
**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕХАНИКА.
ДИАГНОСТИКА ИСПЫТАНИЯ**

УДК 621.7

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ
ЦИКЛОИДАЛЬНО-ВИНТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
ЗА ОДИН УСТАНОВ С ФОРМООБРАЗОВАНИЕМ****© 2025 г. И. О. Зенин^{1, *}, П. Д. Акулиничев¹,
М. А. Альбов¹, А. А. Гончаров¹**¹ *Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет), Москва, Россия*** e-mail: ilya32zog@gmail.com*

Поступила в редакцию 15.01.2024 г.

После доработки 12.12.2024 г.

Принята к публикации 20.12.2024 г.

В статье рассмотрен процесс планирования эксперимента по реализации отделочно-упрочняющей обработки циклоидально-винтовой поверхности ротора винтового насоса методом поверхностного пластического деформирования с программным управлением инструментом за один установ с формообразованием, описан эксперимент, подтверждающий работоспособность предлагаемой стратегии обработки. Результаты можно применить на стадии технологической подготовки производства винтовых насосов.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, циклоидальные винтовые поверхности, одновинтовые насосы, микротвердость поверхности

DOI: 10.31857/S0235711925020104, **EDN:** DFTQPL

Развитие техники и технологий приводит к усложнению конструкции выпускаемых изделий. В состав таких изделий часто входят детали, имеющие сложный профиль поверхности. Например, винтовой насос. Такие насосы применяются во многих областях промышленности: нефтегазовая промышленность, 3D-печать, точное объемное дозирование, пищевое производство.

Рабочим органом таких насосов является винтовая пара (рис. 1). Рабочие поверхности ротора и статора имеют форму циклоидальной винтовой поверхности (ЦВП). Вращаясь в статоре, ротор перемещает жидкость и создает напор. Такой принцип работы позволяет перекачивать различные среды, в том числе среды с содержанием абразивных и других частиц. Ввиду широкой области применения винтовых насосов, изготавливают винтовые пары различных типоразмеров: в дозаторах применяются роторы и статоры малых размеров, в насосах для нефтедобывающей промышленности — крупногабаритные.

В процессе работы на ротор воздействуют различные факторы, которые вызывают химический и абразивный износ. Для предотвращения химического износа в качестве материала заготовки ротора используют аустенитную нержавеющую сталь. Повысить стойкость к абразивному износу можно за счет повышения микротвердости поверхности ротора. Применение термической обработки для роторов, изготовленных из аустенитной нержавеющей стали, невозможно. В таких случаях требуется применение отделочно-упрочняющей обработки.



Рис. 1. Винтовая пара насоса в разрезе: 1 — обойма, 2 — ротор.

Анализ существующих методов отделочно-упрочняющих методов показал, что наиболее перспективным применительно к мелкоразмерным ЦВП, применяющимся в дозаторах, является поверхностное пластическое деформирование (ППД) путем обкатывания роликом с программным управлением инструментом [1–3]. Такой метод применим для упрочнения поверхности мелкоразмерных роторов в условиях многономенклатурного производства дозаторов, т.к. не требует наличия специального инструмента для каждого типоразмера ЦВП и его можно реализовать за один установ с формообразованием [3, 4].

Ввиду сложности профиля заготовки, подготовка управляющей программы для четырех-осевого фрезерного станка с ЧПУ требуется математическая модель процесса обкатывания. Разработка такой математической модели рассмотрена в предыдущих работах коллектива авторов. Также ранее была разработана компьютерная программа для подготовки управляющей программы. Она позволяет, введя данные о геометрии обрабатываемого ротора, данные о геометрии обкатного инструмента, получить код управляющей программы.

Так как современные рекомендации по выбору режима обкатывания не позволяют однозначно определить входящие в него параметры (n — частота вращения заготовки, F — сила прижима ролика к заготовке, S — продольная подача ролика) [5], для выявления взаимосвязи между составляющими режима отделочно-упрочняющей обработки и параметрами качества поверхности был проведен эксперимент по обкатыванию цилиндрической заготовки. В ходе подготовки к эксперименту был подобран упругий элемент обкатного приспособления, с помощью которого создается необходимая сила нагружения, а также измерена жесткость технологической системы.

