

05.02.08

Г245

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ГАФАРОВ АЙДЫН МАМИШ ОГЛЫ

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ
ПОВЫШЕНИЯ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ДЕТАЛЕЙ
НЕЧЕРНОПРОМЫСЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Челябинск - 1993

Работа выполнена в Азербайджанском техническом университете.

Официальные оппоненты: - доктор технических наук,
профессор ОВСЕНКО А.Н.,

- доктор технических наук,
профессор МУХИН В.С.,

- доктор технических наук,
профессор ПРОХОРОВ А.Ф.

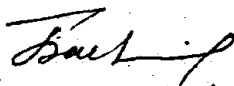
Ведущее предприятие - Азербайджанский институт
нефтяного машиностроения

Защита состоится " 18 " мая 1993 г. в 14 часов в
ауд. 502 на заседании специализированного совета Д 053.13.05
Челябинского государственного технического университета по
адресу: 454080 г. Челябинск, пр. В.И. Ленина, 76

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " 7 " апреля 1993 года.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор экономических наук,
профессор



Н.А. БАЕВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время наиболее распространенным оборудованием, с помощью которого извлекается нефть на территории СНГ, является: электроцентробежные насосы, штанговые скважинные насосы, гидropоршневые насосы, стройные насосы, электровинтовые насосы, которыми охватывается около 90% скважин (из общего числа более 400 тысяч), работающих с применением механических насосов разных конструкций.

Сложные природно-климатические условия, кустовое расположение наклонно-направленных скважин, высокое значение газосодержания, высокое давление и пластовые температуры, интенсивное отложение солей и парафина, наличие в добываемой продукции песка и гидратообразований, а также ее коррозионность и другие факторы предъявляют высокие требования к оборудованию, предназначенному для эксплуатации на нефтяных и газовых скважинах.

Оборудование для эксплуатации нефтяных и газовых скважин разнообразно и сложно по конструкции. Габаритные размеры этого оборудования ограничиваются диаметрами и другими параметрами скважин, (диаметры обсадных труб скважин, в которых размещается оборудование для добычи нефтепродукции, колеблется от 160 до 300 мм), что приводит к дополнительным трудностям, связанным с их изготовлением и ремонтом. Ремонт и изготовлением насосов занято на территории СНГ более 60 предприятий.

Комплексный анализ причин износа деталей и узлов скважинных насосов показывает, что в кинематической паре "штука-плунжер" насосов наибольшим износам подвержены отверстия втулок, так как на поверхность плунжеров наносятся те или иные упрочняющие покрытия. В среднем износ втулок в 1,8...2 раза превышает износ плунжеров, что свидетельствует о необходимости совершенствования технологических способов повышения износостойкости отверстий деталей нефтепромышленного оборудования.

Таким образом, для обеспечения минимальных простоев насосного оборудования, связанного с его ремонтом, из-за поломок или износа деталей, необходимо решать проблему увеличения межремонтного периода эксплуатации. Последний может быть увеличен за счет рационализации технологии механической обработки, существенно повышающей износостойкость и усталостную прочность тех деталей, которые в основном определяют длительность периода непрерывной работы механизмов. Поэтому создание и выпуск высокос-

качественного нефтяного оборудования является актуальной задачей машиностроения.

Работа выполнена в рамках исследований, предусмотренных комплексными программами развития нефтегазодобывающей промышленности Азербайджанской Республики на 1986-1990 годы и на период до 2000 года. (Утверждена на совместном заседании комиссии Госплана и АН Азербайджанской Республики от 20.01.1986 г., номер госрегистрации 01860099459).

ЦЕЛЬ РАБОТЫ заключается в повышении износостойкости деталей нефтепромышленного оборудования путем создания новых и усовершенствования существующих способов обработки и разработка методики рационального сочетания последовательно выполняемых операций.

Для достижения цели исследования поставлены следующие задачи:

1. Исследование шероховатостей, остаточных напряжений и наклепа поверхностного слоя при различных финишных операциях для определения рациональных режимов и условий обработки.
2. Установление взаимосвязи между качественными показателями поверхностного слоя с износостойкостью деталей нефтяного оборудования.
3. Исследование качества поверхности при различных сочетаниях последовательно выполняемых операций.
4. Разработка нормативных материалов по рациональному сочетанию операций и условий обработки по критериям параметров качества (шероховатости, напряжений, наклепу) поверхностного слоя и износа.
5. Внедрение новых способов обработки, инструментов, оснастки, оборудования и усовершенствованных технологий в производство.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА работы заключается в следующих полученных результатах.

Разработаны математические зависимости взаимосвязей технологических параметров разных операций обработки с комплексом показателей качества поверхности: шероховатостью, остаточными напряжениями и наклепом, позволяющие определить их рациональные значения.

Экспериментально установлена связь между показателями качества поверхности и интенсивностью износа деталей.

Разработана методика выбора вариантов последовательно выполняемых операций, режимов резания и других условий, обеспечивающих требуемые показатели качества (шероховатость, остаточные напряжения, наклеп), обеспечивающие минимальный износ деталей.

Разработаны новые способы обработки, инструмент, оснастка и усовершенствованы существующие технологические операции для обработки деталей нефтепромышленного оборудования.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ДОСТОВЕРНОСТЬ РЕЗУЛЬТАТОВ. Для изучения факторов, влияющих на качество поверхностного слоя и износ деталей, на базе натуральных и лабораторных экспериментов с использованием аппарата планирования эксперимента получены математические зависимости, устанавливающие связь между параметрами технологических операций и качества поверхностного слоя. Теоретические исследования проводились с применением научных основ технологии машиностроения, теории резания и механизма разрушения поверхностей деталей машин с использованием вычислительной техники.

Достоверность полученных результатов подтверждается экспериментальными исследованиями, которые проводились на современном оборудовании, с применением специально спроектированных стендов и приспособлений, а также в реальных условиях эксплуатации насосов.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЦЕННОСТЬ работы заключается в разработанной классификации ответственных деталей и узлов основных видов нефтяного оборудования по общности конструкции и технологии изготовления, а также в разработке новых технологических процессов их изготовления с обеспечением требуемых значений параметров качества поверхностного слоя, которые существенно повышают износостойкость деталей. Существенное практическое значение имеют разработанные в диссертации новые способы обработки, инструменты и оснастка, к которым можно отнести:

1. Замену традиционного растачивания и зенкерования ротационным растачиванием, для которого разработаны специальные конструкции резцовых узлов и другая технологическая оснастка, что позволило в 1,8...2,1 раза повысить производительность, увеличить стойкость инструмента в 2...3 раза с обеспечением высоких показателей качества поверхности.

2. Новый способ ротационного хонингования, на который получено авторское свидетельство (№ 1345513); разработана конструк-

ция ротационных хонголовок с режущими элементами в виде самовращающихся бочкообразных алмазных роликов, расположенных под углом к оси хонголовки. Замена традиционного хонингования ротационным позволяет повысить производительность в 1,5...1,8 раза.

3. Замену традиционной притирки внутренних конусных поверхностей деталей хонингованием, для которого разработаны конструкции конических хонинговальных головок для разных (регулируемых) углов конусности (авторские свидетельства № I6II709, № I085786), что позволяет повысить производительность в 1,4...1,6 раз.

4. Замену периодического (ступенчатого) разжима притира на традиционных операциях притирки непрерывнодействующим разжимом, для которого разработана конструкция специального устройства (авторское свидетельство № II03997), позволяющая повысить производительность.

5. Специальные конструкции виброголовок для операций алмазного выглаживания, позволяющие за счет регулирования амплитуды колебаний алмазных сфер увеличить интенсивность наклепа поверхностного слоя детали.

С использованием новых разработок предложены рациональные сочетания последовательно выполняемых финишных операций, позволяющих сократить общее количество операций для разного набора и типов оборудования, применяемого в настоящее время на разных заводах с обеспечением требуемых показателей качества поверхностного слоя деталей.

С использованием математических моделей и экспериментальных исследований разработаны нормативные материалы по выбору рациональных режимов резания и условий обработки, обеспечивающих наибольшую производительность и наименьший износ.

РЕАЛИЗАЦИЯ РАБОТЫ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ. Полученные в работе научно-технические решения реализованы в комплексе мероприятий по усовершенствованию существующих и разработке новых технологических процессов обработки деталей, что позволило существенно повысить производительность технологических процессов и долговечность нефтепромышленного оборудования.

Внедрение новых технологических решений, усовершенствование существующих операций и выбор рациональных режимов обработки на заводах нефтепромышленного оборудования (им. лейт-та Шмидта, Ф.Э.Дзержинского, Д.Касимова, Б.Сардарова и др.) позволили повысить производительность в 1,6...2,4 раза и долговечность оборудования в 1,4...1,9 раза.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ. По основным вопросам выполненных исследований сделано 24 доклада на всесоюзных, республиканских, отраслевых и внутривузовских конференциях, в том числе на:

1. Республиканской научно-технической конференции "Оптимизация процесса механической обработки на металлорежущих станках", Киев, 1975 г.
2. Республиканской научно-технической конференции "Прогрессивные технологические процессы обработки деталей приборов", Севастополь, 1975 г.
3. Всесоюзной научно-технической конференции "Автоматизация управления и регулирования качества продукции в машиностроении и приборостроении", Севастополь, 1976 г.
4. Всесоюзной конференции "Интенсификация технологических процессов механической обработки", Ленинград, 1986 г.
5. Краевой научно-технической конференции "Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов", Краснодар, 1983 г.
6. Республиканской научно-технической конференции "Прогрессивные способы повышения прочности, надежности и долговечности конструктивных материалов", Баку, 1983 г.
7. Научных конференциях профессорско-преподавательского состава и аспирантов Азербайджанского технического университета в 1980-1992 гг.

ПУБЛИКАЦИИ. По теме диссертации опубликована 41 печатная работа, в том числе 5 авторских свидетельств.

СТРУКТУРА И ОБЪЕМ РАБОТЫ. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка литературы из 357 наименований и приложений. Содержит 381 стр. машинописного текста, 164 рисунка, 22 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ. Конструктивно все скважинные насосы состоят из цилиндра, плунжера, клапанов, замка, присоединительных и установочных деталей. При этом обеспечена максимально возможная унификация указанных узлов и деталей для удобства их замены. Из анализа конструкций деталей можно зафиксировать основной технологический признак большинства деталей насосного оборудования: трубчатая форма, что обуславливает последующие огра-

ничения рассматриваемых вариантов обработки двумя типовыми поверхностями: наружными и внутренними цилиндрическими. Это сужает возможные варианты видов обработки и видов инструментов, которые могут обрабатывать такие поверхности. Высокая твердость рабочих поверхностей деталей, а также требования по точности и шероховатости обработки рабочих поверхностей цилиндров и плунжеров обуславливают применение на финишных операциях шлифования и последующих отделочных операций (хонингования, притирки и др.).

