

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«УЛЬЯНОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ  
ИМ. П. А. СТОЛЫПИНА»

На правах рукописи

АДАКИН ВЯЧЕСЛАВ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МНОГОПРОХОДНОГО ХОЛОДНОГО  
НАКАТЫВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ШЛИЦЕВЫХ  
ПРОФИЛЕЙ НА ВАЛАХ

Специальность 05.02.09 – Технологии и машины обработки давлением

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель  
кандидат технических наук,  
доцент Г. Д. Федотов

Санкт-Петербург – 2014

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 5  |
| 1 Обзор и анализ научно-технической информации по износу деформирующего инструмента и его влиянию на качество прямоугольных шлицевых профилей на валах при многопроходном холодном накатывании.. | 9  |
| 1.1 Область применения многопроходного пластического деформирования шлицевых профилей на валах.....  | 9  |
| 1.2 Инструментальные материалы, применяемые при многопроходном холодном пластическом деформировании шлицевых профилей на валах из среднеуглеродистых сталей.....                                 | 22 |
| 1.3 Износ инструмента при холодном пластическом деформировании сталей.....   | 28 |
| 1.4 Методы повышения долговечности деформирующего инструмента.   | 37 |
| 1.5 Внешнее трение в пятне контакта «инструмент – заготовка».....  | 40 |
| 1.6 Выводы. Цель и задачи исследования.....  | 44 |
| 2 Напряженное состояние накатного ролика при формировании шлицевых профилей на валах холодным пластическим деформированием....   | 48 |
| 2.1 Расчёт усилий на деформирование при многопроходном холодном накатывании шлицевых профилей на валах.....  | 48 |
| 2.2 Математическая модель расчёта площади контакта «инструмент – заготовка».....   | 54 |
| 2.3 Расчёт нормальных и тангенциальных напряжений, действующих на накатной ролик.....  | 60 |
| 2.4 Классификация погрешностей при холодном пластическом деформировании шлицевых профилей на валах, влияющих на стойкость инструмента.....   | 65 |
| 2.5 Влияние размеров накатного ролика и заготовки на долговечность инструмента.....  | 80 |
| 2.6 Выводы.....  | 89 |

|  |     |
|--|-----|
| 3 Методика проведения исследований, аппаратура, оборудование.....  | 91  |
| 3.1 Инструментальные и обрабатываемые материалы.....   | 91  |
| 3.2 Оборудование для нанесения покрытий.....   | 91  |
| 3.3 Исследование параметров структуры и свойств покрытий.....  | 94  |
| 3.4 Изучение микроструктуры, микротвёрдости и шероховатости накатных роликов.....  | 98  |
| 3.5 Исследование образцов накатных роликов с покрытиями на машине трения.....  | 103 |
| 3.6 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований образцов накатных роликов с покрытиями на машине трения..  | 104 |
| 3.7 Исследование прямолинейности и толщины шлицевых профилей относительно оси детали.....  | 107 |
| 4 Повышение долговечности инструмента при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах в холодном состоянии.....       | 109 |
| 4.1 Механизм изнашивания накатных роликов при холодном пластическом деформировании шлицевых профилей на валах.....                 | 109 |
| 4.2 Совершенствование технологииковки шлиценакатных роликов.....   | 116 |
| 4.3 Моделирование напряженного состояния инструмента и заготовки при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах..... | 123 |
| 4.4 Повышение долговечности накатных роликов применением износостойких покрытий полученных методом КИБ.....                        | 135 |
| 4.4.1 Результаты лабораторных исследований износостойкости накатных роликов с износостойкими покрытиями и их анализ.....           | 138 |
| 4.4.2 Определение оптимальных параметров по моменту трения покрытий (P6M5, TiN, TiCN, TiZrN).....                                  | 143 |
| 4.4.3 Анализ математических моделей момента трения с помощью двумерных сечений.....  | 146 |
| 4.5 Результаты лабораторных исследований остаточных напряжений в накатных роликах и их анализ.....                                 | 147 |

|  |     |
|--|-----|
| 4.6 Выводы.....  | 153 |
| 5 Опытнo-промышленная проверка стандартных и исследовательских<br>шлищенакатных роликов в условиях массового производства на<br>стабильность процесса шлищенакатывания и точность шлицев на валах..... | 155 |
| 5.1 Исследование механизма изнашивания шлищенакатных роликов с<br>покрытиями, полученными методом КИБ.....   | 155 |
| 5.2 Промышленная проверка по влиянию шлищенакатных роликов с<br>износостойкими покрытиями на точность шлицев на валах.....   | 160 |
| 5.3 Техничo-экономическое обоснование применения накатных<br>роликов с износостойкими покрытиями.....  | 162 |
| 5.4 Выводы.....  | 164 |
| Общие выводы.....  | 166 |
| Список основных сокращений и условных обозначений.....   | 168 |
| Библиографический список.....  | 170 |
| Приложения.....  | 186 |
| Приложение А. Патенты.....   | 187 |
| Приложение Б. Ковка накатных роликов.....  | 189 |
| Приложение В. Планирование эксперимента.....   | 195 |
| Приложение Г. Поверхности отклика.....   | 203 |
| Приложение Д. Двухмерное сечение поверхности отклика.....  | 206 |
| Приложение Е. Ведомость замены накатных роликов.....   | 209 |
| Приложение Ж. Параллельность и толщина шлиц при накатывании<br>шлицевого профиля на валах.....   | 211 |
| Приложение И. Акт производственных испытаний накатных роликов...   | 218 |



## ВВЕДЕНИЕ

Главными условиями развития экономики являются рациональное использование всех видов ресурсов, ускорение научно-технического прогресса, широкое использование высокопроизводительных, ресурсосберегающих технологий, повышающих качество выпускаемых изделий и их конкурентоспособность.

Технология современного производства деталей машин и механизмов характеризуется снижением удельного веса обработки металлов резанием и всё возрастающим распространением различных методов обработки давлением.

Обработка металлов методом пластической деформации значительно уменьшает отходы металла в стружку, сокращает расход электроэнергии, инструмента и снижает затраты труда. Кроме этого, детали, изготовленные этим методом, обладают более высокими механическими и эксплуатационными качествами, имеют лучшую структуру по сравнению с деталями, изготовленными резанием.

Одной из деталей, широко применяемых в машиностроении, является шлицевый вал – важнейший из элементов в системах передач. При изготовлении шлицевые валы требуют значительных трудозатрат.

В последнее время при производстве шлицев на валах всё большее распространение приобретают экономичные, безотходные процессы формообразования, основанные на методах пластической деформации, взамен шлицефрезерования.

Наибольшее развитие и применение среди этих процессов получил метод продольного накатывания шлицев на валах многороликовыми головками.

По этому методу образование всех шлицев на валах осуществляется одновременно радиально-расположенными роликами, которые расположены в одном узле «накатная головка», и приводятся во вращение путем продольного проталкивания вдоль исходной заготовки вала в холодном состоянии.

Этот метод накатывания шлицев является прогрессивным, высокопроизводительным, экономичным с сокращенным расходом металла в стружку.

Отличаясь высокой производительностью, способ накатывания обеспечивает более высокое качество шлицевых соединений за счёт улучшения чистоты по-

верхности и одновременного упрочнения шлицев. Но, несмотря на явные преимущества прогрессивного метода изготовления шлицевых валов накатыванием шлицев в холодном состоянии, внедрение в производство связано с определенными трудностями. Они заключаются в том, что процесс формообразования шлицев пластическим деформированием в холодном состоянии изучен недостаточно, в связи с нераскрытыми причинами разрушения накатного инструмента и влияния инструмента на точность геометрических размеров шлицевого профиля.

Одним из способов повышения работоспособности накатных роликов и повышения точности шлицевого профиля, а так же снижения усилий деформирования и контактных напряжений является нанесение на их рабочие поверхности износостойких покрытий. Наиболее широкое применение в нашей стране получил метод конденсации вещества в вакууме с ионной бомбардировкой (КИБ). Этот метод универсален с точки зрения возможности нанесения износостойких покрытий различного состава и строения, позволяющих изменять свойства поверхностного слоя в широких пределах.

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (СПбГПУ, г. Санкт-Петербург) на кафедре «МИТОМД» и в ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П. А. Столыпина» (УГСХА им. П. А. Столыпина, г. Ульяновск) на кафедре «Техническая механика» в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ (НИР).

В настоящей работе представлены результаты теоретико-экспериментальных исследований напряжённого состояния накатного инструмента, как без покрытия, так и с однослойным многокомпонентным покрытием  $TiZrN$ , влияния нанесённого покрытия на механизм изнашивания накатных роликов, а так же на геометрию шлицевого профиля. На основе данных исследований разработана технологияковки и термической обработки шлиценакатных роликов. В экспериментальной части работы представлены результаты исследования механизма изнашивания шлиценакатных роликов с покрытиями, полученными методом КИБ, а так же результаты лабораторных исследований влияния износостой-

ких покрытий на работоспособность шлиценкатных роликов и промышленная проверка шлиценкатных роликов с разработанной технологиейковки и износостойкими покрытиями в условиях массового производства на стабильность процесса шлиценакатывания и точность шлицев на валах, расчёт технико-экономической эффективности от использования результатов работы.

На защиту выносятся:

1. Математическая модель расчёта площади контакта «инструмент-заготовка».
2. Математическая модель расчёта нормальных и касательных напряжений на контактных поверхностях накатных роликов при холодном деформировании шлицевых профилей.
3. Механизм изнашивания шлиценкатных роликов при холодном пластическом деформировании профилей на валах.
4. Рекомендации повышения стойкости шлиценкатных роликов при холодном пластическом деформировании среднеуглеродистых сталей путём совершенствования схемыковки быстрорежущей стали Р6М5 и нанесения износостойких покрытий TiN, TiZrN, TiCN методом КИБ на профилирующие поверхности накатных роликов.
5. Опытнo-промышленная проверка и оценка экономической эффективности разработанных мероприятий повышения стойкости накатных роликов в условиях действующего производства на ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска. Работа выполнена с использованием основных положений теории пластического деформирования в холодном состоянии, физики твёрдого тела, механики разрушения, современных методов микрорентгеноструктурного анализа, математических методов моделирования и статистической обработки экспериментальных данных на ЭВМ. Теоретические положения подтверждены лабораторными исследованиями и производственными испытаниями.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

- разработана конструкция подвижного сферического упора накатного стана 1126 ПС для снижения влияния погрешностей предварительной обработки

заготовок на точность накатываемых профилей.

- разработаны мероприятия по повышению долговечности накатного инструмента и точности шлицевых профилей путём снижения сил трения на профилирующих поверхностях накатных роликов.

- разработаны рекомендации повышения стойкости шлиценакатных роликов при холодном пластическом деформировании среднеуглеродистых сталей путём нанесения износостойких покрытий TiN, TiZrN, TiCN методом КИБ на профилирующие поверхности накатных роликов и совершенствования схемыковки накатных роликов. Применение износостойких покрытий и совершенствование схемыковки накатных роликов обеспечило повышение их долговечности в 1,9 раза.

- разработана и внедрена в производство оснастка для нанесения износостойких покрытий методом КИБ на профилирующие поверхности накатных роликов в условиях «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска при производстве карданных валов для автомобилей УАЗ.

Достоверность результатов подтверждается:

- адекватностью результатов, полученных при использовании программных продуктов SolidWorks и DEFORM-3D, результатами аналитических и экспериментальных решений;

- результатами лабораторно-производственных исследований и опытно-промышленных испытаний накатных роликов с многокомпонентным износостойким покрытием TiZrN;

- новизна технических решений подтверждается патентом на изобретение и патентом на полезную модель.