Планирование эксперимента. Цель эксперимента — проверка методики реализации отделочно-упрочняющей обработки ЦВП путем обкатывания роликом с программным управлением инструментом за один установ с формообразованием на четырех осевом фрезерном станке с ЧПУ.

Эксперимент заключается в обработке заготовки, имеющей форму ЦВП, на различных режимах обкатывания с последующим измерением микротвердости поверхности и глубины упрочненного слоя с целью подтверждения работоспособности рассматриваемой стратегии реализации отделочно-упрочняющей обработки.

В качестве инструмента при проведении эксперимента применялся ролик, имеющий тороидальный профиль (рис. 2). В конструкции инструмента предусмотрен упругий элемент, за счет сжатия которого создается требуемое усилие. При помощи моделирования процесса нагружения заготовки было выявлено, что в опасном сечении максимальная сила, при которой заготовка не разрушается, достигает значения 600 Н. Упругий элемент для такого значения силы нагружения был подобран в ранних работах коллектива авторов. Так же была проанализирована жесткость техноло-

гической системы, что позволило при подготовке к эксперименту учесть этот фактор для достижения большего постоянства режимов обработки.

В качестве заготовки выступил ротор винтового насоса (рис. 2).

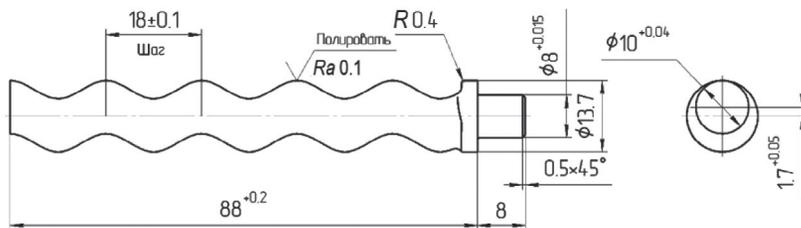


Рис. 2. Геометрия заготовки для обкатывания.

Для управления инструментом при помощи ранее разработанной математической модели процесса обкатывания и компьютерной программы был получен код управляющей программы (УП) для станка с ЧПУ.

Режим обработки ($n = 14 \text{ мин}^{-1}$, $F = 600$, $S = 0.05 \text{ мм/об}$) был выбран исходя из результатов ранее проведенных экспериментов. Такие значения составляющих режима обработки обеспечивают наибольшую глубину упрочненного слоя и микротвердость поверхности. Обкатывание производилось по всей рабочей поверхности ротора. Данные об измерении контролируемых параметров заносились в матрицу эксперимента (табл. 1).

Эксперимент. Отделочно-упрочняющая обработка проводилась на фрезерном четырех осевом станке с ЧПУ за один установ с формообразованием: черновое фрезерование, чистовое фрезерование, отделочно-упрочняющая обработка [6].

По окончании обработки из заготовки при помощи электроэрозионного станка были вырезаны образцы для дальнейшего измерения микротвердости и глубины упрочненного слоя (рис. 3). Такая форма образца позволяет сделать больше уколов микротвердомера при измерении методом Виккерса. Каждый образец был пронумерован и уложен в заранее заготовленный ложемент, исключая перемешивание образцов. Расположение вырезаемых образцов выбрано таким образом, что при измерении параметров поверхностного слоя фиксируется глубина упрочненного слоя и микротвердость на протяжении полного шага винтовой поверхности (рис. 4). При этом дискретность расположения точек, в которых проводилось измерения, при таком расположении вырезаемых образцов составит 2.25 мм. Для каждой точки определено значение угла между направлением прикладываемой силы и нормалью к поверхности заготовки (угол β) (рис. 5), (табл. 1).