В связи с тем, что изготовлением новых насосов и ремонтом их (в том числе изготовлением запчастей к ним) занимаются десятки заводов, расположенных в разных государствах содружества и вне его, которые имеют разные технологии финишных операций, становится нецелесообразным проводить сравнительный анализ техпроцессов разных заводов (из-за их многообразия) с целью выявления лучших вариантов. Учитывая, что преваляющей формой выхода из строя насосного оборудования является износ внутренних поверхностей цилиндров, работающих в агрессивной и жидкостно-абразивной среде, следует, на наш взгляд, решать для повышения износостойкости деталей более общую задачу: на основе анализа износа трущихся поверхностей деталей нефтяного оборудования наметить пути снижения его технологическими способами за счет совершенствования традиционных и разработки новых техпроцессов финишной обработки цилиндрических и конических внутренних поверхностей. Эти техпроцессы рационально применять к большинству разнообразных деталей насосного оборудования. Разработка новых общих типовых технологических решений при огромном разнообразии деталей является более коротким и эффективным путем достижения высокой износостойкости деталей. Обоснованность такого подхода объясняется тем, что только специальными исследованиями представляется возможным установить наследственную взаимосвязь финишных операций с предшествующими, которые вместе формируют износостойкий поверхностный слой.

Трудами И.В.Крагельского, Н.Б.Демкина, М.М.Хрущева, М.М.Тененбаума, Б.Н.Костецкого, Р.М.Матвеевского, А.М.Дальского, А.С.Проникова, М.И.Михина, В.Н.Виноградова, Г.М.Сорокина, В.Н.Кашеева, П.И.Ядерицына, В.С.Мухина, С.Н.Козырева, Н.А.Буше, В.В.Аликина, Л.В.Подзая, А.Ф.Прохорова, А.М.Сулима, Н.Е.Дьяченко, А.Н.Обсеенко, Э.В.Рыкова, Д.Д.Папшева, В.С.Комбалова, А.Г.Суслова, А.А.Маталина и др. установлено, что решающим фактором, определяющим долговечность деталей машин, является исходное состояние трущихся поверхностей.

Имеется мало работ по исследованию влияния параметров шероховатости и состояния поверхностного слоя на износ деталей нефтепромышленного оборудования. В настоящее время выбор и назначения параметров шероховатости поверхности деталей и назначения того или иного метода отделочной обработки их, в основном, базируется на практическом опыте и технических возможностях завода-изготовителя. Практически отсутствуют данные по величинам шероховатостей и состояния поверхностного слоя, формирующихся в процессе эксплуатации деталей нефтяного оборудования. Кроме того, технологическое обеспечение требуемого состояния поверхностного слоя после финишной обработки внутренней поверхности представляет в целом более трудную задачу по сравнению с наружной поверхностью, так как внутренняя поверхность сравнительно труднодоступна, а инструменты для ее обработки обладают меньшей жесткостью и более сложной конструкцией. Применяемые в настоящее время предварительные и окончательные методы обработки, создавая необходимую форму внутренней поверхности, часто не обеспечивают требуемой шероховатости и наилучшее состояние поверхностного слоя.

В работах И.В.Кудрявцева, В.М.Браславского, П.И.Ящерицына, Э.В.Рыжова, В.Г.Коновалова, М.А.Балтер, Д.Н.Проскурякова, Д.Д.Папшева, А.М.Кузнецова, В.М.Торбило, Г.И.Чекина, Л.А.Хворостухина, Э.Г.Грановского, В.М.Смелянского, А.А.Михайлова, В.С.Мухина, М.М.Иoffee, Л.И.Маркуса, Я.И.Бараца, Д.Г.Шнайдера, А.Н.Овсеенко, Л.Г.Одинцова, А.Ф.Прохорова и других изучены различные методы и даны основные преимущества отделочно-упрочняющей обработки.

Конструкции и условия эксплуатации трущихся пар нефтепромышленного оборудования во многом отличаются от таких распространенных пар, как цилиндропоршневые кольца двигателей внутреннего сгорания, плунжерной пары топливного насоса и др. Основные отличия пар нефтепромышленного оборудования заключаются в следующем: пара работает в агрессивной среде (нефть, вода, песок); длина сопряжения составляет $200+1800$ мм; длина хода деталей - $100+7000$ мм; величина диаметрального зазора - $0,002+0,20$ мм.

Таким образом, пары нефтяного оборудования очень специфичны и представляют собой пару трения высокоточных деталей при возвратно-поступальном движении, которые работают в осложненных условиях, способствующих интенсивному износу внутренней поверхности цилиндра.

Финишные операции обработки могут обеспечивать формирование

поверхности в широком диапазоне их свойств (шероховатости, напряжениям и упрочнению). Если в процессе обработки удастся получить свойства наиболее близкие к свойствам, которые устанавливаются на трущихся поверхностях после эксплуатационной приработки, то обеспечивается минимальный износ в процессе приработки. Это может быть достигнуто разными финишными процессами обработки (шлифованием, хонингованием, притиркой, выглаживанием и другими) на определенных режимах воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность.

Из-за многообразия марок сталей и прочностных свойств поверхностного слоя трущихся деталей (втулка-вал), обусловленных разными методами термической и финишной механической обработки, а также разными условиями изнашивания и приработки деталей в насосах разных конструкций, нецелесообразно устанавливать для каждой трущейся пары конкретные качественные показатели поверхностных слоев после приработки (шероховатость, микротвердость, величину и знак напряжений). Более рационально установить взаимосвязи изменения этих показателей в широком диапазоне с режимами и условиями выполнения разных методов финишной обработки с тем, чтобы в последующем при проектировании технологических процессов представлялась возможность обеспечения тех или иных требуемых оптимальных эксплуатационных характеристик качества конкретных деталей за счет выбора методов обработки по широкодиапазонным нормативам режимов обработки и характеристикам режущего инструмента.

2. ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ, НОВЫЕ КОНСТРУКТОРСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ

Исследование разных методов обработки выполнялось по единым методическим приемам.

Эксперименты по ротационному растачиванию выполнялись с установкой реза по второй геометрической схеме ротационного резания (обратное резание) и проводились на токарно-винторезном станке мод. 1К62 и токарном многорезновом полуавтомате мод. 1А730. При проведении экспериментов использовались ротационные резцы, оснащенные чашками из различных твердосплавных материалов: ВК8, ВК8, Т14К8, Т5К10, Т15К6, Т17К12.

Шлифование внутренних поверхностей деталей проводилось с применением универсальных шлифовальных станков. Ротационное хонингование отверстий проводилось на вертикально-хонинговальном станке мод. 3М82С, оснащенном специальными хонинговальными головками с алмазными роликами. На способ ротационного хонингования

отверстий получено авторское свидетельство (№ I345513).

Учитывая, что при ротационном хонинговании применяются бочкообразные алмазные ролики, наклоненные к оси хонинговальной головки под некоторым углом α (рис.1) и производя переход от первоначальной системы координат XUZ к вспомогательной X (рис.2) путем поворота первой вокруг оси OY на угол α для расчета координат точек алмазного ролика получены следующие аналитические выражения:

$$\begin{aligned} X_1 &= r [(m-1) \cos \varphi + \cos(m-1) \varphi] \cos \alpha \\ Y_1 &= r [(m-1) \sin \varphi - \sin(m-1) \varphi] \\ Z_1 &= r \cdot \Phi \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \cos \alpha \end{aligned} \quad (I)$$

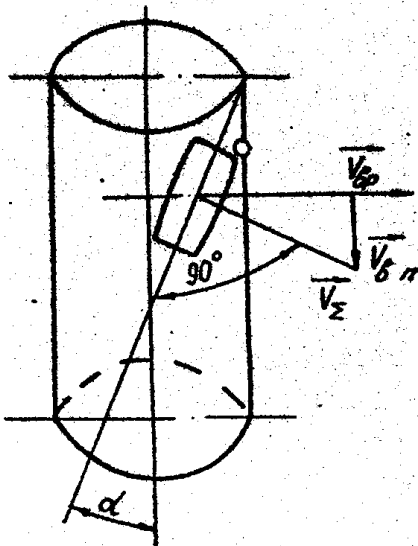


Рис.1. Схема обработки ротационным хонингованием

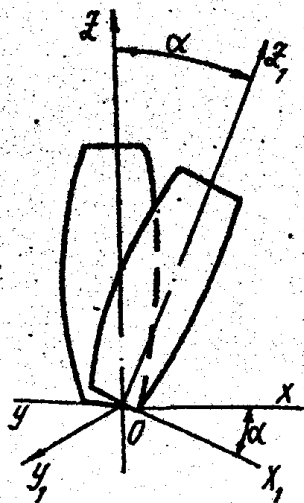


Рис.2. Схема перехода к новой системе координат

После соответствующих преобразований получим модуль истинной скорости единичного зерна

$$v_n = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} = \frac{v_{\beta} p}{m} x \quad (2)$$

$$x \left\{ \varphi \sin 2 \frac{m}{2} \varphi (1-m)^2 \cos^2 \alpha \cos^2 \left(1 - \frac{m}{2} \right) \varphi + \sin^2 \left(\frac{m}{2} - 1 \right) \varphi + \operatorname{tg}^2 \beta \cos^2 \alpha \right\}^{1/2},$$

где m - отношение радиуса внутренней цилиндрической поверхности детали R к радиусу ролика r ; β - угол подъема винтовой линии; φ - угол поворота головки.

Для того, чтобы боковая поверхность ролика соприкасалась с поверхностью детали не в отдельных точках, а по кривой линии (т.е. контурная линия осевого сечения ролика должна лежать на поверхности обрабатываемого отверстия), необходимо определить его требуемую форму.

Запишем уравнения цилиндрической поверхности с радиусом R

$$x^2 + y^2 = R^2, \quad (3)$$

и уравнение секущей плоскости

$$z = (x + R) \operatorname{ctg} \alpha. \quad (4)$$

Из (4) x выразим через z :

$$x = z \operatorname{tg} \alpha - R. \quad (5)$$

Подставим это выражение в уравнение (3), а y выразим через z :

$$y = \pm \sqrt{R^2 - (z \operatorname{tg} \alpha - R)^2}. \quad (6)$$

Чтобы получить уравнение искомой кривой, в секущей плоскости xOy , координату x заменим координатой x_1 :

$$x_1 = \frac{x}{\sin \alpha} = \frac{z}{\cos \alpha} - \frac{R}{\sin \alpha} = z \operatorname{sec} \alpha - R \operatorname{cosec} \alpha. \quad (7)$$

Наконец, учитывая, что $y = y_1$, получим

$$x_1 = Z \sec \alpha - R \operatorname{cosec} \alpha$$

$$y_1 = \pm \sqrt{R^2 - (Z \operatorname{tg} \alpha - R)^2}$$
(8)

Задаваясь значениями Z , определяем x_1 , y_1 , таким образом строим кривую действительного профиля бочкообразных роликов.