Основные положения работы доложены на международных, всероссийских, региональных конференциях, научно-технических семинарах. По теме диссертации опубликовано 11 работ, в которых отражено её основное содержание. Среди них 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 6 статей в сборниках материалов конференций, патент на изобретение и патент на полезную модель.

# **1 Обзор и анализ научно-технической информации по износу деформирующего инструмента и его влиянию на качество прямоугольных шлицевых профилей на валах при многопроходном холодном накатывании**

## **1.1 Область применения многопроходного пластического деформирования шлицевых профилей на валах**

В настоящее время в машиностроении накоплен большой опыт обработки шлицевых деталей. Наряду с дальнейшим развитием традиционных методов шлицеобработки разработаны и внедрены в промышленности новые высокопроизводительные методы формообразования шлицев. Выбор того или иного технологического процесса шлицеобработки определяется видом производства, конструктивными особенностями детали, производительностью и экономической целесообразностью.

Вопросу исследования инструмента и точности при различных видах обработки давлением: ковке, штамповке – посвящено немало работ. Значительно меньше работ отражают эти вопросы при прокатке (Губкин С. И., Целиков А. И., Осколков А. И., Якобсон М. О., Никитин Г. С., Колмогоров В. Л., Унксов Е. П., Качанов М. Л., Хилл Р., Джонсон В. Шофман Л. А. и др. [1-22]). Что касается исследований инструмента и точности при накатывании шлицев, то этот вопрос почти не освещен в литературе (Проскуряков Ю. Г., Козырев Ю. Г., Кобелькова С. Ф., Усиков И. К., Лындин В. А., Писаревский М. И., Федотов Г. Д., Востров В. Н., Андреев А. П., Мазуренко Ю. П.).

По сравнению с методами обработки резанием холодное пластическое формообразование имеет существенные преимущества и большие перспективы. Накатывание сопровождается интенсивным упрочнением материала детали и повышением твердости поверхности. Износостойкость шлицевых валов, полученных пластическим деформированием, выше, чем фрезерованных, от 30 до 40 % [23]. По данным ЭНИМСа, накатанные шлицы при скручивании от 10 до 20 % прочнее фрезерованных. При накатке предел прочности на разрыв у образцов,

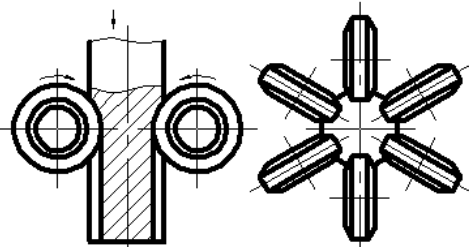
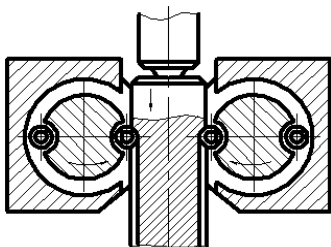
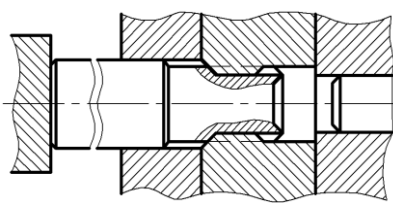
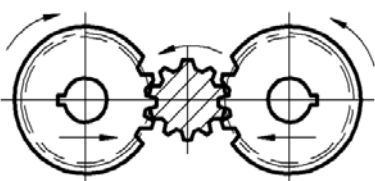
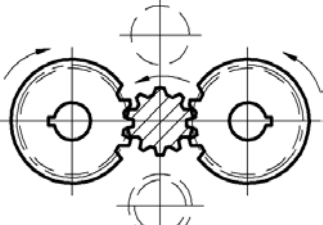
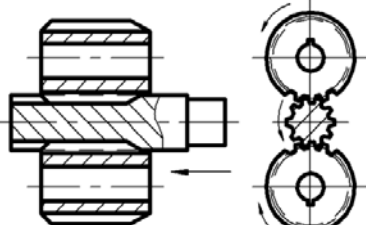
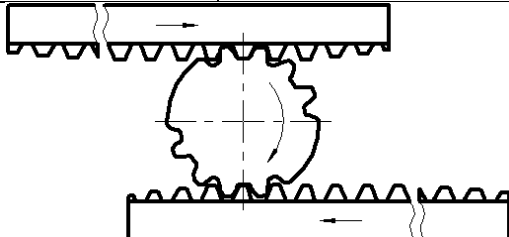
вырезанных из поверхностных слоев вала, от 20 до 80%, а центральных слоев на 40 % выше, чем без накатки. При пластическом формообразовании отсутствует разрушение зерен структуры, зерна располагаются по контуру профиля шлицев, что повышает усталостную прочность шлица и уменьшает вероятность появления трещин. Параметр шероховатости обработанной поверхности в зависимости от метода и режима обработки  $R_a$  от 0,16 до 0,25 мкм. Средняя трудоемкость операций по обработке шлицевого профиля валов резанием червячными фрезами составляет около 50-60 % от общей трудоёмкости изготовления шлицевых валов.

Технологическая себестоимость операций накатки шлицев для хорошо освоенных процессов значительно ниже, чем при обработке резанием. Это объясняется более высокой производительностью, экономией материала (до 13 %), меньшими затратами на инструмент и амортизацию оборудования. Важным преимуществом накатывания шлицев перед обработкой методом резания является высокая размерная стойкость инструмента. При накатывании шлицев первоначальная точность практически сохраняется в течение всего времени эксплуатации инструмента.

За последние годы в нашей стране и за рубежом разработано большое число методов пластического формообразования шлицев на валах (таблица 1.1), которые можно разделить на две основные группы: методы копирования и методы огибания. В таблице 1.1 рассматриваются те методы накатки, которые получили внедрение в машиностроении.

Методом радиальной штамповки получают зубья, например, на станке фирмы «Мичиган Тул» [2]. Радиальную штамповку осуществляют при одновременном перемещении пуансонов к оси заготовки, количество пуансонов соответствует числу впадин шлицевого вала, а форма рабочей части пуансона – профилю впадины. Формообразующая головка станка имеет кольцевой корпус с пазами, в которых устанавливают связанные с гидроцилиндрами пуансоны. Радиальную штамповку зубьев можно также осуществлять на гидравлических и кривошипно-шатунных прессах в специальных штампах.

Таблица 1.1 – Способы получения шлицевых профилей пластическим деформированием

| <b>I. Методы копирования</b>   |   |  |
|--|---|--|
| 1. Формообразование прямобочных профилей на валах радиальной штамповкой              |   |  |
| 2. Продольное накатывание шлицев многороликовой головкой                             | 3. Ударное накатывание роликовыми головками   | 4. Редуцирование в жёстких матрицах  |
|     |   |   |
| <b>II. Методы огибания</b>   |   |  |
| 1. Накатывание шлицев на валах круглыми зубчатыми роликами                           |   |  |
|    |  |  |
| с радиальной подачей роликов   | с тангенциальной подачей заготовки  | с осевой подачей заготовки   |
| 2. Накатывание профилей плоскими рейками   |   |  |
|  |   |  |

Метод радиального выдавливания зубьев с конусными впадинами получил внедрение на Минском тракторном заводе при изготовлении поворотной цапфы трактора «Беларусь».

Продольное накатывание шлицев многороликовой головкой заключается в проталкивании заготовки через неприводные, свободно вращающиеся ролики, установленные в специальной головке. Число роликов равно числу зубьев вала, а форма рабочей поверхности соответствует форме шлицевой впадины. При накат-

ке вал устанавливают в специальные центры, усилие проталкивания передается через верхний центр и воспринимается верхним торцом заготовки. Нижний центр в этом случае является поддерживающим и служит для правильной установки заготовки перед накаткой. Оси вращения роликов расположены в плоскости, перпендикулярной оси заготовки.

Процесс холодного пластического деформирования (продольного накатывания) осуществляется следующим образом (рисунок 1.1).

Заготовка зажимается в центрах, а накатывание шлицев производится продольным перемещением роликов с накатной головкой. Размеры и профиль рабочей части накатных роликов соответствуют размерам и профилю шлицевых канавок вала. Накатные ролики смонтированы в накатной головке так, что их оси расположены перпендикулярно к оси заготовки. Обычно число роликов соответствует числу шлицевых канавок вала.

По конструктивно-технологическим признакам процессы продольного накатывания можно подразделить на несколько разновидностей [24, 25]: накатывание за один проход, многопроходное накатывание, накатывание с делением (круговым и маятниковым), многорядное накатывание, накатывание охватывающими роликами.

При накатывании за один проход количество накатных роликов соответствует числу шлицевых канавок вала. Ролики сразу сведены на расчетный окончательный размер и за один двойной ход формообразуют шлицы на полную высоту.

Схема многопроходного накатывания аналогична схеме накатывания за один проход, только в этом случае шлицы формируются за несколько двойных ходов с периодической радиальной подачей накатных роликов (рисунок 1.1,а).

Накатывание с делением происходит по двум схемам: с круговым делением (рисунок 1.1,б) и маятниковым (рисунок 1.1,в). Обычно в этом случае число роликов выбирается кратным количеству шлицев. Промежуточные канавки формообразуются за счет поворота заготовки на величину шага. Такое накатывание осуществляется за несколько проходов с периодической радиальной подачей накатных роликов.



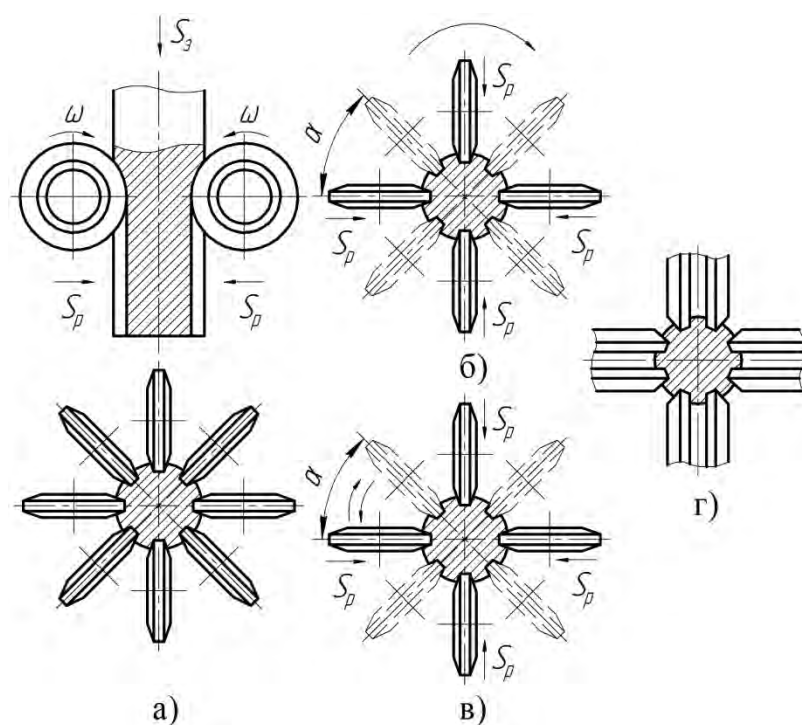


Рисунок 1.1 – Схемы продольного накатывания шлицев: а) без деления;  
 б) с круговым делением; в) с маятниковым делением;  
 г) охватывающими роликами.