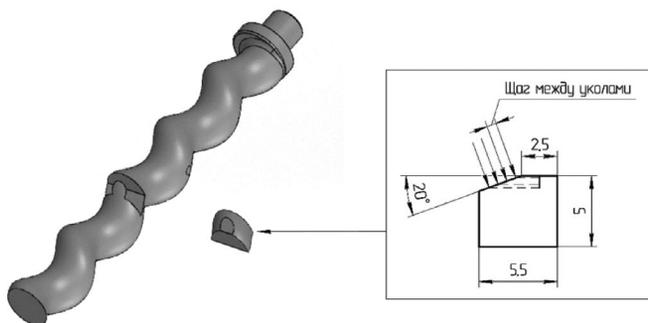


Рис. 3. Конфигурация образца для измерения микротвердости и глубины упрочненного слоя.

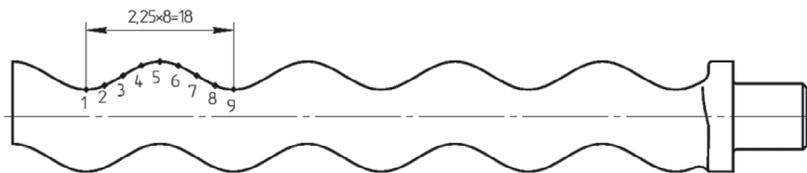


Рис. 4. Расположение точек измерения в пределах шага винтовой поверхности.

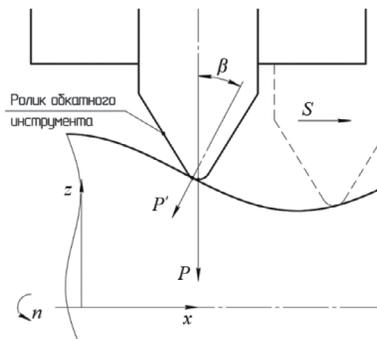


Рис. 5. Взаимное расположение заготовки и инструмента в процессе обработки.

После вырезания образцы были запечены в эпоксидной смоле и подготовлены шлифы. Далее, в соответствии с методикой измерения микротвердости Виккерса, были проведены измерения. Результаты измерений занесены в матрицу эксперимента (табл. 1). За глубину упрочненного слоя принималось расстояние от поверхности до места укола микротвердомера, в котором значение микротвердости достигало значения микротвердости заготовки не подвергнутой отделочно-упрочняющей обработке.

Таблица 1. Матрица эксперимента

№ точки (образца)	Угол β , град	Глубина упрочненного слоя, мкм	Среднее значение микротвердости, НВ
Исх. значения	—	—	262
1	0	412	320
2	23	383	281
3	31	347	287
4	23	375	296
5	0	408	317
6	23	363	282
7	31	347	285
8	23	374	294
9	0	406	317

Результаты эксперимента. По данным эксперимента была получена зависимость микротвердости поверхностного слоя, глубины упрочненного слоя от взаимного расположения обкатного ролика и заготовки (рис. 6). Опираясь на результаты экс-

перимента, можно сделать следующие выводы: среднее значение микротвердости поверхностного слоя после обработки составляет 298 HV, что соответствует повышению данной величины на 36 единиц по Виккерсу (на 14%). Среднее значение глубины упрочненного слоя составляет 379 мкм.

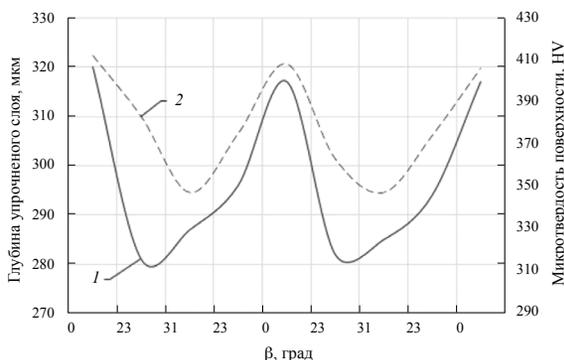


Рис. 6. Зависимость глубины упрочненного слоя и величины микротвердости от взаимного положения ролика и заготовки: 1 — микротвердость; 2 — глубина упрочненного слоя.