Для исследования процесса конического хонингования использован универсальный вертикально-сверлильный станок мод. 2Н135, оснащенный специальным самоустанавливающимся приспособлением.

Обработка осуществлялась специальными хонинговальными головками с регулируемыми углами конусности (авторское свидетельство № 1085786, № 1611709), оснащенными алмазными брусками типа АСВ, специальной трапециевидальной формы.

Для исследования процесса притирки разработано устройство, размещенное в корпусе и связанное с приводом штока для крепления притираемой детали, выполненное в виде двух полумуфт с торцовым кулачковым профилем (авторское свидетельство № 1103997).

Для исследования алмазного выглаживания разработаны специальные конструкции виброголовок, отличающиеся от известных конструкций повышенной производительностью за счет увеличения числа двойных ходов и возможности варьировать величину амплитуды осцилляции деформирующего инструмента в более широких пределах. Разработанные конструкции виброголовок позволяют произвести обработку на обычных токарно-винторезных и горизонтально-хонинговальных станках мод. 16К80 и СН-14. Исследования проводили на деталях нефтепромышленного оборудования, которые широко применяются в производстве. Шероховатость обработанной поверхности измеряли с помощью профилометра-профилографа мод. 201 с записью профилограмм обработанной поверхности.

При определении остаточных напряжений на втулках применяли способ акад. Н.Н. Давиденкова, поскольку втулки могут рассматриваться как тонкостенные трубы.

При исследовании микротвердости поверхностных слоев использовался метод "косого среза".

Качество обработанной поверхности изучалось на инструментальном микроскопе БМ-1.

Для проведения экспериментальных исследований по износу образцов использована машина, сконструированная на базе станка-качалки СКН-5.

Известно, что показатели резания можно связать с совокупностью факторов (геометрические параметры инструмента, элементы режима резания и др.) уравнением множественной регрессии, представляющей собой полином второй степени. Для построения математической модели зависимости шероховатости обработанной поверхности, остаточных напряжений и наклепа поверхностного слоя от перечисленных выше факторов, а также нахождения их рациональных значений было проведено экспериментальное исследование процессов с применением метода ортогонального планирования второго порядка. Все вычисления производились на ЭВМ ЕС-1061 с помощью специально составленной программы. Программа написана на алгоритмическом языке ФОРТРАН.

Исходными данными для программы являются: число факторов, число повторений опытов, натуральные значения факторов и результаты экспериментов.

Для получения рациональных значений факторов все полученные модели исследованы по определенным критериям. Для других исследований использованы классические методы оценки экспериментов.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ, ФОРМИРУЕМОГО РАЗЛИЧНЫМИ ФИНИШНЫМИ ОПЕРАЦИЯМИ

Учитывая достаточно четко выраженный характер выхода из строя типовых деталей насосов (определяющих их износостойкость и долговечность), становится целесообразным выделение таких типовых деталей в отдельные группы с разработкой для каждой группы (или для типового представителя группы) типовых технологических планов операций обработки с нормативными режимами резания и другими условиями обработки, формирующими наилучшие эксплуатационные показатели деталей. Однако, разработка таких типовых планов обработки затрудняется двумя обстоятельствами. С одной стороны, выход разных деталей из строя обусловлен разными показателями качества, например, износ - низкой микротвердостью и неоптимальной шероховатостью трущихся пар, усталостное разрушение и поломки - величиной и знаком напряжений в поверхностном слое и пр. С другой стороны, формирование в поверхностном слое наилучших показателей износостойкости и усталостной прочности (через шероховатость, наклеп и напряжение) при разных конечных финишных операциях обработки деталей, применяемых сегодня в практике разных заводов (шлифование, хонингование, притирка и выглаживание), даст для каждого вида обработки разные рациональные режимы резания и другие условия обработки, т.е. в каждом виде обработ-

ки одни режимы будут обеспечивать наименьшую шероховатость, другие - наибольшую микротвердость и наклеп, третьи - наивыгоднейшие напряжения в поверхностном слое. При этом два последних показателя в значительной степени связаны с технологическим процессом изготовления деталей наследуемыми этими же показателями от предыдущих операций и конечные значения наклепа и напряжений являются зачастую результатом совместного влияния предыдущей и последующих операций. Из-за противоречивости тенденций влияния режимов резания на эти показатели оказывается сложной разработка нормативов рациональных режимов резания.

В связи с этим рассматривается следующая методика экспериментальных исследований и представления их результатов. Для большинства применяемых в нефтяном машиностроении операций необходимо исследовать режимы резания и условия обработки в широком диапазоне их варьирования с целью определения значений, формирующих наилучшие показатели по шероховатости, наклепу и напряжениям. По таким результатам разработать нормативы режимов резания для каждого вида обработки с приведением не единых режимов резания, а разных режимов, одни из которых обеспечивают наиболее производительное достижение требуемой шероховатости, вторые - наибольшую микротвердость, третьи - наименьшие растягивающие или наибольшие сжимающие напряжения. Тогда в сочетании с данными общемашиностроительных нормативов, где даются режимы резания, обеспечивающие требуемую точность обработки, получается набор из вариантов рациональных режимов резания по четырем технологическим критериям: точности, шероховатости, наклепу и напряжениям. Для первых, являющиеся требованиями чертежа детали, выполняются обязательно выбором соответствующих режимов наибольшей производительности (для точности из указанных нормативов, для шероховатости из настоящего исследования), а режимы наибольшей микротвердости поверхностного слоя или наивыгоднейших напряжений выбираются по результатам настоящего исследования в зависимости от требуемого повышения эксплуатационных показателей.

В результате экспериментальных исследований установлены влияние глубины резания t , подачи S , скорости резания V , переднего угла заточки γ_3 на шероховатость R_a , остаточное напряжение и наклепа поверхностного слоя H при ротационном растачивании. Особенностью ротационного растачивания является увеличение высоты микронеровностей при глубине резания $t < 0,2$ мм, которому способствует снижение средней величины

толщины срезаемого слоя с уменьшением глубины резания. Снижается виброустойчивость процесса резания, возрастает интенсивность колебаний, причиной которых могут быть и изменение припуска вследствие биения заготовки, а также проскальзывание режущих чашек ротационных резцов по поверхности резания.

Увеличение шероховатости поверхности с ростом подачи S очевидно из геометрических соображений. Более интенсивное увеличение высоты микронеровностей при подаче $S > 0,4$ мм объясняется результатом роста силы резания и возникновением вибраций из-за нежесткости технологической системы.

Увеличение скорости резания V в основном приводит к уменьшению шероховатости поверхности. В отличие от обычного резания при ротационной обработке слабо выражены или вообще отсутствуют экстремумы зависимости $R_a = f(V)$. Уменьшение шероховатости поверхности с увеличением V является следствием снижения силовой напряженности процесса и облегчения процесса пластической деформации срезаемого слоя за счет повышения температуры в зоне резания.

Передний угол заточки γ_3 влияет на высоту микронеровностей постольку, поскольку он влияет на изменение характера пластического деформирования срезаемого слоя и образование нароста а это, в свою очередь, вызывает увеличение шероховатости обработанной поверхности. Однако, при ротационной обработке за счет непрерывного обновления активного участка режущего лезвия высота нароста незначительная и оказывает меньшее влияние на формирование микрорельефа обработанной поверхности.

С увеличением φ_y главный угол резца в плане также увеличивается, при этом уменьшается кинематический передний и увеличивается кинематический задний угол, что в совокупности приводит к увеличению высоты микронеровностей обработанной поверхности.

В результате расчетов была получена следующая модель процесса, характеризующая влияние t, S, V, γ_3 и φ_y на R_a

$$\begin{aligned}
 R_a = & 16,926 - 3,623t - 7,079S - 0,045V - 0,463\gamma_3 - \\
 & - 0,223\varphi_y + 2,492tS - 0,008tV - 0,059t\gamma_3 + 0,053t\varphi_y - \\
 & - 0,010SV - 0,050S\gamma_3 + 0,001V\gamma_3 + 3,574t^2 + 10,409S^2 + \\
 & + 0,006\gamma_3^2 + 0,003\varphi_y^2.
 \end{aligned}$$

Рациональными по шероховатости являются следующие величины параметров ротационного растачивания: $t = 0,6$ мм; $S = 0,39$ мм/об; $V = 2,2$ м/с; $\gamma_3 = 35$; $\varphi_y = 36,2^\circ$.

В отличие от обычного резания, при котором изменение глубины резания мало влияет на величину остаточных напряжений σ , при ротационном величина напряжений возрастает с увеличением глубины резания. Это объясняется кинематической особенностью процесса, при котором с увеличением t уменьшается скорость самовращения режущей части инструмента и величина кинематического заднего угла.

С увеличением подачи S величина остаточных напряжений непрерывно возрастает, что является следствием возрастания удельных нагрузок в контактных зонах между инструментом и обрабатываемым материалом, а увеличение скорости резания V приводит к уменьшению величины остаточных напряжений.

Увеличение переднего угла заточки при ротационном резании приводит к уменьшению величины остаточных напряжений, так как с ростом γ_3 уменьшается угол резания, что вызывает снижение степени деформирования срезаемого слоя.

С увеличением угла установки φ_y инструмента в горизонтальной плоскости уменьшается кинематический передний угол, что должно вызвать увеличение остаточной напряженности поверхностного слоя. Однако, одновременно с этим увеличивается задний угол, что вызывает уменьшение величины остаточных напряжений. Взаимодействие указанных факторов приводит к тому, что при углах установки $\varphi_y = 25^\circ \dots 35^\circ$ отмечается некоторое снижение величины остаточных напряжений.

Модель, характеризующая влияние t , S , V , γ_3 и φ_y на σ имеет вид:

$$\sigma = 247,7 + 233,3t + 311,1S - 21,4V - 19,6\gamma_3 + 18,1\varphi_y - 142,9t^2 - 184,5S^2 + 0,3\gamma_3^2 - 0,2\varphi_y^2 \quad (10)$$

Рациональными параметрами ротационного растачивания, обеспечивающими приемлемые остаточные напряжения, являются: $t = 1,0$ мм; $S = 0,52$ мм/об; $V = 2,2$ м/с; $\gamma_3 = 35^\circ$; $\varphi_y = 36^\circ$.