При круговом накатывании после каждого двойного хода заготовка поворачивается на величину шага, причем деление (поворот заготовки) происходит в одну сторону. При таком процессе каждый последующий ролик попадает в канавку, предварительно сформированную предыдущим роликом.

При накатывании с маятниковым делением заготовка поворачивается на один угловой шаг. После окончания накатывания заготовка возвращается в исходное положение. При этом каждый ролик формообразует две смежные канавки.

Конструктивная особенность многорядного накатывания заключается в том, что ролики в накатной головке располагаются в несколько рядов со смещением вдоль оси заготовки. Чаще всего их располагают в два ряда через шаг. Обычно расстояние между рядами не превышает 5-7 мм (во избежание развала шлицев). Этот способ применяется для накатывания валов со сквозными шлицами.

Накатывание охватывающими роликами отличается тем, что ролики имеют более сложный профиль, позволяющий одним роликом деформировать одновременно две канавки (рисунок 1.1,г). Один зуб шлицевого вала охватывается с двух

сторон роликом, а следующий формообразуется сторонами двух смежных роликов. При таком накатывании число роликов сокращается вдвое, поэтому таким способом наиболее целесообразно накатывать валы с большим числом шлицев (16 и более), где конструктивно сложно разместить большое число роликов.

Накатывание шлицев большой длины на валах пониженной жесткости за один проход в холодном состоянии невозможно, так как возникающие большие осевые усилия, действующие на вал, значительно превышают допустимые нагрузки по продольной жесткости вала. Поэтому необходимо применить такой метод накатывания, который позволял бы снизить усилия, действующие на вал. Существует несколько способов снижения осевых усилий: накатывание шлицев с поверхностным нагревом металла, варьирование размерами и количеством роликов и т. д. Однако все эти способы имеют определенные недостатки в сравнении с многопроходным накатыванием. Так, например, при накатывании шлицев с поверхностным нагревом возникают дополнительные погрешности, связанные с деформациями заготовки при нагреве и охлаждении, уменьшается эффект упрочнения шлицев, снижается чистота обработанных поверхностей. Кроме этого, при таком процессе значительно усложняются технология обработки и оборудование для формообразования шлицев.

Как известно, на осевое усилие большое влияние оказывает величина смещаемой площади металла. Многопроходное накатывание позволяет уменьшить смещаемую площадь до любой величины и тем самым значительно уменьшить осевое усилие. Кроме того, при этом уменьшаются и радиальные усилия, так как сокращается контактная площадь на каждый проход. Все это в сравнении с накатыванием за один проход повышает точность и стабильность размеров обработанных шлицевых валов.

Средние и крупные по размерам шлицы большой длины на валах пониженной жесткости наиболее рационально накатывать за несколько проходов накатных роликов с постепенной их радиальной подачей. Исследованиями установлено, что с увеличением числа проходов уменьшались усилия, действующие на вал [2].

Так, при получении шлицев за 3-4 прохода осевое усилие уменьшается от 3 до 5 раз по сравнению с однопроходным накатыванием. Еще больше снижаются усилия при накатывании с делением, когда роликов в два раза меньше, чем шлицев [2].

Дробность накатывания благоприятно сказывается на характере распределения (течения) металла, так как при этом увеличивается течение металла в радиальном направлении, что положительно влияет на образование более прямолинейных шлицев.

Калибровочные проходы повышают точность и особенно стабильность шлицев по шагу, ширине и внутреннему диаметру. При многопроходном накатывании после каждого двойного хода необходима радиальная подача накатных роликов к центру, причем подача с точностью до сотых долей миллиметра.

На точность накатываемых шлицев оказывает существенное влияние способ накатывания, конструкция и точность исполнения элементов оборудования и инструмента, наладка операции накатывания; форма и точность заготовки, а также физико-механические свойства её материала; процессы трения; температурные явления, сопровождающие процесс, и т. п.

Данный метод позволяет накатать зубья разного профиля (прямобочные, эвольвентные и др.) с центрированием по наружному или внутреннему диаметру [23]. Конструкция головки позволяет накатать шлицевые валы как за один, так и за несколько проходов в зависимости от требований, предъявляемых к точности размеров, шероховатости поверхности и степени деформации.

При формообразовании профилей на валах методом ударного накатывания роликовыми головками шлицевый профиль формируется за счет многократных ударов рабочих роликов поворачивающейся и перемещаемой вдоль своей оси заготовке.

Рабочие ролики свободно вращаются вокруг своих осей, которые, в свою очередь, установлены на вращающейся головке на некотором расстоянии от её оси вращения. В каждой накатной головке размещается либо один ролик с балансиром, либо несколько роликов, равнорасположенных по окружности. С увеличе-

нием числа роликов у головки соответственно увеличивается производительность прессы. Для осуществления винтообразного движения роликовые головки могут поворачиваться на некоторый угол.

Метод применяют в массовом производстве. Фирма «Эрнест Гроб» выпускает серию шлицевых станков для ударного накатывания зубьев [23] вращающимися роликовыми головками.

Редуцирование в жёстких матрицах осуществляется путем проталкивания заготовки пуансоном через направляющую втулку и жесткую матрицу. После формообразования на заданную глубину заготовку выталкивает из матрицы выталкиватель.

При редуцировании зубьев площадь поперечного сечения вала уменьшается при одновременном увеличении его длины. Процесс формообразования зубьев на валах методом редуцирования в жёстких матрицах был освоен на Тульском машиностроительном заводе им. Рябикова. Имеются сведения об изготовлении некоторых шлицевых соединений способом отливки под давлением, а также об использовании порошковой металлургии формообразования зубьев на деталях малых размеров.

Накатывание шлицев на валах круглыми зубчатыми роликами получил широкое распространение в промышленности. При накатывании за счет перемещения роликов к оси заготовки после формирования профиля зуба производят калибрование при постоянном межцентровом расстоянии. Накатывают одним, двумя или тремя роликами. Заготовку устанавливают в центрах или патроне.

Два или три ролика с параллельными осями вращения имеют заборную коническую часть и цилиндрический калибрующий участок. Вращение заготовки синхронизировано с вращением накатных роликов. Осевое перемещение заготовки осуществляется принудительно. Такой метод накатывания применяют для получения эвольвентных и треугольных зубьев [23].

Накатывание профилей плоскими рейками является одним из перспективных и высокопроизводительных методов. Профиль на заготовке накатывают на полную глубину двумя рейками, которые движутся возвратно – поступательно по

касательной к заготовке, вращающейся под действием деформирующих сил. Накатывание зубьев рейками за один проход на всю длину производительнее, чем накатывание роликами, но вследствие возникновения больших сил его не рекомендуют для накатывания зубьев модулем более 3 мм, длиной более 100 мм.

Разработан метод накатывания эвольвентных зубьев с помощью двух накатных роликов, имеющих форму червяков [3]. При обработке два ролика вдавливаются под большим давлением в цилиндрическую заготовку. Путем строго согласованных движений вращения и подачи инструмента и заготовки осуществляется непрерывное движение обкатки, при котором заготовка получает осевое перемещение. Процесс обеспечивает значительное упрочнение материала, а также высокую точность и малую шероховатость поверхности.

Исследование процесса продольного накатывания зубчатых профилей многороликовыми головками впервые были начаты в 1957 году в СССР сотрудником ВНИИ Давыдовым М. С. Были изготовлены 6-ти шлицевые валы устройством с 3-мя накатными роликами и установлена возможность осуществления предложенного процесса обработки. Дальнейшие работы по изучению процесса проводились на МТЗ, а также в ЭНИМС в содружестве с ВНИИ и Минским заводом тракторных запасных частей (МЗТЗЧ) [24]. Свидетельства об изучении процесса продольного накатывания зубчатых профилей за рубежом, впервые появились в 1959-1962 гг. [26, 27].

В настоящее время распространённой схемой накатывания многороликовой головкой является проталкивание заготовки через неприводные ролики, а областью эффективного применения метода является массовое и крупносерийное производство. Накатывание шлицев главным образом применяется в тракторо- и автомобилестроении.

В 1968 г. специальный станок фирмы Ernst Grob был впервые пущен в эксплуатацию на автозаводе ЗИЛ. Станок этой фирмы был реконструирован и установлен в поточную линию. Необходимость реконструкции была вызвана тем, что проведённые испытания накатанных шлицеванных валов с прямобочным профи-

лем на станках фирмы Ernst Grob не подтвердили высоких показателей, рекламированных фирмой.

Накатывание шлицев прямобочного и эвольвентного профилей нашло применение на минском тракторном заводе (МТЗ). Прямобочные профили накатывались в 2 прохода. Для накатывания используются серийные гидравлические прессы различных моделей с установкой накатной головки на столе пресса.

Под содействием МТЗ внедрение накатывания шлицев на валах распространилось на гидронасос Г12-23 на Елецком заводе «Гидропривод», Таганрожский комбайновый завод и Гомельский заводе «Гомсельмаш».

На Минском заводе тракторных запасных частей (МЗТЗЧ) выполняется накатывание шести типоразмеров шлицев трактора ДТ 75М.

Большой вклад по созданию опытных установок под накатывание шлицевых профилей на валах внесли ВНИИ, Одесским и Омским политехническими институтами, Алтайским научно-исследовательским институтом технологии машиностроения (АНИТИМ) [2] и др.

Перечисленные предприятия МТЗ, МЗТЗЧ, ВНИИ и при создании и внедрении различных образцов и типов шлиценакатного оборудования успешно решили ряд прикладных технических задач в области холодного накатывания шлицевых профилей на валах. При этом экспериментально-прикладной характер работ привёл к появлению многочисленных, в большинстве случаев необоснованных и противоречивых технических решений по шлиценакатному оборудованию и инструменту, которые, как правило, обеспечивают получение шлицев на одной конкретной детали и не могут быть использованы при изменении условий обработки. Проблема получения точных шлицев не нашла окончательного решения до настоящего времени.

Научно-исследовательские работы проводились в трёх основных направлениях, представляющих наибольший практический интерес:

1. Установление ограничений применения процесса накатывания по материалу, геометрическим размерам и форме шлицевого вала [25, 28, 29];
2. Определение действующих сил [2, 3, 30-33];

3. Определение величины и направлений перемещения материала накатываемой детали и размеров заготовки [2, 30-35].

Продольные усилия при накатывании шлицев многороликовой головкой, в холодном состоянии, могут достигать 200 т. с. В этом случае, при установлении границ применения метода, некоторые исследователи рекомендуют учитывать жёсткость обрабатываемого вала. За меру жёсткости условно принимается отношение длины вала  $L_в$  к наружному диаметру шлицев  $d_n$  ( $L_в / d_n$ ). Поскольку при накатывании с большими радиальными обжатиями продольные усилия могут пластически сформировать вал по всей длине рабочего конца, рекомендуется, чтобы площадь опорного сечения заготовки была хотя бы в 3 раза больше смещаемой площади шлиц [3].

В работах [2, 3, 36] указывается, что, в накатной головке может быть установлено ограниченное количество роликов, указанным способом можно одновременно накатывать не более 20-ти шлицев на диаметре 50 мм, так как с увеличением числа шлиц конструкция головки усложняется, что приводит к снижению точности накатанных шлицев.

