовой пары при перекачивании среды, содержащей абразивные частицы, не требуя при этом изменения состава оборудования.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК РФ:

1. Современные методы финишной обработки циклоидальных винтовых поверхностей / И.О. Зенин [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. 2021. № 9(294). С. 3-11. (1,3 п.л./0,4 п.л.).
2. Современные методы отделочно-упрочняющей обработки циклоидальных винтовых поверхностей / И.О. Зенин [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. 2022. № 11(308). С. 16-23. (1,15 п.л./0,85 п.л.).

3. Исследование отделочно-упрочняющей обработки методом обкатывания с программным управлением с помощью тороидального ролика / И.О. Зенин [и др.] // Технология металлов. 2024. № 4. С. 29-37. (0,92 п.л./0,85 п.л.).
4. Отделочно-упрочняющая обработка циклоидальных винтовых поверхностей поверхностным пластическим деформированием с программным управлением инструментом / И.О. Зенин[и др.] // Вестник машиностроения. 2024. № 5. С. 67-70. (0,81 п.л./0,75 п.л.).
5. Одновинтовой микродозатор: пат. 2020113087 Рос. Федерация. № 2740725 С1 / И.О. Зенин [и др.]; заявл. 08.04.2020; опубл. 20.01.2021. Бюл. №2. 7 с.