Увеличение глубины резания и подачи приводит к увеличению наклепа поверхностного слоя, что является достаточно очевидной закономерностью. С увеличением этих параметров возрастает площадь срезаемого слоя, а следовательно, и сопротивление резанию,

С изменением скорости резания в пределах $V = 1,2 \dots 3$ м/с наклеп поверхностного слоя уменьшается приблизительно на 1000–1200 МПа, что объясняется повышением температуры в зоне резания, снижением среднего коэффициента трения, облегчением пластического деформирования срезаемого слоя.

С увеличением угла установки ротационного резца в горизонтальной плоскости φ_y наклеп поверхностного слоя уменьшается на 10–15%, что можно объяснить уменьшением кинематического переднего угла.

Модель, характеризующая влияние t, S, V, γ_3 и φ_y на H имеет вид

$$H = 2811,5 + 616,6t + 2050S - 61,6V + 5,2\gamma_3 + 9,8\varphi_y - 280,6t^2 - 1409,5S^2 - 14,1V^2 - 0,2\gamma_3^2 - 0,2\varphi_y^2. \quad (II)$$

Рациональными по наклепу являются следующие величины исследованных параметров: $t = 1,0$ мм; $S = 0,52$ мм/об; $V = 2,2$ м/с; $\gamma_3 = 35^\circ$; $\varphi_y = 36^\circ$.

Результаты экспериментов по исследованию операции шлифования показывают, что увеличение скорости вращения детали V_g приводит к росту шероховатости обработанной поверхности. Как известно, с увеличением скорости вращения детали количество абразивных зерен, участвующих в процессе резания на данном участке, уменьшается. Поэтому фактическая площадь, подвергающаяся обработке, в зависимости от интенсивности увеличения V_g увеличивается, а число рисок от зерен круга остается прежним, что приводит к увеличению шероховатости поверхности.

Как известно, при повышении скорости вращения круга V_k совокупность его абразивных зерен приближается к сплошному режущему лезвию как в осевом направлении, так и по окружности. При этом составляющие силы резания постепенно уменьшаются, процесс стабилизируется, а вредные влияния вибрации технологической системы оказывают меньшее влияние на формирование микрорельефа обработанной поверхности R_a . Совокупность влияния вышеуказанных факторов приводит к уменьшению шероховатости R_a .

С увеличением зернистости круга Z шероховатость обработанной поверхности ухудшается, так как с ростом зернистости круга количество режущих зерен, участвующих в процессе резания, уменьшается.

Модель, характеризующая влияние V_g, V_k, S_n, Z и T (основное время) на R_a имеет вид:

$$R_a = 0,82 + 0,08V_g - 0,01V_k + 0,01S_n - 0,02Z - 0,01T. \quad (12)$$

Рациональные параметры процесса шлифования по отношению к шероховатости R_a имеют следующие величины: $V_g = 1,42$ м/с; $V_k = 36,6$ м/с; $S_n = 10,4$ мм/об; $Z = 32$; $T = 94$ с.

Результаты исследований по остаточному напряжению показывают, что уменьшение растягивающих напряжений при увеличении скорости вращения детали V_g является результатом уменьшения температуры в зоне контакта.

С увеличением продольной подачи S_n остаточные напряжения поверхностного слоя возрастает, так как с ростом подачи S_n температура в зоне резания увеличивается, что, в свою очередь, приводит к увеличению растягивающих остаточных напряжений.

С ростом зернистости абразивных кругов Z величина остаточных напряжений увеличивается, а увеличение времени обработки приводит к росту остаточных напряжений, что связано с увеличением времени воздействия теплового фактора в зоне контакта.

Зависимость σ от параметра шлифования имеет вид:

$$\sigma = 17,34 + 173,07V_g + 5,32V_k + 9,75S_n + 17,73Z + 2,04T - 108V_g^2 - 0,07V_k^2 - 0,36S_n^2 - 0,32Z^2 - 0,01T^2. \quad (13)$$

Рациональные значения параметров процесса шлифования для минимальных значений растягивающих остаточных напряжений поверхностного слоя следующие: $V_g = 1,42$ м/с; $V_k = 16,6$ м/с; $S_n = 12,4$ мм/об; $Z = 32$; $T = 105$ с.

С увеличением скорости вращения детали V_g , наклеп поверхностного слоя возрастает. Изменение величины наклепа поверхностного слоя в основном обуславливается влиянием силового и температурного факторов процесса шлифования. В данном случае преобладающим является силовой фактор и увеличение V_g приводит к повышению величины H . С увеличением скорости резания V_k мощность теплового потока растет, наклеп поверхностного слоя уменьшается. Кроме того, с увеличением скорости резания уменьшается время силового воздействия на металл, что приводит так-

же к снижению наклепа и микротвердости поверхностного слоя.

Увеличение продольной подачи S_n приводит к повышению наклепа поверхностного слоя H , так как увеличиваются суммарные силы резания и материал поверхностного слоя подвергается дополнительной деформации.

Чем больше геометрические параметры единичных зерен шлифовальных кругов, тем больше величина сил резания, приходящаяся на каждое зерно. При увеличении времени обработки продолжительность воздействия шлифовального круга на обрабатываемую поверхность повышается, что и приводит к росту наклепа поверхностного слоя.

Модель, характеризующая влияние V_g, V_k, S_n, Z и T на H , имеет вид

$$H = 6010,30 + 741,22V_g - 0,01V_k + 16,18S_n + 31,553 + \\ + 1,70T - 269,26V_g^2 - 0,10V_k^2 - 0,18S_n^2 - \\ - 0,523Z^2 + 0,01T^2 \quad (14)$$

Рациональные величины параметров процесса шлифования для получения наибольшего наклепа поверхностного слоя следующие: $V_g = 1,40$ м/с; $V_k = 36,6$ м/с; $S_n = 12,4$ мм/об; $Z = -40$; $T = 134$ с.

Увеличение скорости возвратно-поступательного движения $V_{g.n}$ при ротационном хонинговании приводит к уменьшению шероховатости поверхности, что является результатом уменьшения сечения срезов, производимых каждым работающим зерном, которые снижают суммарную силу резания.

Влияние окружной скорости $V_{ок}$ на шероховатость обработанной поверхности проявляется аналогичным образом. Однако, направление сил на единичное зерно при различных возвратно-поступательных и окружных движениях может быть различным.

Увеличение шероховатости поверхности R_a с увеличением давления $P_{уд}$ является результатом изменений условий резания, связанных с большей глубиной внедрения зерен в металл (рис.3а).

С увеличением зернистости Z алмазных роликов шероховатость поверхности увеличивается, так как количество зерен на фактических площадях контакта уменьшается и сечение единичных срезов при этом возрастает.

С увеличением продолжительности хонингования T отверстия шероховатость поверхности уменьшается. В исследованном диапазо-

не наибольшая интенсивность уменьшения шероховатости поверхности соответствует 30 с. Дальнейшее увеличение времени обработки на шероховатость поверхности R_a влияет незначительно.

Модель, характеризующая влияние $V_{в.п}$, $V_{ок}$, $P_{уд}$, β и T на R_a , имеет вид:

$$R_a = 1,17 - 0,429 P_{уд} - 0,003 \beta - 0,01 T - 0,013 V_{в.п} - 0,008 V_{ок} + 0,518 P_{уд}^2 \quad (15)$$

Наименьшая шероховатость достигается при следующих величинах рациональных параметров обработки: $P_{уд} = 0,6$ МПа; $\beta = 160/125$; $T = 60$ с; $V_{в.п} = 0,29$ м/с; $V_{ок} = 0,68$ м/с.

В отличие от других видов абразивной обработки, при которых изменение скорости резания существенно влияет на величину остаточных напряжений, при ротационном хонинговании величина остаточных напряжений с увеличением скорости резания уменьшается. Указанная закономерность характерна как для возвратно-поступательной $V_{в.п}$, так и для окружной $V_{ок}$ скорости. Уменьшение остаточных напряжений с увеличением скорости резания является результатом уменьшения сил резания, предопределяющих уменьшение степени пластического деформирования поверхностного слоя.

Увеличение давления $P_{уд}$ при хонинговании приводит к увеличению остаточных напряжений (рис.3б).

С увеличением зернистости алмазных роликов β величина сжимающих остаточных напряжений уменьшается. Увеличение времени обработки T положительно влияет на распределение остаточных напряжений.

Модель, характеризующая влияние $P_{уд}$, β , T , $V_{в.п}$ и $V_{ок}$ на σ , имеет вид

$$\sigma = 380,3 P_{уд} - 70,43 + 1,9 T + 1,4 V_{в.п} - 0,3 V_{ок} + 2,3 P_{уд} \cdot \beta + 0,5 P_{уд} \cdot T + 2,52 P_{уд} V_{ок} + 1,3 T^2 - 138,5 P_{уд}^2 - 0,27 V_{в.п}^2 - 0,08 V_{ок}^2 \quad (16)$$

Рациональными величинами параметров ротационного хонингования по отношению к σ являются: $P_{уд} = 0,61$ МПа; $\beta = 160/125$; $T = 82$ с; $V_{в.п} = 0,21$ м/с; $V_{ок} = 0,62$ м/с.

С увеличением $V_{в.п}$ наклеп поверхностного слоя H уменьшается.