На основе экспериментальных данных [3, 30] рекомендуются следующие соотношения геометрических размеров между диаметрами заготовок ( $d_3$ ), накатных роликов –  $D$  и осей –  $d_o$  [37]:

$$D / d_3 = 2-3, \quad (1.1)$$

$$d_o / D = 0,3. \quad (1.2)$$

Основываясь на опытных данных, авторы работ [2, 3, 38, 39] считают, что заготовки должны подвергаться нормализации и контролироваться по твёрдости. Первое требование к материалу заготовки обосновывается с точки зрения прочности накатного инструмента, второе – вызвано влиянием разброса твёрдости на точность шлицев в партии. Содержатся определённые требования и к точности геометрических размеров заготовки. Однако, все перечисленные рекомендации основаны на экспериментальных данных, относящихся к определенным валам и условиям обработки.

При этом в промышленности обрабатываются и менее жесткие валы, регламентированные в литературе [25, 38]. Отсутствуют данные, устанавливающие возможность применения рассматриваемого метода обработки в зависимости от степени деформации заготовки, прочностных и пластических свойств обрабатываемого материала.

2. При определении действующих сил большинство исследователей применяют чисто экспериментальный метод, основанный на определении среднего давления на инструмент по отношению предварительно замеренной деформирующей силы к площади проекции поверхности контакта инструмент-деталь [2, 4-6, 38, 39]. По полученным экспериментальным данным выводятся эмпирические формулы, выражающие зависимость между величиной усилия деформации, удельным давлением и площадью поверхности контакта, смещаемым объёмом или смещённой площадью. При этом допускается, что полученные соотношения будут справедливы и при других условиях обработки. Однако на практике это предположение не всегда оправдывается. Основным недостатком подобных зависимостей является узко ограниченная область их применения. Эмпирические формулы не отражают физической сущности рассматриваемого метода обработки и поэтому приводят порой к неверной трактовке закономерностей процесса. Во многих работах [2, 4-6, 40] широко используется понятие коэффициента замкнутости контура, которым пытаются учесть влияние геометрии поперечного сечения шлицевого вала на усилия при его формообразовании, а так же указывается, что давление металла на ролик с увеличением количества накатных роликов уменьшается, как уменьшаются и деформирующие силы.

В работах [2, 5, 6, 40-42] допускается, что точка приложения равнодействующей силы воздействия металла на ролики расположена в центре контактной дуги обхвата и на основании этого предположения из геометрических соотношений определяют одну из составляющих сил, (вторая составляющая предполагается неизвестной). Такое определение действующих сил может привести к значительным погрешностям, т. к. в действительности точка приложения равнодействующей должна пройти через центр тяжести эпюры давления металла на накатной ролик.



Перечисленные способы позволяют лишь ориентировочно оценить силовые параметры продольного накатывания шлицевых профилей на валах в холодном состоянии, ввиду существенных отличий в схемах напряжённо-деформированного состояния от процессов вдавливания штампа или продольной прокатки, а также различий между частными случаями накатывания шлицев, когда средняя величина усилий определяется экспериментально.

3. Определение величины и направлений перемещений материала накатываемой детали необходимо для выявления формы и размеров исходной заготовки. Некоторые авторы полагают, что процесс накатывания шлицевых профилей на валах многороликовыми головками (фильерой) схож с процессом проката полосы в валках, считают их справедливыми для любого сечения, в том числе и для шлицевого профиля.

В настоящее время ещё не разработан метод количественной оценки деформации при накатывании шлицев, в результате чего форма и размеры заготовки в каждом конкретном случае определяются экспериментально. Отсутствие расчётных данных о степени конечной деформации заготовки не позволяет оценить величину деформационных изменений накатанной детали на стадии проектирования. В ряде работ [2, 6] приводятся отдельные данные об изменениях происходящих в результате накатывания – механических свойств деталей, точности, при использовании различных моделей и типов шлиценакатного оборудования, применяемых режимах обработки. Однако все известные работы ограничиваются лишь констатацией фактов и не содержат анализа влияния условий накатывания на точность и эксплуатационные свойства детали.

Основной задачей при внедрении процесса накатывания шлицев является достижение точности получаемой детали в соответствии с требованиями чертежа, для чего необходима разработка новых инструмента и оснастки, использование более совершенной технологии. Решение данной задачи в настоящее время сдерживается недостаточной изученностью процесса накатывания.

## **1.2 Инструментальные материалы, применяемые при многопроходном холодном накатывании шлицевых профилей на валах из среднеуглеродистых сталей**

Успешное решение проблемы стойкости шлиценакатных роликов в большой мере зависит от правильного выбора марки стали для их изготовления. На заводах ролики изготавливаются из разных марок сталей, выбор которых произведен без достаточного обоснования.

Выбор марок сталей обуславливается не уровнем напряжений, возникающих в роликах в процессе накатывания, а рекомендациями по эксплуатации родственных шлиценакатыванию процессов холодного деформирования, как накатывание резьбы, рифлений, зубчатых колес.

Из литературы [43-45] известно, что стали, применяемые для инструмента холодного деформирования, должны обладать следующими основными свойствами:

- а) высокими твердостью и прочностью, значительно превышающими твердость и прочность деформируемого металла;
- б) высокой износоустойчивостью, это требование особенно важно для шлиценакатных роликов, так как при недостаточной износоустойчивости может быстро измениться профиль рабочей части ролика, а отсюда и форма, и размеры шлицевых валов;
- в) удовлетворительной вязкостью.

К примеру если по условиям работы штамп должен иметь повышенную износоустойчивость, то необходимо применять стали с высоким содержанием углерода ( $> 1\%$ ). Если же сталь должна обладать повышенной вязкостью при достаточной износоустойчивости, то следует применять доэвтектоидную сталь с содержанием углерода от 0,35 до 0,65 %. К этому последнему замечанию мы в дальнейшем еще вернемся [45-47].

В условиях производства шлицевых валов пластической деформацией ударная нагрузка, ввиду малых скоростей деформирования, практически отсут-

ствуется и поэтому превалирующим требованием к марке стали для шлиценакатных роликов должны явиться высокая твердость, износоустойчивость и прочность в сочетании с определенной вязкостью.

Однако, в практике заводов и предприятий, эксплуатирующих процесс холодного шлиценакатывания, нашла применение первая рекомендация об использовании для роликов высокохромистых и высокоуглеродистых сталей группы Х12. В связи с этим, при обкатке крупных деталей роликами [37] для изготовления последних применяются стали Х12М и Х12Ф1 с твердостью HRC 62-64 и с карбидной неоднородностью не выше 5-го балла по ГОСТ 5950 – 73.

Аналогично при холодной накатке зубьев цилиндрических зубчатых колес малых модулей зацепления и зубчатого венца шлицевых валов [38] применяются стали Х12М, Х12Ф1 с твердостью HRC 52-56.

Стали этой группы широко применяются для резбонакатных роликов с твердостью HRC 58-60 [48-50], для накатного инструмента при пластическом формообразовании различных фасонных поверхностей [39], зубьев шестерен [39].

Применяются стали группы Х12 и для накатывания шлицевых валов, осуществляемого различными методами: методом копирования с многократным обжатием [2], методом продольного накатывания в многороликовых головках [2, 23]. Несмотря на обилие рекомендаций по выбору твердости роликов, твердость в пределах HRC 58-60 по данным Ереванского политехнического института им. К. Маркса [51, 52] соответствует оптимуму износостойкости этих сталей. Из этой работы следует, что с повышением твердости износостойкость стали Х12М повышается, причем зависимость степени износа от твердости носит линейный характер.

Однако, несмотря на отмеченные выше достоинства, стали группы Х12 обладают существенным недостатком – наличием грубой карбидной неоднородности, что отмечается авторами, исследовавшими работоспособность различных видов инструмента холодного деформирования: от штампового до накатного. Грубая карбидная неоднородность, предопределяется химическим составом этих сталей и образуется в процессе кристаллизации. Металлургический передел (ковка,

прокатка) не может полностью устранить карбидную неоднородность, а только понижает ее уровень.

Хотя стали типа X12 и характеризуются как мелкозернистые, однако, интервал их закалочных температур узок, а отклонение от него приводит к заметному росту зерна аустенита, а, следовательно, к падению ударной вязкости и снижению прочности.

Наличие в структуре сплошной или разорванной сетки эвтектических карбидов или карбидных строчек различной протяженности приводит к значительному снижению сопротивления металла напряжениям скалывания и разрушению по плоскостям, параллельным направлению расположения карбидных включений.

Как показала практика эксплуатации этих сталей на таких тяжело нагруженных инструментах, как резьбо-, зубо- и шлиценакатной, а также штампах холодной штамповки [53, 54], работающих при больших удельных нагрузках, карбидная неоднородность в структуре металла ведет к резкому сокращению срока службы инструмента из-за поломок, скалывания рабочих частей и т. п.

Карбидная неоднородность может быть уменьшена путем снижения содержания в стали углерода и таких активных карбидообразующих элементов, каким является хром, что практически достигнуто в стали X6ВФ [55-57]. Эта сталь обладает по сравнению со сталью X12М меньшей карбидной неоднородностью, более высокими механическими свойствами и лучшей повторяемостью результатов закалки.

В настоящее время резьбонакатные ролики изготавливаются преимущественно из стали X6ВФ [58].

Наряду с высокоуглеродистыми и высокохромистыми сталями, в отечественной и зарубежной технической литературе имеются указания на применение достаточно широкой гаммы марок сталей, что в той или иной степени получает распространение и в процессе шлиценакатывания.

Так для упрочнения и отделки деталей накатыванием [59] используются ролики из сталей ШХ15, 5ХНМ с твердостью HRC 60-65 и из стали ХВГ с твердостью HRC 62-64.

Отмечается применение для накатных роликов для холодного накатывания мелкозубчатых шестерен [59] и вообще для инструмента холодного деформирования высокоуглеродистых инструментальных сталей У8-У10 с твердостью HRC 53-55. Для накатки резьбы круглыми плашками (роликами) [49] помимо стали Х12М нашли применение стали 5ХВС, 4ХВС, ХВГ, 18ХНВА, ШХ15, 9ХВС, У7А, У8А.

Непосредственно для шлиценакатных роликов продольного накатывания [2] применяются и штамповые стали 5ХНВ и 5ХНМ, хотя достигнутая на них стойкость роликов оставляет желать лучшего.

Применяют быстрорежущие стали Р9, Р6М5 и прежде всего сталь Р18 для изготовления шлиценакатных роликов для процесса продольного шлиценакатывания такие организации, как ЭНИМС, ОАО «Автодеталь-Сервис» и Минский завод шестерен.

Быстрорежущие стали хорошо зарекомендовали себя при изготовлении из них режущего инструмента, они обладают высокими режущими свойствами и высокой прочностью при применяемых усилиях резания.

Все вышеизложенное о грубой карбидной неоднородности и анизотропии свойств сталей типа Х12 полностью применимо к стали Р18, которая также является высокоуглеродистой.

К тому же механические свойства в частности, предел прочности при изгибе и ударная вязкость стали Р18 в закаленном и отпущенном состоянии [60] несколько ниже аналогичных свойств сталей Х12М и Х12Ф1, и в значительной степени ниже, чем у стали Х6ВФ.

Карбидную неоднородность усиливает вольфрам, хром и в меньшей степени ванадий. Ковкость стали Р18 в зависимости от химического состава составляет 75% [3, 20].

Таким образом, на базе представленных рекомендаций родственного процессу шлиценакатывания, ролики для продольного накатывания шлицевых валов в многороликовых головках изготавливаются в основном из стандартных [1, 61] сталей Х12М, Х12Ф1, Р18, Р6М5. В частности, среди предприятий Белоруссии,

внедривших процесс продольного шлиценакатывания, сталь Х12Ф1 для роликов применяют Минский тракторный завод и Борисовский завод автотракторного электрооборудования, сталь Р18 – Минский завод шестерен. В России сталь Р6М5 применяет ОАО «Автодеталь-Сервис».