Изменение глубины упрочненного слоя и микротвердости носит циклический характер, вызванный изменением угла между нормалью к поверхности заготовки и направлением прикладываемой силы (угол β). Максимальное значение микротвердости после обработки составляет 320 HV и достигается в тех сечениях заготовки, где угол β близок к нулю. С увеличением угла β наблюдается снижение упрочнения до 281 HV (на 12%). Максимальное значение глубины упрочненного слоя составляет 412 мкм и снижается до 347 мкм (на 16%) с увеличением угла β .

Уменьшение микротвердости и глубины упрочненного слоя с увеличением угла между нормалью к поверхности и направлением прикладываемой силы является следствием наличия зазоров в конструкции обкатного ролика, что приводит к смещению точки приложения силы и локальному нарушению выбранного режима обработки.

Заключение. В ходе исследования была проведена экспериментальная реализация отделочно-упрочняющая обработка ЦВП методом ППД с программным управлением инструментом за один установ с формообразованием на четырех осевом фрезерном станке с ЧПУ. Эксперимент подтверждает работоспособность предлагаемой математической модели движения инструмента при обкатывании ЦВП. Удалось достигнуть глубины упрочнения сложнопрофильной поверхности около 0.4 мм и микротвердости поверхностного слоя в районе 300 HV. Также в ходе эксперимента было установлено, что глубина упрочненного слоя не стабильна, зависит от угла поворота заготовки и изменяется в пределах 16% от своего максимального значения. Снижение амплитуды колебания глубины упрочненного слоя можно обеспечить за счет применения обкатного ролика с более жесткой конструкцией, исключающей наличие люфтов в радиальном направлении. Обобщая результаты эксперимента, можно заключить, что предложенный метод программного обкатывания сложнопрофильной циклоидальной винтовой поверхности имеет высокий потенциал промышленного применения.

Финансирование. Данная работа финансировалась за счет средств собственного бюджета. Никаких дополнительных грантов на проведение или руководство данным конкретным исследованием получено не было.

Благодарности. Авторы выражают благодарность за помощь в организации эксперимента коллективу работников лаборатории кафедры МТЗ МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Конфликт интересов. Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рассадин К. В., Алексеев В. А., Афурин Д. В.* Алмазное выглаживание и обкатывание роликами как методы поверхностного пластического деформирования // Сб. статей по итогам Международной науч.-практ. конф. «Концепции фундаментальных и прикладных научных исследований». 9 января 2017 года, Уфа. 2017. V. 3. P. 131.
2. *Зайдес С. А.* От кинематики рабочего инструмента к новым процессам отделочно-упрочняющей обработки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. Т. 23. С. 863.
3. *Учайкин С. Е.* Анализ схем накатывания цилиндрических и сложнопрофильных поверхностей на токарном станке с ЧПУ // Инновации в машиностроении: сб. трудов IX Международной научно-практической конференции, Барнаул, 24–26 октября 2018 года. 2018. P. 436.
4. *Мусохранов М. В., Калмыков В. В., Логутенкова Е. В.* Краткий обзор отделочных операций, применяемых для повышения эксплуатационных характеристик деталей машин // Научный альманах. 2015. № 10–3. P. 183.
5. *Федонин О. Н., Степошина С. В.* Исследование существующих зависимостей для расчета силы, обеспечивающей отделочную, отделочноупрочняющую и упрочняющую обработку ППД // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2014. № 4. P. 38.
6. *Кузнецов В. П., Макаров А. В., Осинцева А. Л., Юровских А. С., Саврай П. А., Роговая С. А., Киряков А. Е.* Упрочнение и повышение качества поверхности деталей из аустенитной нержавеющей стали алмазным выглаживанием на токарно/фрезерном центре // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 11. P. 16.