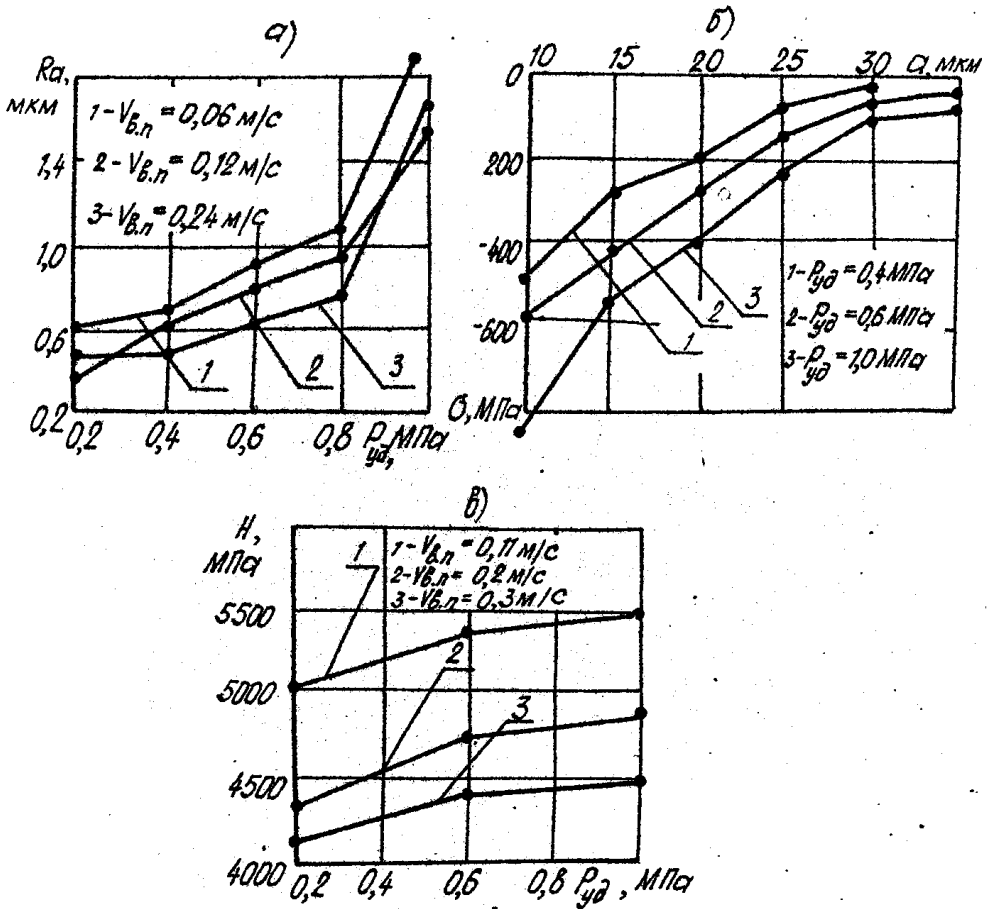


Рис.3. Влияние давления $P_{уд}$ на показатели качества поверхности (шероховатость Ra (а), наклеп H (б) и остаточное напряжение σ (в) при ротационном хонинговании

Указанная закономерность имеет место и для окружной скорости $V_{ок}$. С увеличением скоростей $V_{в.п}$ и $V_{ок}$ при $P_{уд} = const$ снижается глубина и площадь среза, обрабатываемого единственным зерном.

С ростом давления $P_{уд}$ до 0,6 МПа наклеп поверхностного слоя увеличивается (рис.3в).

Зависимость наклепа H от времени обработки T показывает, что рост продолжительности воздействия на поверхностный слой увеличивает наклеп поверхностного слоя. При этом из-за постепенного затупления режущих зерен процесс резания переходит из срезания металла в выглаживание микронеровностей.

Модель, характеризующая влияние $P_{уд}$, β , T , $V_{б.п}$, $V_{ок}$ на H , имеет вид:

$$H = 49976,23 - 244,31P_{уд} - 67859,03 - 0,06T - 24,67V_{б.п} - 5,81V_{ок} + 116,22P_{уд}^2 + 25676,34\beta^2 + 0,01T^2 + 0,94V_{б.п}^2 + 0,08V_{ок}^2 \quad (I7)$$

Рациональные величины параметров процесса по отношению к наклепу следующие: $P_{уд} = 0,6$ МПа; $\beta = 160/125$; $T = 60$ с ; $V_{б.п} = 0,24$ м/с; $V_{ок} = 0,7$ м/с.

Фрагменты влияния различных параметров ротационного хонингования на шероховатость поверхности R_a , остаточное напряжение и наклепа поверхности показаны на рис.3.

С увеличением скорости возвратно-поступательного движения $V_{б.п}$ при притирке шероховатость поверхности уменьшается. Указанная закономерность также характерна и для скорости вращательного движения $V_{ок}$.

Повышение шероховатости с увеличением $P_{уд}$ происходит в результате большого вдавливания абразивных зерен в обрабатываемый материал поверхностного слоя. Как известно, при внедрении в металл абразивных зерен, имеющих неблагоприятную для образования стружки геометрическую форму (отрицательные передние углы, значительные радиусы скругления вершин), происходит значительное пластическое деформирование металла. В этом случае только одна часть металла срезается зернами и удаляется с поверхности. Другая практически выдавливается из царапин, образуя навалы на их краях и увеличивая тем самым высоту неровностей поверхности.

В процессе притирки рост продолжительности воздействия абразивных зерен на обрабатываемую поверхность приводит к уменьшению шероховатости, что непосредственно связано с измельчением и затуплением абразивных зерен.

Модель, характеризующая влияние $V_{б.п}$, $V_{ок}$, β , β и T на R_a , имеет вид:

$$R\sigma = 0,1269 - 0,0329V_{\text{в.п}} - 0,0258V_{\text{ок}} - 0,0002P + 0,0123 - \\ - 0,0001T + 0,0022V_{\text{в.п}}^2 - 0,0001V_{\text{ок}}^2 + 0,0194V_3^2. \quad (18)$$

Рациональные параметры притирки, обеспечивающие минимальную шероховатость, следующие: $V_{\text{в.п}} = 0,2$ м/с; $V_{\text{ок}} = 0,76$ м/с; $P = 150$ кПа; $\beta = 32$; $T = 240$ с.

Результаты экспериментов показывают, что увеличение скоростей возвратно-поступательного $V_{\text{в.п}}$ и окружного $V_{\text{ок}}$ движений приводит к некоторому уменьшению остаточных напряжений поверхностного слоя. Как известно, с повышением возвратно-поступательной $V_{\text{в.п}}$ и окружной $V_{\text{ок}}$ скоростей, температура в зоне притирки возрастает, что непосредственно связано с увеличением пути трения абразивных зерен. Следует отметить, что при повышенных величинах $V_{\text{в.п}}$ и $V_{\text{ок}}$ съём металла также возрастает!

Чем больше величина давления P , тем больше внедряются единичные зерна в обрабатываемый материал, что и приводит к увеличению остаточного напряжения сжатия.

При увеличении зернистости β величина сжимающих остаточных напряжений уменьшается.

Увеличение величины остаточных напряжений с увеличением времени обработки T , является результатом увеличения продолжительности воздействия зерен на обработанную поверхность, что приводит к дополнительной деформации и упрочнению поверхностного слоя.

Модель, характеризующая влияние $V_{\text{в.п}}$, $V_{\text{ок}}$, P , β и T на σ , имеет вид:

$$\sigma = 695,18 - 202,99V_{\text{в.п}} - 52,35V_{\text{ок}} + 0,22P - 1,63\beta + 0,130T. \quad (19)$$

Рациональные величины процесса притирки в отношении остаточного напряжения поверхностного слоя следующие: $V_{\text{в.п}} = 0,22$ м/с; $V_{\text{ок}} = 0,79$ м/с; $P = 150$ кПа; $\beta = 32$; $T = 240$ с.

С увеличением скорости возвратно-поступательного движения наклеп поверхности снижается, что связано с уменьшением составляющих сил резания.

Указанная закономерность справедлива и для влияния скорости вращательного движения.

Притирка осуществляется при сравнительно низких скоростях и относительно незначительных давлениях. Поэтому уменьшение

наклепа при увеличении зернистости абразивных материалов, в первую очередь, связано с изменением условий пластического деформирования поверхностного слоя.

При увеличении времени воздействия зерен T на обрабатываемую поверхность наклеп поверхностного слоя увеличивается. Так как затупленные режущие зерна переходят из состояния микрорезания в выглаживание, материал поверхностного слоя подвергается дополнительной деформации, что и приводит к увеличению наклепа и микротвердости H .

Модель, характеризующая влияние $V_{\delta,п}, V_{ок}, P, Z, T$ на H , имеет вид

$$H = 9468,76 - 1185,86V_{\delta,п} - 686,09V_{ок} - 3,31P - 13,733T + 1,64T + 527V_{ок}^2 + 0,253^2 \quad (20)$$

Рациональные величины процесса притирки в отношении получения наибольшего наклепа поверхностного слоя следующие: $V_{\delta,п} = 0,22$ м/с; $V_{ок} = 0,80$ м/с; $P = 150$ кПа; $Z = 32$; $T = 240$ с.

Результаты исследований по алмазному выглаживанию показывают, что с увеличением силы вибронакатывания P до 150 Н шероховатость поверхности уменьшается. Однако дальнейшее ее увеличение приводит к постепенному увеличению R_a . Это является результатом того, что при малых величинах сил вибронакатывания контакт инструмента с обрабатываемой поверхностью происходит по вершинам неровностей, опорная площадь которых имеет небольшую величину. Дальнейшее увеличение шероховатости является результатом пластических искажений.

При постоянной глубине внедрения с увеличением радиуса деформирующего элемента r_{δ} шероховатость поверхности уменьшается. Указанная закономерность объясняется большой кратностью приложения нагрузки. При оптимальных значениях нормальной силы и других параметров процесса вибронакатывания увеличение числа оборотов заготовки приводит к незначительному увеличению шероховатости.

С увеличением величины подачи S шероховатость поверхности растет, что обуславливается геометрией, а также уменьшением времени воздействия деформирующего элемента инструмента на единицу площади обрабатываемой поверхности.

Увеличение величины амплитуды осцилляции деформирующего элемента приводит к уменьшению величины шероховатости R_a , так как с ростом величины ℓ интенсивность выглаживания микронеровностей поверхностного слоя увеличивается.

Модель, характеризующая влияние параметров выглаживания на R_a , имеет вид

$$R_a = 0,334 - 0,145z_p - 0,008l + 0,12p + 0,003n_3 + 0,16s - 0,037z^2. \quad (21)$$

Рациональными параметрами процесса по отношению к шероховатости являются следующие: $P = 150H$; $z_p = 1,5$ мм; $n_3 = 100$ об/м; $S = 0,09$ мм/об; $\ell = 2$ мм.

При алмазном выглаживании величина остаточных сжимающих напряжений с ростом усилий вдавливания P увеличивается.

С увеличением радиуса деформирующего элемента r_g величина сжимающих остаточных напряжений уменьшается, что является результатом уменьшения контактного давления, приходящегося на единицу площади. Увеличение числа оборотов шпинделя n_3 приводит к уменьшению величины и глубины залегания сжимающих остаточных напряжений.

Следует отметить, что уменьшение величины сжимающих остаточных напряжений при сравнительно больших оборотах шпинделя является результатом повышения температуры в зоне контакта деформирующего элемента с обрабатываемой поверхностью. Степень влияния подачи на остаточное напряжение зависит от контактного давления. При оптимальных давлениях изменения подачи в пределах, рекомендуемых для отделочно-упрочняющей обработки, практически не отражается на напряженности поверхностного слоя. Однако дальнейший рост подачи S вызывает существенное снижение напряжения.

Увеличение амплитуды осцилляции ℓ приводит к увеличению остаточного напряжения поверхностного слоя, что является результатом увеличения сил воздействия на единицу площади.