Как показал опыт использования шлиценакатных роликов из этих сталей, часты случаи выхода их из строя по причине хрупкого разрушения (в виде радиальных трещин). Кроме того период, предшествующий возникновению дефектов на поверхности рабочего профиля роликов для указанных сталей исключительно короток, а дефекты необратимы. Указанным сталям недостает вязкости.

Исследование напряжений, возникающих в шлиценакатных роликах в процессе их эксплуатации, выявило, что при накатывании шлиц на поверхности роликов возникают напряжения сжатия значительной величины – от 285 до 537 МПа, т. е. находятся на пределе соответствующих механических характеристик применяемых в настоящее время для шлиценакатного инструмента сталей ХВГ, Х12Ф1, Х6ВФ, Р18, Р6М5 [62-68].

При этом необходимо учитывать, что шлиценакатные ролики в многороликовых головках работают в условиях знакопостоянных (сжатия) и повторяющихся нагрузок, и их ресурс определяется циклической усталостной прочностью материалов, из которых они изготовлены. При этом уровень циклической прочности в общем случае тем больше, чем выше теоретический предел прочности данного материала. Поэтому проблема повышения циклической прочности является общей проблемой повышения характеристик статической прочности и вязкости разрушения данного материала в реальных условиях эксплуатации [69].

В связи с этим, изыскание марок стали для шлиценакатных роликов сводилось к подбору рекомендуемых марок стали по механическим свойствам, превышающим напряжения, возникающие в роликах.

Предыдущий опыт по эксплуатации шлиценакатных роликов и аналитические расчеты, выявившие величину и характер распределения напряжений в роликах, показали, что исследования по увеличению стойкости целесообразно про-

водить в направлении использования более дешевых высокопрочных сталей с малым содержанием углерода.

Наиболее пригодными являются быстрорежущие стали P6M5, P9, P18, X12Φ1 и X6BΦ применяемые в основном для процессов резания, но и так же для деформирования металлов. Данные стали обладают высокими механическими характеристиками.

В таблице 1.2 представлены механические характеристики сталей P6M5, P9, P18, X12Φ1 и X6BΦ, для инструмента холодного деформирования типа шлиценкатных роликов.

Указанные стали включены в ГОСТ 5950-2000 [65], согласно которому твердость этих сталей в отожженном или высокоотпущенном состоянии составляет 255 HB.

Таблица 1.2 – Механические свойства сталей в закаленном и отпущенном состоянии при температуре 20°C [70]

| Марка стали | Термическая обработка                    | Механические свойства $\sigma_{сж}$ , МПа |
|-------------|--|---|
| P6M5        | Закалка 1210-1230°C,<br>отпуск 540-560°C | 3600                                      |
| P9          | Закалка 1220-1240°C,<br>отпуск 540-560°C | 3500                                      |
| P18         | Закалка 1270-1290°C,<br>отпуск 550-570°C | 3450                                      |
| X12Φ1       | Закалка 1060-1080°C<br>отпуск 150-170°C  | 3500                                      |
| X6BΦ        | Закалка 990-1010°C<br>отпуск 190-210°C   | 3600                                      |

Как видно из таблицы 1.2, механические свойства сталей P6M5 и X6BΦ выше характеристик остальных сталей и одновременно превосходят уровень напряжений, возникающих в шлиценкатных роликах. По этой причине указанные стали могут быть рекомендованы для изготовления роликов.

Вторым обстоятельством, подтверждающим рациональность применения этих сталей, является их существенно более низкая стоимость по сравнению, в частности, со сталью Р18.

Представленное сопоставление величин усталостной прочности сталей, применяемых для шлиценкатных роликов, подтверждает целесообразность принятия стали марки Р6М5 как базовой для изготовления роликов.

В связи с этим, дальнейшие исследования в области увеличения стойкости шлиценкатных роликов должны проводиться, опираясь на знание величин возникающих в роликах напряжений, в направлении изыскания и опробования недефицитных высокопрочных сталей с малым содержанием углерода, а так же применение на инструмент различного рода износостойких покрытий. В литературе данные по использованию покрытий методом КИБ на деформирующий инструмент вообще отсутствуют.

### **1.3 Износ инструмента при холодном пластическом деформировании сталей**

Решение проблемы повышения долговечности инструмента при холодном пластическом деформировании невозможно без исследования механизма изнашивания и разрушения его рабочей части и контактных процессов на его поверхностях.

Основными видами разрушения инструмента для холодного пластического деформирования являются необратимые деформации и износ. Все эти виды в большей или меньшей степени взаимодействуют друг с другом в процессе разрушения инструмента. Однако для каждого конкретного типа инструмента, для отдельных элементов деформирующей поверхности выделяют в качестве преобладающего один из перечисленных видов разрушений. Преобладание одного вида разрушения над другим зависит от взаимодействия множества факторов.

До сих пор не существует единого мнения относительно характера и значимости влияния различных факторов на виды разрушения инструмента в процессе его изготовления и эксплуатации. Б. Ф. Трахтенберг все факторы, влияющие на



стойкость инструмента, делит на четыре группы: металлургические, технологические, конструктивные и эксплуатационные [53, 54, 61, 71-75]. К группе металлургических факторов относится химический состав материала инструмента и способ изготовления заготовки для инструмента. Конструктивные факторы включают метод деформирования, размеры и форму инструмента. К технологическим факторам относят способы изготовления, термической обработки, упрочнения и т. д. Эксплуатационные факторы включают температуру деформирования, степень деформации, вид смазки, условия подогрева инструмента и т. д.

С. А. Довнар [74] на основе производственного опыта все доминирующие факторы, влияющие на стойкость инструмента, как при холодном, так и при горячем пластическом деформировании, представил в виде схемы (рисунок 1.2). Кроме того, следует отметить влияние таких субъективных факторов, как культура производства, квалификация рабочих, соблюдение ими технологических инструкций.

Многообразие факторов, действующих в процессе эксплуатации инструмента, осложнённое их взаимодействием, не поддающимся теоретическому анализу, и отсутствие достаточных экспериментальных данных об условиях работы инструмента затрудняет разработку эффективных мероприятий по повышению его стойкости.

При эксплуатации инструмента одним из видов разрушения является износ (изнашивание). Установлено, что от 85 до 90 % инструмента, используемого в процессах холодного деформирования, выходит из строя в результате износа и только от 10 до 15 % по другим причинам [1, 71, 76].

Задача исследования износостойкости инструмента состоит в установлении зависимостей износа от факторов, характеризующих качество поверхности инструмента, вид смазки и др. Эти зависимости позволяют оптимизировать технологию изготовления, условия эксплуатации инструмента, улучшать и прогнозировать его работоспособность.



Рисунок 1.2 – Схема доминирующих факторов разрушения инструмента

Износ инструмента связан со скольжением деформируемой заготовки по поверхности инструмента при наличии трения между ними. Как показывает практика [77], истиранию способствуют нормальные и касательные напряжения, действующие совместно или раздельно. При износе поверхность инструмента приобретает нерегулярные углубления, переходящие в следующей стадии в сетку трещин. Касательные напряжения являются причиной образования канавок, простирающихся вдоль направления течения деформируемого металла.

Необратимые деформации проявляются в виде смятия или локальных пластических деформаций элементов поверхности деформирующего инструмента – наиболее распространенный вид необратимых деформаций при эксплуатации инструмента. При смятии происходит изменение формы и размеров наиболее нагруженных инструментов сверх допусковых. Процесс смятия наиболее интенсивно развивается в местах совместного действия максимальных температур и давлений, затрагивая значительные объёмы металла инструмента [71, 78-82].

При смятии уменьшается высота выступающих элементов инструмента, увеличиваются размеры полости ручьёв в плане, искажается их конфигурация;

наблюдается так же изгиб пуансонов, игл, оправок, деформация хвостовиков и блоков под рабочие вставки.

Деформирующий инструмент выходит из строя не только из-за смятия, но и из-за образования единичных трещин и последующего хрупкого разрушения в связи с динамическим и циклическим воздействием сил. На рабочих поверхностях инструмента сложной конфигурации с глубокими вырезами обычно обнаруживаются единичные мелкие и глубокие трещины в углах, на вертикальных стенках, в основании углублений. Если трещины не глубокие, то работоспособность инструмента будет определяться скоростью их распределения в длину и глубину. Образование глубоких трещин и разрушение характерны для хрупкого инструмента. Образование единичных трещин и хрупкое разрушение инструмента вызывается главным образом концентрацией напряжений в местах резких переходов, неблагоприятной схемой напряженного состояния, наличием в металле инструмента металлургических дефектов.

Прочность же деформирующего инструмента для холодного накатывания тем выше, чем меньше карбидная неоднородность инструментальной стали. Её можно снизить ковкой заготовки с многократной осадкой и вытяжкой.

Как отмечено в работе Лындина В. А. [21], разрушение речных и цилиндрических накатников происходит от изгиба в переходной зоне, где наблюдается высокая концентрация напряжений. Сначала образуется усталостная трещина на стороне испытывающей растяжение, затем она постепенно распространяется в глубь тела зуба, а так же вдоль его основания и приводит к разрушению. Иногда отколовшиеся частицы металла в результате шелушения заготовки накапливаются во впадине зуба накатника и вызывают также поломку. Отмечается, что для повышения стойкости можно увеличить предел усталости зубьев накатника на изгиб, увеличивая размер опасного сечения и снижая усилия, действующие на накатник.

Цилиндрические накатники с заборным конусом выходят из строя не по причине износа зубьев, а как отмечено в работе [21] из-за выкрашивания зубьев в местах перехода зубьев заборной к калибрующей зоне накатника. Это объясняет-

ся тем, что по мере внедрения накатника в заготовку объём вытесненного металла непрерывно возрастает и происходит наклёп, в связи с чем, усилие накатывания к концу формирования достигает наибольшего значения. Это и приводит к выкрашиванию зубьев в местах перехода.

Повреждение рабочей поверхности накатных роликов обычно начинается с выкрашивания [21]. Как отмечено в дано работе, при больших контактных напряжениях микроскопические усталостные трещины появляются на рабочей поверхности обычно на переходной кромке. Сливаясь между собой и захватывая всё большую часть поверхности, эти трещины приводят к образованию пор и ямок, тем самым происходит выкрашивание металла по радиусной кромке.

В связи с этим, необходимо проводить расчёт на контактную усталость для предотвращения усталостного выкрашивания рабочих поверхностей накатных роликов.

В работе [21] также отмечено, что стойкость накатных роликов при многопроходном накатывании значительно выше, чем при однопроходном, и зависит от числа проходов, а с увеличением числа проходов стойкость возрастает.

При применении планетарных накатников фирмы «Grob» [26] при применении инструментальной стали МО, температура отпуска от 510 до 530 °С, твёрдость 64-66, при накатывании 29 шлицев модулем 2,1 и длиной 158 мм на валах из конструкционной стали с  $\sigma_B = 736$  МПа их стойкость составила 12000 шт. накатанных деталей.

В работе Кобельковой С. Ф. [36] так же отмечается, что накатные ролики выходят из-за поломок обусловленных как энергосиловой схемой процесса и напряжённым состоянием накатного ролика, так и качеством металла, из которого они изготовлены, его структурным состоянием и физико-механическими свойствами. К группе причин, связанных с состоянием металла роликов, обуславливающих их стойкость, относятся карбидная неоднородность, анизотропия механических свойств, качество термической обработки, а так же влияние конструкции накатных роликов.