Модель, характеризующая процесс выглаживания по отношению к шероховатости R_a , имеет вид

$$\sigma = 945,05 + 0,39P - 26,98z_p - 0,46n_3 - 1448,08S - 9,39l. \quad (22)$$

Рациональные величины процесса по отношению к напряжению поверхностного слоя следующие: $P = 150\text{Н}$; $r_g = 1,5\text{ мм}$; $P_3 = 100\text{ об/мин}$; $S = 0,091\text{ мм/об}$; $l = 2,04\text{ мм}$.

Эксперименты показывают, что с увеличением усилия выглаживания P наклеп поверхностного слоя H растет до определенного предела. Увеличение радиуса деформирующего элемента r_g отрицательно влияет на величину и глубину распределения наклепа поверхностного слоя, так как с ростом r_g снижается величина контактного давления. (с ростом числа оборотов заготовки P_3 наклеп поверхностного слоя снижается, что является результатом уменьшения величины сил, деформирующих поверхностный слой. С ростом подачи S сокращается число повторных деформаций, что и вызывает снижение поверхностной твердости.

Модель, характеризующая влияние P , r_g , P_3 , S и l на H , имеет вид:

$$H = 1327,20 + 8,99P + 406,40r_g - 2,92P_3 + 74805,56S + 176,29l - 54,15r_g^2 - 9,36l^2 \quad (23)$$

Рациональные параметры процесса в отношении наклепа поверхностного слоя следующие: $P = 160\text{Н}$; $r_g = 2,09\text{ мм}$; $P_3 = 100\text{ об/мин}$; $S = 0,091\text{ мм/об}$; $l = 2,0\text{ мм}$.

Таким образом по результатам экспериментов и соответствующей статистической обработки их получены рациональные значения режимов резания и других условий для разных операций обработки, обеспечивающих наилучшие качественные показатели поверхностного слоя. Полученные данные использованы для последующей разработки нормативных материалов.

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ НА ИЗНОС ВТУЛОК, ОБРАБОТАННЫХ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ

Втулки с разными показателями качества поверхностного слоя обработанные в предыдущих экспериментах на разных финишных операциях были подвергнуты износным испытаниям на специальной установке (на базе станка-качалки СКНБ), имитирующей реальные эксплуатационные условия. Отдельные результаты износных испытаний приведены на рис.4. С увеличением шероховатости R_a от 0,25 до 1,0 мкм износ втулок после операции шлифования и хонингования увеличивается в 2 раза. С изменением шероховатости R_a

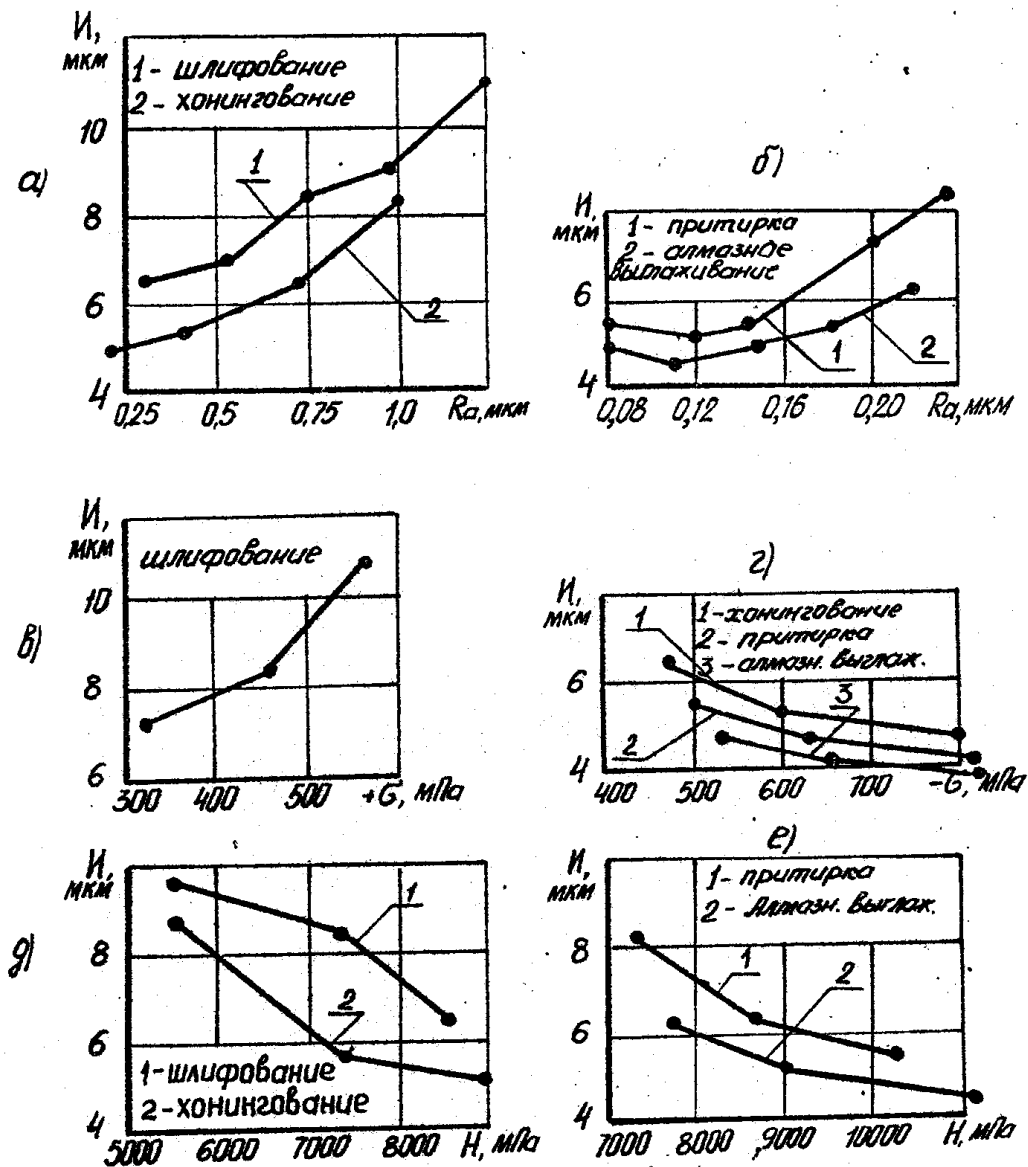


Рис. 4. Зависимость износа деталей I от шероховатости поверхности Ra , остаточного напряжения σ и наклепа поверхностного слоя H (обрабатываемый материал Ст 40Х)

от 0,11 до 0,24 мкм после операций притирки и алмазного выглаживания интенсивность износа втулок меняется меньше. (рис. 4а, 4б). В процессе приработки получается разное контактное давление. При одной и той же исходной шероховатости износ втулок из разных материалов различен. Так, износ втулок из стали 30Х13 оказался в 1,14 и 1,2 раза меньше, чем втулок соответственно из сталей 40Х и 45.

Зависимость износа втулок от шероховатости R_a можно разделить на три характерных участка: уменьшение износа до минимального; минимальный износ; последующее увеличение износа по сравнению с минимальным.

При уменьшении шероховатости от 0,2 до 0,12 мкм (для втулок, обработанных притиркой) и от 0,22 до 0,10 мкм (для втулок, обработанных алмазным выглаживанием) износ втулок уменьшается и достигает минимума (рис. 4б). Рост исходной шероховатости увеличивает износ втулок. При одинаковых шероховатостях после притирки и выглаживания меньший износ при выглаживании объясняется большим упрочнением (микротвердостью), а наличие минимума износа свидетельствует о совпадении этих величин шероховатостей с оптимальной эксплуатационной шероховатостью, устанавливаемой после приработки для условий эксплуатации. При этом для одной и той же исходной шероховатости после притирки износостойкость втулок из стали 30Х13 в 1,2...1,6 раза выше, чем у втулок соответственно из сталей 40Х и 45, а после выглаживания эта разница в 1,2...1,3 раза соответственно.

С увеличением растягивающих остаточных напряжений в поверхностном слое отверстий втулок износ увеличивается почти в два раза (рис. 4в). Причем при одинаковых значениях исходных остаточных растягивающих напряжений износ втулок из стали 30Х13 во всех случаях обработки оказался меньше, чем у других сталей.

При хонинговании отверстий втулок в поверхностном слое наблюдаются только остаточные сжимающие напряжения (рис. 4г). После притирки и алмазного выглаживания с увеличением значения

σ наблюдается уменьшение износа втулок в 1,2...1,25 раза. Следует отметить, что и в этом случае втулки из стали 30Х13 являются более износостойкими, чем остальные. Однако при алмазном выглаживании, в процессе которого значительно упрочняется поверхностный слой, дальнейшее увеличение сжимающих остаточных напряжений не приводит к существенному изменению износа втулок.

Различная интенсивность износа очевидно объясняется тем, что физико-механические свойства поверхностного слоя различных материалов при трении об абразивную прослойку по-разному сопротивляются воздействию силовых и температурных факторов износно-го процесса.

Характер изменения износа в зависимости от микротвердости поверхности отверстий втулок из различных материалов после шлифования и хонингования одинаков (рис.4д). Анализ этих зависимостей показывает, что с увеличением микротвердости поверхности от 5000 МПа до 8000 МПа и выше износ втулок уменьшается в 2... 3,5 раза. Наиболее износостойкими являются втулки из стали 30Х13, а наименее - из стали 45.

С увеличением микротвердости поверхности после притирки износ втулок уменьшается (рис.4е).

Зависимость износа втулок из различных материалов от микротвердости поверхности H при алмазном выглаживании можно разделить на два характерных участка (рис.4е): участок резкого уменьшения; участок умеренного уменьшения износа. С увеличением микротвердости исходной поверхности втулок из стали 30Х13 от 7000 МПа до 9000 МПа износ последних уменьшается в 2...2,5 раза, дальнейшее увеличение микротвердости не приводит к резкому уменьшению износа.

Износ втулок, обработанных алмазным выглаживанием, в 1,5; 2,0; 2,5 раза соответственно меньше, чем у притертых, хонингованных, шлифованных втулок (рис.4). Это объясняется тем, что в процессе алмазного выглаживания, наряду с уменьшением шероховатости, увеличением опорной поверхности и микротвердости поверхности в поверхностном слое создаются значительные по величине сжимающие остаточные напряжения. Вышеуказанное справедливо и для втулок, изготовленных из сталей 40Х и 45, обработанных также различными методами обработки.