В работе [36] указывается, что накатные ролики разрушаются по радиальным трещинам, вид и характер которых, а так же излом говорит о том, что разрушение ролика происходит не только от влияния поверхности рабочего профиля, но и от дефектов посадочного отверстия. Однако от влияния дефектов поверхности рабочего профиля трещины распространяются в радиальном направлении на большую глубину, чем от дефектов посадочного отверстия. Это характеризует и соотношение напряжений, возникающих на поверхности рабочего профиля и посадочного отверстия.

Усиливает так же склонность стали к образованию хрупких сквозных трещин остаточные напряжения, возникающие в результате термической обработки и шлифования [80-82].

Масштабный фактор так же оказывает большое влияние на образование сквозных радиальных трещин в роликах. Влияние масштаба сказывается в снижении реального запаса прочности. С увеличением геометрических размеров роликов, возрастает вероятность появления «опасных» дефектов и вероятность разрушения. Основной же причиной появления радиальных трещин такого вида является повышенная твёрдость заготовок валов, поступающих на шлиценакатывание, вызывающая повышение усилий деформирования и контактных напряжений в разы.

Как показано в работе Козырева Ю. Г. [3], на длительность работы роликов без появления трещин и выкрашиваний оказывает радиус кромки ролика, и марка стали, из которой изготовлен инструмент. Мерой против этого вида трещин служит изменение формы рабочего профиля кромки шлиценакатного ролика.

Поперечные трещины на радиусном выходе – явление, характерное для энергосиловой схемы процесса накатывания роликом «в борт» [53, 69]. Период работы роликов без возникновения этих трещин различен для разных марок сталей.

Подбором марки стали для изготовления роликов можно отодвинуть момент возникновения этого вида трещин, а усовершенствованием радиусного выхода ролика – совсем исключить их появление. Так же отмечается, что трещины

на радиусном выходе не лимитируют эксплуатационную стойкость роликов, так как развиваются сравнительно медленно. Основанием для снятия ролика с эксплуатации из-за этого дефекта служат «налипы» металла на радиусном выходе шлицевой впадины, свидетельствующие о выкрашивании ролика.

Возникновению усталостных трещин способствует и условия накатывания, течение металла вдоль инструмента, так же качество обработки поверхности значительно влияет на сопротивление усталости. Поверхность накатных роликов испытывает большие напряжения, кроме того поверхность металла ослабляется механической обработкой.

Доказано [80], что поверхностные слои металла, работающего в условиях усталости, примерно в 2 раза слабее слоев, лежащих под поверхностью.

Так же отмечается, что шероховатость поверхности оказывает [83] значительное влияние на усталостную прочность деталей, работающих при переменных нагрузках. По мере увеличения шероховатости предел выносливости сталей снижается. На микронеровностях концентрируются напряжения снижающие выносливость.

Современная же теория разрушения металлов [84-88] рассматривает разрушение не как мгновенный акт, а как процесс развития трещин под действием напряжений. Причём, хрупкое разрушение, вызываемое периодическими пластическими сдвигами, наступает тогда, когда исчерпан весь ресурс вязкости металла инструмента.

Число циклов, которое способен выдержать материал инструмента до образования трещины [71, 89-91]:

$$N_{max} \approx A_{np} / A_u, \quad (1.3)$$

где  $A_{np}$  – предельная работа пластической деформации в очаге зарождения трещины (как показывают эксперименты,  $A_{np} \approx A_{изл}$ );  $A_u$  – работа пластической деформации за один цикл, физический смысл  $A_u$  основан на известном явлении механического гистерезиса, а численная величина предопределяется площадью, заключённой внутри петли гистерезиса;  $A_{изл}$  – работа излома материала, устанавливаемая испытанием.

При замене материала инструмента или способа упрочнения расчётная формула принимает вид:

$$N'_{max} / N''_{max} = A'_{изл} / A''_{изл}. \quad (1.4)$$

При отборочных испытаниях конструкций инструмента, материалов или способов упрочнения можно использовать, например, теорию наибольших нормальных напряжений [71, 92], согласно которой:

$$\sigma_I \leq R_0, \quad (1.5)$$

где  $\sigma_I$  – напряжение растяжения в наиболее опасной точке;  $R_0$  – сопротивление отрыву.

Экспериментально установлено [93, 94]:

$$R_0 \sim \sqrt{AE}, \quad (1.6)$$

где  $A$  – работа пластической деформации;  $E$  – модуль упругости.

Поэтому лучший из сопоставляемых двух вариантов инструмента по допускаемым напряжениям может быть выявлен из выражения:

$$\frac{\sigma'_I}{\sigma''_I} = \frac{\sqrt{A'E'}}{\sqrt{A''E''}}. \quad (1.7)$$

Для расчёта усилий при пластическом деформировании можно использовать выражение:

$$P = K \cdot \sigma_S \cdot A, \quad (1.8)$$

где  $K$  – коэффициент зависящий от коэффициента трения, геометрических параметров, линий скольжения деформируемого металла и др.;  $\sigma_S$  – напряжение фактической текучести металла, МПа;  $A$  – площадь контакта инструмента с заготовкой, м<sup>2</sup>.

Значение  $K$  по Сидоренко М. И. [95]:

$$K = \left( \frac{\pi}{2 \cdot n} (D_n + D_s) - b \right) \sqrt{\frac{D_p}{2} (D_n - D_s)}, \text{ Н} \quad (1.9)$$

где  $n$  – количество шлицев;  $D_n$  – наружный диаметр шлицев, м;  $D_s$  – внутренний диаметр шлицев, м;  $D_p$  – диаметр ролика, м;  $b$  – ширина шлицев, м.

При прямом выдавливании С. И. Губкиным были рекомендованы следующие формулы для определения коэффициента  $K$ , откорректированные на основании экспериментальных данных В. Е. Фаворским [96].

При выдавливании трубки с фланцем:

$$K = \left( \ln \frac{F_0}{F} + e^{\left( \frac{2 \cdot \mu \cdot h}{S} \right)} \right). \quad (1.10)$$

При выдавливании стержней с головкой:

$$K = \left( \ln \left( \frac{D}{d} \right)^2 + e^{\left( \frac{4 \cdot \mu \cdot h}{S} \right)} \right). \quad (1.11)$$

При выдавливании деталей сложной формы:

$$K = \left( \ln \frac{F_0}{F} + e^{\left( \frac{4 \cdot \mu \cdot h}{d'} \right)} \right), \quad (1.12)$$

где  $F_0$  – площадь заготовки, м<sup>2</sup>;  $F$  – площадь изделия, м<sup>2</sup>;  $e$  – основание натурального логарифма,  $e = 2,71$ ;  $h$  – высота калибрующего пояска матрицы, м;  $S$  – толщина стенки трубки, м;  $d'$  – средний диаметр изделия, м.

Для процесса холодного выдавливания полых стаканов В. Е. Фаворским по результатам экспериментальных данных проведено упрощение зависимостей С. И. Губкина и Е. П. Унксова [97].

Для прямой схемы  $K$  определяется:

$$K = \left( \ln \frac{F_0}{F} + e^{\left( \frac{4 \cdot \mu \cdot e}{d} \right)} \right). \quad (1.13)$$

Для обратной схемы выдавливания:

$$K = z \left( 2 + \frac{0,5 \cdot \mu \cdot d}{S} \right), \quad (1.14)$$

где  $z$  – размер направляющего пояска пуансона, м;  $d$  – диаметр внутреннего цилиндра, м.

При расчёте усилий деформирования для накатывания многороликовой головкой по В. А. Лындину [21] данный коэффициент, рассчитанный по линиям скольжения равен:  $K = 2,96$ .



$$K = \frac{l_A}{l_1} \int_{\theta_1}^{\theta_A} (\mu \cdot \sin \theta + (\psi - \theta)) d\theta + \frac{l_{1-3}}{l_1} (0,5 - \psi_1 - \theta_1) \sin \theta_1 + \frac{l_B}{l_1} \int_{\theta_1}^{\theta_B} (\mu \cdot \sin \theta + (\psi - \theta) \cos \theta) d\theta, \quad (1.15)$$

где  $l_A, l_B, l_1, l_{1-3}$  – расстояния от искомых точек, до граничных точек на поверхности контакта, м;  $\theta, \psi$  – углы между искомыми точками и граничными точками на поверхности контакта, град.

В. А. Кроха для расчёта усилий обжатия части стержня проталкиванием через фильер матрицы использует формулы, обеспечивающие хорошую сходимость расчётных и экспериментальных значений усилий [98]:

$$K = \left( \ln \frac{F_0}{F} + \alpha \frac{4}{\sqrt[3]{3}} \right) \left( 1 + \frac{\mu}{\sin \alpha \cdot \cos \alpha} \right), \quad (1.16)$$

где  $\alpha$  – угол конической части матрицы, град.

Одной из современных технологий, позволяющей в несколько раз повысить износостойкость инструмента, является ионно-плазменное азотирование и нанесение износостойких покрытий. В результате данных операций повышается их износостойкость и производительность [99].

#### 1.4 Методы повышения долговечности деформирующего инструмента

Существует более сотни методов поверхностной упрочняющей обработки металлов и сплавов, с помощью которых удаётся в той или иной степени повышать работоспособность деталей узлов трения и инструментов. Технология поверхностного упрочнения совершенствуется всё более ускоряющимися темпами, чему в немалой степени способствует развитие теоретических представлений о поверхностной прочности металлов. В частности, концепция «структурной приспособляемости» материалов при трении [100-102] и правильное понимание основных механизмов этого явления – активации и пассивации – позволяют сознательно управлять поверхностной прочностью и разрушением материалов.

По назначению все методы упрочнения поверхностей трения можно разбить на две группы. К первой относятся те из них, которые позволяют получать поверхность со свойствами, обеспечивающими возможность оптимальной пере-

стройки и дополнительного упрочнения в условиях эксплуатации (образование вторичных структур). Это механический и фазовый наклёп, некоторые виды химико-термической обработки. Все они расширяют диапазон процессов нормального трения и изнашивания. Вторую группу составляют методы создания первичных структур с максимально возможной стабильностью по отношению к химическим и механическим воздействиям.

Основная задача поверхностного упрочнения инструмента сводится к созданию высокостабильных первичных структур. С этой целью можно использовать некоторые из методов поверхностного упрочнения второй группы, в частности борирование, карбонитрацию, азотирование, поверхностную термическую обработку, электроискровое легирование, нанесение износостойких покрытий.

Поверхностная термическая обработка (ПТО) применяется в тех случаях, когда необходимо изменить свойства поверхности, не повлияв значительно на свойства сердцевины изделия. ПТО основана на методах нагрева, позволяющих осуществить кратковременный и интенсивный подвод энергии к поверхности изделия, в силу чего поверхностный объём быстро разогревается до необходимой температуры, а подповерхностные остаются практически холодными.

Метод ХТО предполагает нагрев металлов в химически активной среде, вследствие чего существенно изменяются химический состав, структура, а следовательно, и свойства поверхностного слоя. Он широко применяется в промышленности благодаря высокой производительности, эффективности и доступности. Для повышения работоспособности деформирующего инструмента (ролика) принципиально могут быть использованы низкотемпературное азотирование, карбонитрация, борирование, хромирование.

При азотировании поверхность инструмента, обладающая пониженным коэффициентом трения и улучшенными антифрикционными свойствами, предотвращает её налипание на инструмент и образование лунок износа, что даёт возможность увеличить режимы обработки, а так же обеспечивающие высокую прочность при сжатии, износостойкость и сопротивление холодной ударной нагрузке.

При ионном азотировании повышается твёрдость поверхности и износостойкость всех марок быстрорежущих сталей и сплавов, а глубина азотированного слоя зависит от фазового состава сталей [103].

Находит применение метод электроискрового легирования (ЭИЛ), который следует рассматривать как один из способов нанесения металлических покрытий. Полученные этим способом покрытия обладают большой прочностью сцепления с материалом основы, при этом покрываемая поверхность не требует предварительной подготовки, а для нанесения покрытий можно применять не только металлы и их сплавы, но и композиционные материалы. В основе метода ЭИЛ лежит действие импульсного электрического разряда, в результате которого происходит направленный выброс вещества (преимущественно материала анода), а на поверхностях электродов образуются слои изменённой структуры. В результате ЭИЛ формируются крайне неравновесные структуры с мелким зерном и высокой гетерогенностью по составу и свойствам.

Из общего арсенала методов получения износостойких покрытий следует выделить три группы: термомеханические – плазменное напыление, детонационное напыление; химические – химическое осаждение из газовой фазы, термодиффузионный метод; электрофизические – катодное распыление, реактивный электронно-лучевой плазменный метод, конденсация вещества из плазменной фазы в условиях ионной бомбардировки (КИБ), активированное реактивное напыление, ионизированное реактивное напыление «Спатерин».

Среди электрофизических методов наиболее перспективно ионноплазменное реактивное осаждение в вакууме. Их широкое применение объясняется рядом существенных преимуществ, в частности технологичностью и хорошей управляемостью процессом осаждения, возможностью нанесения покрытий к инструментальной подложке, воспроизводимостью технологии.

Эффективность покрытий значительно повышается, если технология нанесения обеспечивает им высокую адгезионную прочность по отношению к инструментальной подложке. Улучшение адгезии в методах КИБ, «Спатерин» до-

стигается предварительной или синхронной ионной бомбардировкой упрочняемой поверхности.

Метод КИБ, разработанный в Харьковском физико-техническом институте, реализуется на установках типа «Булат», «Пуск», «ИЭТ», «Юнион», «ВУ-1Б» [101, 102]. Покрытия методом КИБ наносят в две стадии: на первой очищают поверхность подложки, бомбардируя её ионами испаряемого электрода, ускоренными до энергии от 1 до 3 кэВ; на второй происходит собственно конденсация покрытий.

Изготовление стальных инструментов с покрытиями долгое время сдерживалось особенностями технологии химического осаждения вещества из газовой фазы, требующей разогрева подложки до высоких температур. В настоящее время благодаря применению новых методов нанесения покрытий, в частности метода КИБ, быстрорежущий инструмент с покрытиями применяется всё в большем объёме. Упрочнение инструментов из быстрорежущих сталей этим методом обеспечивает повышение стойкости в среднем в два-три раза, хотя в отдельных случаях эффект может быть и более существенным.

### **1.5 Внешнее трение в пятне контакта «инструмент – заготовка»**

Возможности процессов пластического объёмного деформирования деталей, стойкость инструмента в значительной степени определяются внешним трением на контактных поверхностях инструмент – заготовка.

Силы внешнего трения, изменяя схему внешних сил, действующих на деформируемую заготовку, оказывают существенное влияние на механизм течения металла и силовой режим в процессе объёмного деформирования. С изменением контактных условий изменяется распределение деформаций в деформированном объёме [1]. Силы внешнего трения повышают неоднородность распределения напряжений и деформаций и резко изменяют характер истечения металла.

В зависимости от контактных условий на границе «инструмент – заготовка» силовая характеристика процесса накатывания меняется. Усилие накатывания в

условиях неполного разделения смазочной средой смещаемых поверхностей увеличивается с 40 до 80 % полезной величины усилия, необходимого для процесса формообразования.

В большинстве работ, посвящённых изучению внешнего трения при обработке металлов давлением, трение рассматривается односторонне, учитывается только его отрицательное влияние на процессы обработки металлов давлением и изыскание в связи с этим эффективных смазочных сред.

В целом ряде схем процессов сил внешнего трения, возникающие между деформируемой заготовкой и инструментом, оказывают как положительное, так и отрицательное действие на интенсивность течения металла. Оценка влияния сил внешнего трения на формообразование осуществляется по направлению их действия. Если силы внешнего трения способствуют развитию пластической деформации, то их действие следует рассматривать как положительное и необходимо искусственными приёмами эти силы увеличивать. В противном случае силы трения оказывают отрицательное действие и их действие следует уменьшать, применяя различные смазочные среды.

Успешное осуществление процесса холодного накатывания при использовании эффективных смазочных сред охватывает лишь одну сторону явлений, связанных с действием сил внешнего трения. Внешнее трение в случае его отрицательного действия на формоизменение детали оказывает исключительно большое влияние на силовые и технологические характеристики процесса. Трение на границе инструмента и деформированной заготовки вызывает дополнительные пластические деформации поверхностных слоёв металла на поверхности контакта с рабочими элементами инструмента. При этом размеры очага деформации поверхностных слоёв могут превышать размеры очага активной деформации, обеспечивающего формообразование детали. Возникновение дополнительного очага пластической деформации в зоне контакта инструмента и заготовки требует затрат дополнительной энергии на формообразование, при этом дополнительное усилие, превышают активную составляющую усилия, требуемого на формообразование.

Высокие значения рабочего давления в случае некачественной смазочной среды снижают прочностные характеристики инструмента, вызывая его преждевременное разрушение или износ, а также резко ухудшают качество поверхности деформируемой детали.

Силы трения, вызывая нагрев инструмента, понижают его стойкость, кроме того, силы трения вызывают износ инструмента и тем в большей степени, чем больше коэффициент внешнего трения. Увеличивая необходимую для деформирования силу, трение увеличивает возникающие в инструменте напряжения, что также понижает его стойкость [3, 104].

Весьма характерным показателем той части работы, которая при деформации затрачивается на внешнее трение, является коэффициент контактного трения. Чем меньше коэффициент контактного трения, тем меньше затрачиваемая на деформацию работа. Поэтому условия деформации должны быть такими, чтобы обеспечить при прочих равных условиях наименьший коэффициент внешнего трения.

Несмотря на значительное число работ, посвящённых исследованию влияния внешнего трения в процессах обработки металлов давлением, отсутствует стройная теория учёта этого фактора на процессы, особенно процесс холодного накатывания, при значительных контактных удельных нагрузках.

Ввиду сложности исследования разработано значительное число гипотез, результаты которых соответствуют реальным условиям проводимых исследований, но не разработаны единые правила проведения процесса.

Обычно при анализе трения без смазочной среды используется гипотеза нормальных давлений Амонтона – Кулона [1]:

$$F_{mp} = \mu \cdot N. \quad (1.17)$$

Использование этой гипотезы при оценке влияния в процессах обработки металлов давлением, приводит к неудовлетворительным результатам, так как, по мнению С. И. Губкина [8], при пластической деформации существует более сложная зависимость между удельной силой трения и нормальным давлением.

В основу определения указанных сил должны быть положены следующие законы трения [1]: закон гидродинамического трения, предложенный русским учёным Н. П. Петровым, и закон «сухого» трения, предложенным советскими учёными Б. В. Дерягиным и И. В. Крагельским. Закон Петрова может быть записан так:

$$F_{mp} = \chi \cdot \frac{v_{ск} \cdot A_{н.с.}}{\Delta}, \quad (1.18)$$

где  $\chi$  – вязкость смазки;  $v_{ск}$  – скорость скольжения, м/с;  $A_{н.с.}$  – площадь поверхности скольжения, м<sup>2</sup>;  $\Delta$  – толщина слоя смазки, м.

Закон сухого трения вытекает из молекулярно-механической теории трения. Согласно Б. В. Дерягину:

$$F_{mp} = \mu(N + P_0 \cdot S_u), \quad (1.19)$$

где  $P_0$  – удельная сила прилипания, Н;  $S_u$  – истинная площадь контакта, м<sup>2</sup>.

Используя выражение (1.10) коэффициент внешнего трения  $\mu$  будет равен:

$$\mu = \frac{\tau}{N + P_0 \cdot S_u}. \quad (1.20)$$

Из всего вышесказанного снижение работы деформирования, усилий необходимых для деформирования заготовки, можно за счёт снижения коэффициента трения, что повлечёт к снижению силы трения. Это достигается путём внедрения новых смазочных материалов с низким коэффициентом трения. После того как будут найдены смазки, обеспечивающие такое значительное снижение рабочих напряжений, что влияние контактного трения на сопротивление деформации будет исчисляться всего несколькими процентами, тогда не нужно учитывать в расчётах контактные силы трения. Большинство задач в этом случае можно решать, исходя из условия отсутствия контактного трения, а затем полученное решение использовать с поправочным коэффициентом, учитывающим влияние трения. Такой приём во многих случаях может дать более быстрые и точные результаты.

Многолетний опыт накатывания шлиц на предприятии ОАО «Автодеталь Сервис» показывает, что применение смазочных материалов недостаточно эффективно влияет на показатели контактного трения. Можно предположить, что при больших усилиях в пятне контакта, смазочный материал вытесняется из зоны

трения и происходит практически сухое трение. Следовательно, при накатывании необходимо применить такие методы упрочнения деформирующего инструмента (ролика), которые позволили бы снизить коэффициент контактного трения, что повлечёт к снижению усилий деформирования и снижению работы затрачиваемой на процесс деформирования.

Мы предлагаем на деформирующий инструмент (ролик) наносить покрытия, обладающие хорошей адгезией к подложке и низким коэффициентом контактного трения. По-видимому, данное покрытие должно обеспечить весьма ничтожные потери на трение, если добиться создания прочных пластичных плёночных покрытий, не разрушающихся при деформации металла и образующих прочное соединение с инструментом. Данные покрытия можно получить методом КИБ описанным выше.

Необходимо, чтобы предложенные покрытия не разрушались в процессе накатывания и имели хорошее сцепление с подложкой.

### **1.6 Выводы. Цель и задачи исследования**

Шлицы на валах обычно получают резанием на шлицефрезерных или зубофрезерных станках червячной фрезой методом обкатки. Операция шлицефрезерования составляет от 50 до 60 % трудоемкости всей механической обработки валов. Для повышения физико-механических свойств материала валы подвергают термической и финишной обработке, что вызывает дополнительные затраты.

Большие преимущества перед процессом резания имеет метод формообразования шлицев пластическим деформированием в холодном состоянии. При его применении значительно уменьшаются отходы металла в стружку, снижаются затраты труда, сокращается расход электроэнергии, высвобождаются металлорежущие станки и производственные площади, повышается производительность. Кроме этого, валы со шлицами, накатанными в холодном состоянии, имеют лучшую структуру металла, обладают более высокими механическими и эксплуатационными свойствами, чем валы со шлицами, полученными резанием. По меха-



ническим свойствам валы с накатанными шлицами вплотную приближаются к валам подверженным термической обработке; в процессе накатывания получается ориентированная структура металла с вытянутыми зернами по профилю шлицев, в результате чего прочность накатанных валов обычно выше прочности аналогичных деталей, изготовленных резанием из такого же материала.

Несмотря на преимущества, широкое внедрение в производство данной технологии во многих случаях сдерживается сравнительно низкой точностью профилей и низкой стойкостью инструмента.

Обзор и анализ научно-технической литературы показал, что ролики для продольного накатывания шлицевых валов в многороликовых головках изготавливаются в основном из стандартных сталей X12M, X12Φ1, P18, P6M5. В свою очередь ролики работают в тяжёлых условиях, испытывая большие давления.