Результаты экспериментов показывают, что интенсивное уменьшение параметра R_a в начальном периоде приработки (рис.5а) происходит для втулок, обработанных ротационным растачиванием, шлифованием и хонингованием, а его продолжительность определяется начальной шероховатостью. Незначительное изменение параметра R_a за весь период приработки у втулок, обработанных притиркой и алмазным выглаживанием, еще раз свидетельствует, что шероховатость, полученная этими методами, близка к оптимальной эксплуатационной установившейся шероховатости, к которой стре-

меняются величины разных исходных шероховатостей, полученных после различных видов обработки. Это явление, по нашему мнению, объясняется тем, что при изнашивании об абразивную прослойку, так же как при изнашивании в условиях граничного трения и трения со смазкой, в процессе приработки шероховатость изменяется в сторону приближения к шероховатости контртела до тех пор, пока не наступит некоторое равновесное состояние, характерное для условий трения пары "плунжер-цилиндр" насосов.

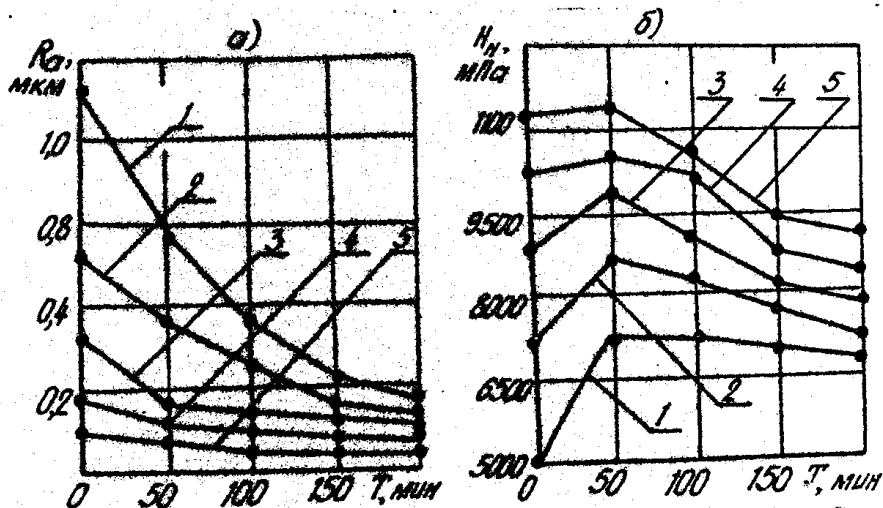


Рис. 5. Изменение величин шероховатости R_a (а) и микротвердости H_n (б) поверхности от времени приработки T (обрабатываемый материал 40Х: 1 - ротационная обработка; 2 - шлифование; 3 - хонингование; 4 - притирка; 5 - алмазное выглаживание)

В результате приработки изменяется и микротвердость исходной поверхности (рис. 5б). В начальном периоде испытания происходит некоторое повышение микротвердости исходной поверхности, обработанные различными видами механической обработки. Это является результатом высоких контактных давлений, характерных для начальных значений шероховатостей. Контактные давления уменьшаются по мере приработки за счет увеличения площадей реальных контактов, что в свою очередь уменьшает величину наклепа.

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о возможности существенного повышения износостойкости деталей насосов

и увеличения их долговечности технологическими методами обработки, сочетание которых можно устанавливать по следующей методике:

- установление последовательности сочетаний разных методов обработки и режимов резания по каждому методу, обеспечивающих после финишных операций диапазон изменения значений шероховатостей, микротвердостей и напряжений, охватывающих диапазон возможных эксплуатационных показателей качества;

- по этим данным определяются методы обработки (их последовательность) и конкретные режимы резания, обеспечивающие наибольшее приближение показателей качества полученных после финишной обработки (R_a, β, H) к эксплуатационным показателям изношенных деталей (R_{a_2}, β_2, H_2), чем и обеспечивается минимальная интенсивность износа и минимальный износ в период приработки.

5. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СОЧЕТАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ И РАЗРАБОТКА НОРМАТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Исследованиями установлено, что применение различных сочетаний технологических операций существенно влияет на эксплуатационные свойства деталей машин и особенно на их износостойкость. При этом некоторые характеристики физико-механических свойств поверхностного слоя наследственно передаются на последующие технологические операции.

Учитывая вышеизложенное, была проведена серия экспериментальных исследований с целью определения рациональных сочетаний технологических операций. На разных заводах, изготавливающих насосы и запчасти к ним, применяются различные планы обработки для деталей типа втулок, в которых общими операциями являются лишь первые операции растачивания (обычными призматическими резцами) или зенкерования, выполняемые до термообработки, и операции шлифования, выполняемые после термообработки. Последними операциями являются различные сочетания операций хонингования, притирки и алмазного выглаживания.

На основе анализа характера и интенсивности износа, рассмотренного в предыдущем разделе, и механизма формирования качественных параметров поверхностного слоя при различных методах обработки разработаны 9 вариантов последовательно выполняемых технологических операций, которые позволяют обеспечить требуемое качество изготавливаемых деталей нефтяного оборудования (табл. I). Отличительная особенность этих вариантов заключа-

Таблица I

№ пп	Название и номер вариантов технологических операций, выполняемых последовательно									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье	Шлифованье
2	Шлифов (чист.)	Шлифов (чист.)	Шлифов (чист.)	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье
3	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье	Хонингованье
4	Притирка ка	Хонинг (чист.)	Притирка ка	Притирка (чист.)	Притирка (чист.)	Притирка (чист.)	Притирка (чист.)	Притирка (чист.)	Притирка (чист.)	Притирка (чист.)
5	Алмазн. выглаж.	Притирка (чист.)	Притирка (чист.)	Алмазн. выглаж.	Алмазн. выглаж.	Алмазн. выглаж.	Алмазн. выглаж.	Алмазн. выглаж.	Алмазн. выглаж.	Алмазн. выглаж.
Показатели	$R_a = 1,25$ мкм - 0,40	$R_a = 1,25$ -0,15	$R_a = 1,25$ -0,15	$R_a = 1,25$ -0,14	$R_a = 1,25$ -0,14	$R_a = 1,25$ -0,40	$R_a = 1,25$ -0,15	$R_a = 1,25$ -0,24	$R_a = 1,25$ -0,14	$R_a = 1,25$ -0,14
качества	$\sigma = 610$ мПа - 720	$\sigma = 610$ -690	$\sigma = 610$ -690	$\sigma = 610$ -770	$\sigma = 610$ -770	$\sigma = 610$ -710	$\sigma = 610$ -690	$\sigma = 610$ -720	$\sigma = 610$ -770	$\sigma = 610$ -770
вариантов	$H = 8200$ мПа - 10920	$H = 8200$ -10050	$H = 8200$ -10050	$H = 8200$ -11400	$H = 8200$ -11400	$H = 8200$ -11900	$H = 8200$ -10050	$H = 8200$ -10400	$H = 8200$ -11400	$H = 8200$ -11400
Величина	$H = 12-14$	8 - 10	7 - 9	5 - 7	6 - 8	8 - 10	6 - 8	6 - 7	4 - 6	4 - 6
нагрузка										

Порядковые номера изменений конструкции	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7										

ется в том, что они ориентированы на широко используемое технологическое оборудование на заводах нефтяного машиностроения и по существу являются типовыми вариантами последовательности разных финишных операций, применяемых на большинстве разных заводов.

Для каждого варианта сочетаний операций в последних строках таблицы приведены в укрупненном виде различные показатели качества поверхностного слоя, формируемые всей совокупностью операций. Показатели приведены в виде диапазонов изменения шероховатостей, наклепа и напряжений для трех исследованных марок сталей (ст45, ст40Х, ст30Х13), различных режимов резания и условий обработки. В двух последних строках таблицы приведены диапазоны изменения износа, характерного для каждого варианта (за 240 минут работы), и порядковый номер относительного изменения суммарного основного времени каждого варианта. По данным этой таблицы можно для вновь проектируемого техпроцесса (создание нового производства или реконструкция действующего) выбирать вариант либо обеспечивающий минимальный износ деталей, либо - наибольшую производительность. Для действующего производства с техпроцессом совпадающим с одним из вариантов разработаны дополнительные таблицы режимов резания, характеристик инструментов и других условий обработки, изменение которых связано с изменением качественных показателей и величин износа поверхностей. Эти таблицы позволяют назначать рациональные режимы обработки разных операций, совместно обеспечивающих достижение наилучших конкретных показателей качества и минимальных значений износа. Последовательность использования нормативных таблиц иллюстрируется алгоритмом поиска рациональных технологических решений в виде укрупненной схемы, показанной на рис. 6.

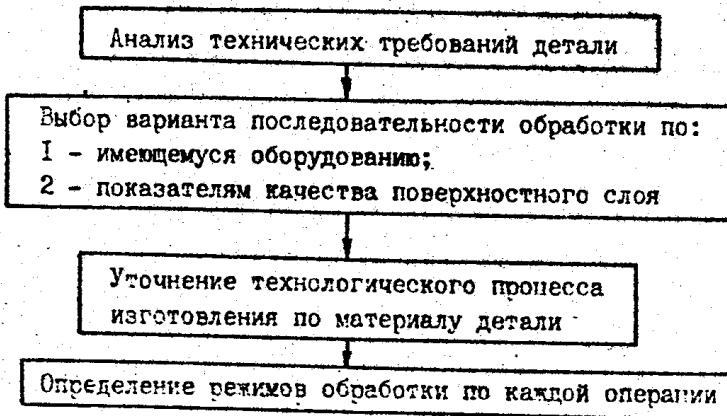


Рис. 6. Структурная схема алгоритма выбора вариантов обработки и определения режимных параметров операций

6. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ В ПРОИЗВОДСТВО

Для повышения производительности на ряде заводов вместо традиционного растачивания или зенкерования было внедрено ротационное растачивание.

Внедрение этого процесса взамен применявшегося на заводе позволило обеспечить:

- а) шероховатость обработанной поверхности R_a в пределах $1,63-2,5$ мкм;
- б) повышение производительности за счет увеличения скорости резания и подачи в $1,5...1,8$ раза;
- в) увеличение стойкости ротационных резцов в $2...3$ раза по сравнению с обычными стержневыми резцами;
- г) уменьшение изогнутости оси отверстия втулок после азотирования в $2...3$ раза.

При внедрении ротационных хонинговальных головок проверялись работоспособность бочкообразных роликов, рациональность выбранных режимов хонингования и конструктивно-геометрических параметров бочкообразного ролика. Внедрение ротационного хонингования взамен применявшегося на заводе обычного хонингования позволило обеспечить:

- а) шероховатость обработанной поверхности R_a в пределах $0,01... 0,02$ мкм;
- б) повышение производительности за счет дополнительного движения роликов и подачи в $1,5...2,5$ раза;
- в) увеличение стойкости бочкообразных роликов в $1,9...2,5$ раза по сравнению с обычными хонинговальными брусками.

При внедрении конического хонингования обработке подвергались заготовки седел клапанов из стали 40Х (угол конусности - 30° , после токарной операции). При хонинговании конусных отверстий седел после термообработки достигнуты погрешности по углу конусности не более $20''$, по непрямолинейности образующей и овальности не более $0,01$ мм.

При этом установлено, что трудоемкость обработки седел клапанов хонингованием в среднем в $1,4$ раза меньше трудоемкости обработки шлифованием.

Внедрение алмазного вибронакатывания позволило сократить процент брака в $1,9...2,2$ раза и увеличить износостойкость обработанных поверхностей в $1,5...1,8$ раза.

В качестве примера на рис.7 приведен сравнительный износ

втулок глубинных штанговых насосов, обработанных по заводской технологии (линия 1) и по усовершенствованной технологии (линия 2, вариант 8 табл. I). с применением рациональных режимов резания при ротационном хонинговании и при алмазном выглаживании. Допустимая величина износа в 20 мкм была получена на деталях обработанных по заводской технологии после 8750 часов работы насоса, а на деталях обработанных по новому техпроцессу - после 1250 часов.

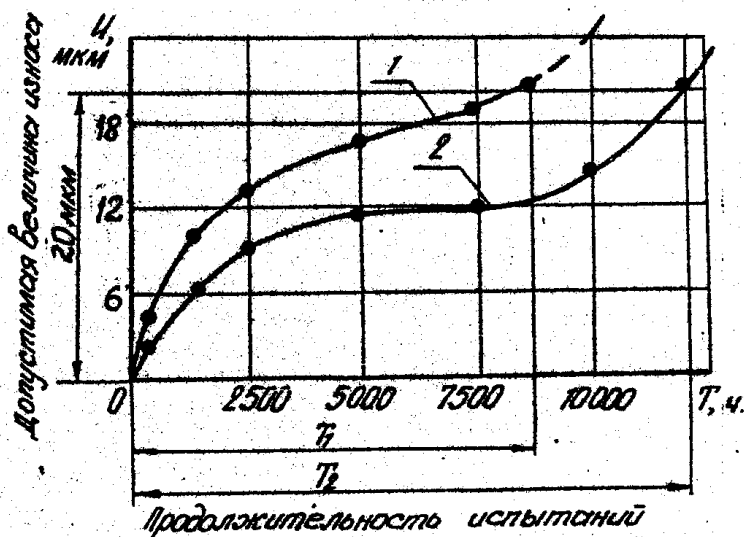


Рис. 7. Зависимость величины износа внутренних поверхностей втулок от продолжительности испытаний (1 - по существующей технологии; 2 - по новой технологии)

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнена классификация глубинных штанговых насосов и систематизация ответственных деталей, износ которых определяет их долговечность.

2. Разработаны, исследованы и внедрены новые способы и конструкции инструментов для финишной обработки, а именно: ротационное хонингование, конструкции конических хонинговальных головок, устройство для притирки с постоянным поджимом притира и головки для алмазного вибровыглаживания.

Для ротационного хонингования на базе теоретических исследований получены зависимости для обоснования угла наклона роликов и оси деталей при их установке в хонинговальной головке. Установлен угол наклона в пределах $8^{\circ} \dots 20^{\circ}$ как функция от диаметра обрабатываемого отверстия. Исходя из требований линейного контакта с поверхностью детали, получены параметры эллиптических кривых, являющихся образующими бочкообразных роликов.

3. С использованием новых разработок по результатам экспериментальных исследований получены математические модели, описывающие взаимосвязь режимов резания и других изменяемых условий обработки с комплексом показателей качества поверхности: шероховатостью обработанной поверхности, остаточными напряжениями и наклепом поверхностного слоя. Установлены рациональные параметры этих процессов, стабильно обеспечивающие требуемую шероховатость обработанной поверхности, остаточное напряжение и наклеп поверхностного слоя.

4. Установлено, что в поверхностном слое деталей после ротационного растачивания и шлифования формируются, главным образом, растягивающие остаточные напряжения, а после ротационного хонингования, притирки и алмазного выглаживания - сжимающие напряжения. Установлены функциональные связи между их величинами и условиями обработки.

5. Установлена экспериментальная взаимосвязь между показателями качества поверхностного слоя, полученных на разных сочетаниях последовательно выполняемых финишных операций обработки и интенсивностью износа деталей в реальных условиях эксплуатации. В исследованных поверхностях минимальному износу соответствует величины шероховатости $R_a = 0,1-0,15$ мкм, остаточных напряжений - $\sigma = 700-800$ МПа, наклепа поверхности $H = 9000-11000$ МПа.

6. Разработаны нормативные таблицы различных сочетаний последовательно выполняемых финишных операций и условий обработки с комплексом критериев оценки качества обработки (шероховатость, остаточные напряжения, наклеп, величина износа) и относительной производительности. Разработана методика и алгоритм выбора вариантов обработки, обеспечивающих достижение либо минимального износа либо максимальной производительности.

7. Износостойкость деталей нефтяного оборудования при рациональных режимах обработки увеличивается на 15-35% в зависимости от применяемых методов обработки. При этом срок службы

нефтепромышленного оборудования в среднем увеличивается в 1,4...
...1,6 раза.

8. Разработанные конструкции режущих инструментов, технологической оснастки и оборудования обеспечивают устойчивое протекание исследованных процессов. Результаты исследования внедрены на машиностроительных заводах им. Ф.Э.Дзержинского, Ю.Касимова, лейт-та Шмидта, Б.Сардарова и др.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Гафаров А.М., Алекперов А.Ю. Исследование возможности обеспечения минимальной шероховатости обработанной поверхности ротационными резами методом оптимизации параметров резания. Химическое и нефтяное машиностроение. - № 3. - 1979. - 2,0 с.

2. Гафаров А.М., Местанзаде В.Г. Исследование влияния основных параметров ротационного точения на составляющие силы резания при обточке тонкостенных втулок из стали 38ХМЮА. За технический прогресс. - № 3. - 1979. - 4,5 с.

3. Гафаров А.М., Местанзаде В.Г. Определение характеристики микрогеометрии шероховатых поверхностей, обработанных ротационными резами. За технический прогресс. - № 7. - 1979. - 2,0 с.

4. Гафаров А.М. Физико-механические свойства поверхностного слоя детали, обработанных ротационными резами. Известия вузов. - № 1. - 1980. - 3,0 с.

5. Гафаров А.М. Стойкостные характеристики режущих чашек ротационных резов из различных твердосплавных материалов. - За технический прогресс. - 3,0 с.

6. Гафаров А.М. Проявление технологической наследственности при различных методах обработки. Сб. вопросов технологии механообработки и сборки в машиностроении. - Саратов, 1980. - 2,0 с.

7. Гафаров А.М., Иззетов Н.А., Макмудзаде Т.А. Исправление погрешностей угла конусности конических отверстий алмазным хонингованием. Сб.: Применение прогрессивных инструментальных материалов и методов повышения стойкости режущих инструментов. - Краснодар, 1983. - 3,0 с.

8. Гафаров А.М., Амирджанов Ф.А. Проявление технологической наследственности по изогнутости оси отверстия втулок в процессе азотирования. Сб.: Технологическая надежность долговечности машин. - Баку, 1983. - 5,0 с.

9. Гафаров А.М., Абдуллаев А.А., Амирджанов Ф.А. Технологические способы повышения долговечности прошивных оправок. Сб.: Тезисы докладов конференции "Прогрессивные способы повышения прочности и надежности и долговечности конструкционных материалов".- Баку, 1984.- 4 с.

10. Гафаров А.М., Иззетов Н.А. Обеспечение технологической надежности при алмазном хонинговании. Сб.: Тезисы докладов конференции "Прогрессивные способы повышения точности, надежности и долговечности конструкционных материалов".- Баку, 1984.- 5 с.

11. Гафаров А.М., Иззетов Н.А. Определение геометрических параметров и формы алмазных брусков при коническом хонинговании. Сб.: Эффективность технологического оборудования в механосборочном производстве".- Баку, 1984.- 7 с.

12. Гафаров А.М. Исследования износа брусков при коническом хонинговании. Сб.: Точность и производительность в механосборочном производстве.- Баку, 1985.- 7,0 с.

13. Гафаров А.М. Проявление технологической наследственности при хонинговании. Сб.: Надежность и долговечность машин и механизмов.- Баку, 1986.- 2,5 с.

14. Гафаров А.М., Алиев Э.А. Определение удельной нагрузки при притирке конических отверстий. Сб.: Технологическое обеспечение качества машиностроительной продукции.- Баку, 1988.- 3,0 с.

15. Гафаров А.М., Иззетов Н.А. Влияние перебега брусков на точность обработки при хонинговании конических отверстий. Научно-технический сборник АзПИ им.Ч.Ильдырма "Обеспечение качества в механосборочном производстве.- Баку, 1989.- 4,0 с.

16. Гафаров А.М., Иззетов Н.А. Теория режущей способности алмазных хонинговальных брусков.- Сб.: Автоматизация машиностроения на базе гибких технологических систем и робототехнических комплексов. Баку, 1989.

17. Гафаров А.М., Бабаев Г.М. Характер изменения шероховатости поверхности от параметров процесса ротационного хонингования. Известия вузов.- № 6.- 1989,- 5,0 с.

18. Гафаров А.М., Бабаев Г.М. Остаточное напряжение поверхностного слоя при ротационном хонинговании. Известия вузов: - № 6, 1989.- 3,0 с.

19. Гафаров А.М., Бабаев Г.М. Точность обработки при ротационном хонинговании втулок.- Вестник машиностроения, 1990.- 1,5 с.

20. Гафаров А.М., Алиев Э.А. Хонинговальная головка для наружного хонингования длинных цилиндрических деталей. - Сб.: Обеспечение качества в механосборочном производстве, 1991. - 5 с.

21. А.С.№ 1086786 от XII.1983 г. Хонинговальная головка для обработки конических отверстий (Гафаров А.М., Иззетов Н.А., Эфендиев Р.М.).

22. А.С.№ 1103997 от 22 марта 1984 г. Устройство для притирки (Гафаров А.М., Иззетов Н.А., Мустафаев Ф.В.).

23. А.С.№ 1345513 1990 г. Способ хонингования отверстий (Гафаров А.М., Лупкин Б.В.).

24. А.С.№ 1611709, 1990 г. Хонинговальная головка для обработки конических отверстий. (Гафаров А.М., Иззетов Н.А.).

25. А.С.№ 1590350, бюл.изд.№ 33, 1990 г. Устройство для наружного хонингования (Гафаров А.М., Алиев Э.А.)