Как показал опыт использования шлиценакатных роликов из этих сталей, часты случаи выхода их из строя по причине хрупкого разрушения. Указанным сталям недостает вязкости.

Из анализа износа и разрушения деформирующего инструмента в целом видно, что неравномерность распределения напряжений является одним из основных факторов, определяющих условия работы деформирующего инструмента и тем самым влияющего на его стойкость.

При износе происходит притупление режущих кромок, увеличение радиусов закруглений инструмента. Износ прогрессирует при наличии интенсивного налипания (нароста). Истирание инструмента происходит в местах максимальных нагрузок, подверженных силам трения при перемещении деформируемого металла относительно рабочей поверхности инструмента.

На точность накатываемых шлицев оказывает существенное влияние способ накатывания, конструкция и точность исполнения элементов оборудования и инструмента, наладка операции накатывания; форма и точность заготовки, а также физико-механические свойства её материала; температурные явления, сопровождающие процесс, и т. п. Оценка точности шлицев осуществляется анализом по-

грешностей: по ширине шлица ( $\Delta b_u$ ), по направлению боковой стороны шлица ( $\Delta B_u$ ) и по длине ( $\delta l$ ).

В качестве показателей точности должны определяться три группы исходных погрешностей:

1. Погрешности взаимного положения заготовки и инструмента (статические погрешности) включающие в себя: биение заходной фаски вала, биение диаметра под накатывание, биение опорного торца, величину отклонения наружного диаметра под накатывание, величину перепада твёрдости между партией детали, перепад твёрдости в осевом сечении вала, перепад твёрдости в поперечном сечении вала, конструктивные особенности узлов станка, качество и точность центров.

2. Погрешности, связанные с действующими при накатывании силами (динамические погрешности) включающие в себя: схему деформирования металла, величину радиальной подачи инструмента по проходам, количество проходов, способ базирования заготовки.

3. Погрешности, связанные с течением металла (погрешности метода) включающие в себя: жёсткость станка в целом, жёсткость отдельных узлов станка погрешности изготовления узлов станка.

Устранение каких-либо погрешностей из данных групп будет способствовать повышению точности шлицевых профилей на валах в процессе холодного многопроходного накатывания.

Работы, выполненные в области многопроходного холодного накатывания шлицевых профилей на валах, направлены либо на повышение стойкости инструмента, либо на совершенствование технологии, т. е. решают эту задачу частично.

Таким образом, дальнейшие исследования в области увеличения стойкости шлиценакатных роликов и точности накатываемых профилей должны проводиться, опираясь на знание величин возникающих в роликах напряжений и погрешностей, вызываемых процессом холодного многопроходного накатывания, изыскание и опробование недефицитных высокопрочных сталей с малым содержанием углерода, а так же применение на инструмент различного рода плёночных изно-

состоящих плёночных покрытий, позволяющих снизить коэффициент трения, давление и напряжения на инструменте.

В связи с этим, целью работы является увеличение долговечности деформирующего инструмента с одновременным повышением точности прямоугольных шлицевых профилей на валах из среднеуглеродистых сталей при холодном многопроходном накатывании.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

1. Разработать математические модели расчёта площади контакта «инструмент-заготовка», нормальных и касательных напряжений на профилирующих поверхностях накатных роликов. Экспериментально подтвердить адекватность разработанных моделей. По математическим моделям определить площади контакта, усилия деформирования, напряжения и крутящий момент на накатных роликах. Спрогнозировать точность шлицевого профиля на валах.

2. Установить основные причины выхода из строя шлиценакатных роликов, на основании исследования механизма их изнашивания при многопроходном холодном пластическом деформировании профилей на валах.

3. Установить особенности процесса разрушения шлиценакатных роликов с износостойким покрытием.

4. Усовершенствовать конструкцию шлиценакатного стана 1126 ПС, для создания условий совмещения оптических осей заготовки и накатной головки, что обеспечит возможность накатывания одинакового полного профиля шлицев по всей длине изделия независимо от погрешностей предварительной обработки заготовки.

5. Выполнить опытно-промышленные испытания шлиценакатных роликов, изготовленных по предлагаемой технологии, в процессе многопроходного холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах.

## 2 Напряженное состояние накатного ролика при формировании шлицевых профилей на валах холодным пластическим деформированием

### 2.1 Расчёт усилий на деформирование при многопроходном холодном накатывании шлицевых профилей на валах

Расчёт контактных напряжений, влияющих на долговечность накатного инструмента, проводим на основе построения сеток линий скольжения.

Для сложной структуры очага деформации с разветвлённым пластическим течением металла на последних ходах, оказывающих существенное влияние на точность формирования профиля [16], применение различных типов сеток линий скольжения позволяет общую задачу разделить на ряд простейших, таких как формирование боковых поверхностей зубьев, шлица и переходной кромки.

Для упрощения решения принимаем ряд допущений: схему напряжённого состояния заготовки представляем плоской, очаг пластической деформации представляем в виде отдельных областей, материал заготовки жёсткопластичный, неупрочняющийся, изотропный, подчиняется условию текучести Губера-Мизеса.

Граничные условия. На свободных поверхностях условия для нормальных и касательных напряжений:  $\sigma_n = 0$ ;  $\tau_n = 0$ .

На контактной поверхности:  $\sigma_n \neq 0$ ;  $\tau_n = \pm \tau_k$ . Величина касательной компоненты напряжения выражается:

$$\tau_k = \tau_s \cdot \cos 2\gamma, \quad (2.1)$$

где  $\gamma$  – угол, образованный вертикальной осью и нормалью к поверхности контакта.

$$\gamma = \frac{\arccos(2\mu)}{2} [16], \quad (2.2)$$

где  $\mu$  – коэффициент контактного трения.

Для определения средних контактных усилий в очаге пластической деформации были построены возможные поля линий скольжения, как без учёта сил трения, так и с их учётом (рисунок 2.1).

Среднее контактное нормальное напряжение [95] определяется:

$$\sigma_{cp} = \frac{\sigma_{cp1} + \sigma_{cp2}}{2}, \quad (2.3)$$

где  $\sigma_{cp1}$  – среднее нормальное контактное напряжение в момент касания роликов заготовки, МПа;  $\sigma_{cp2}$  – среднее нормальное контактное напряжение в момент внедрения роликов в заготовку, МПа.

При условии, что контактное трение отсутствует  $\sigma_{cp1}$  по рисунку 2.1,а можно определить на поверхности ролика:

$$\sigma_{cp1} = 2 \cdot K (1 + \omega_{AB}) = 2 \cdot k \left( 1 + \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.4)$$

$$\sigma_{cp2} = 2 \cdot K (1 + \omega_{AB}) = 2 \cdot k (1 + \pi - \theta) \quad (2.5)$$

где  $K$  – коэффициент зависящий от коэффициента трения, геометрических параметров, линий скольжения деформируемого металла и др;  $\omega_{AB}$  – величина угла поворота линий скольжений  $AB$ , град.

Подставляя (2.4) и (2.5) в формулу (2.3) получим:

$$\sigma_{cp} = 2 \cdot K \cdot 3,26 \quad (2.6)$$

Таким образом, используя формулу (1.8), усилие, действующее на каждый накатной ролик без учёта контактных сил трения определим по формуле:

$$T_{осев}^{рол} = \frac{2 \cdot \sigma_T}{\sqrt{3}} \cdot 3,26 \cdot A = 3,76 \cdot \sigma_T \cdot A, \quad (2.7)$$

где  $\sigma_T$  – напряжения течения металла, МПа;  $A$  – площадь контакта инструмента с заготовкой, м<sup>2</sup>.

При учёте трения ( $\mu = 0,05$ ),  $\sigma_{cp1}$  по рисунку 2.1,б определяем по выражению:

$$\sigma_{cp1} = 2 \cdot k \left( 1 + \frac{\pi}{2} + 45^\circ - \gamma \right) = 2 \cdot k \left( 1 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{62} \right), \quad (2.8)$$

$$\sigma_{cp2} = 2 \cdot k (1 + \pi - \theta + 2(45^\circ - \gamma)) = 2 \cdot k \left( 1 + \pi - \frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{31} \right). \quad (2.9)$$

Подставляя выражения (2.8) и (2.9) в формулу (2.3) получим:

$$\sigma_{cp} = 2 \cdot K \cdot 3,33. \quad (2.10)$$

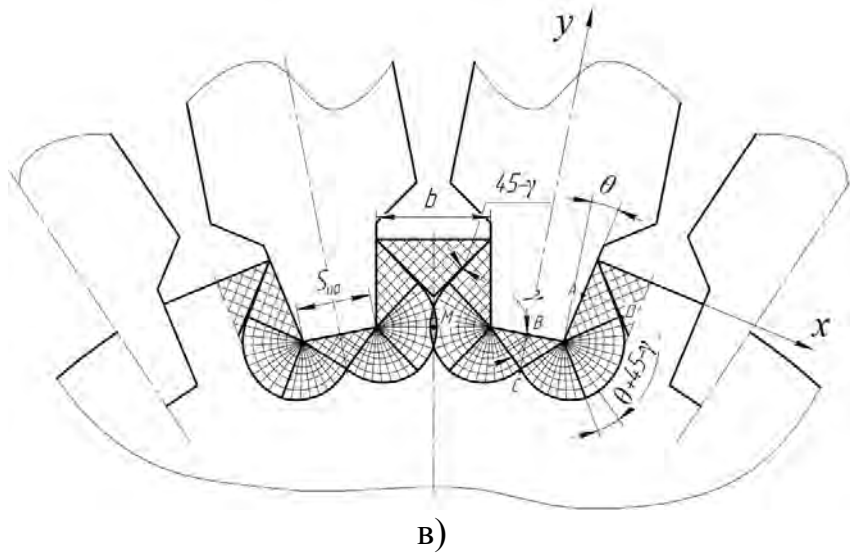
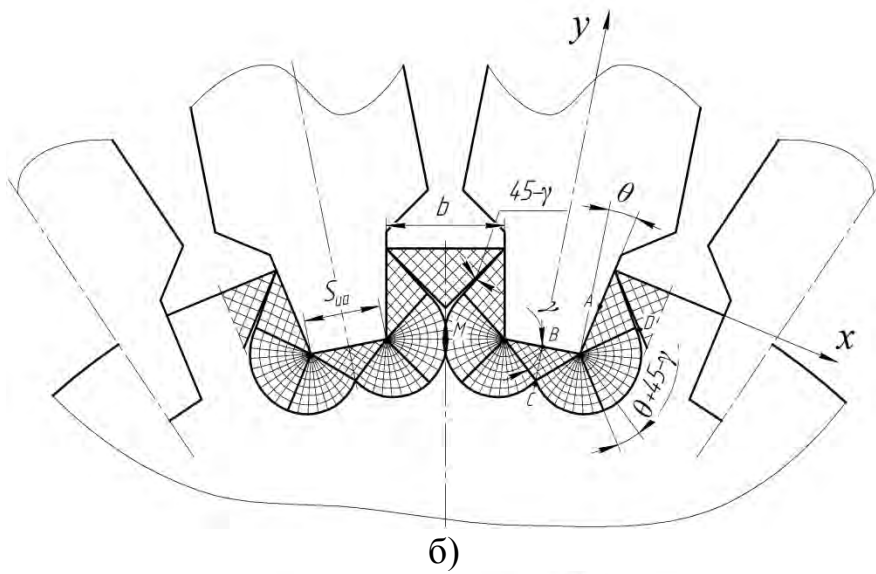
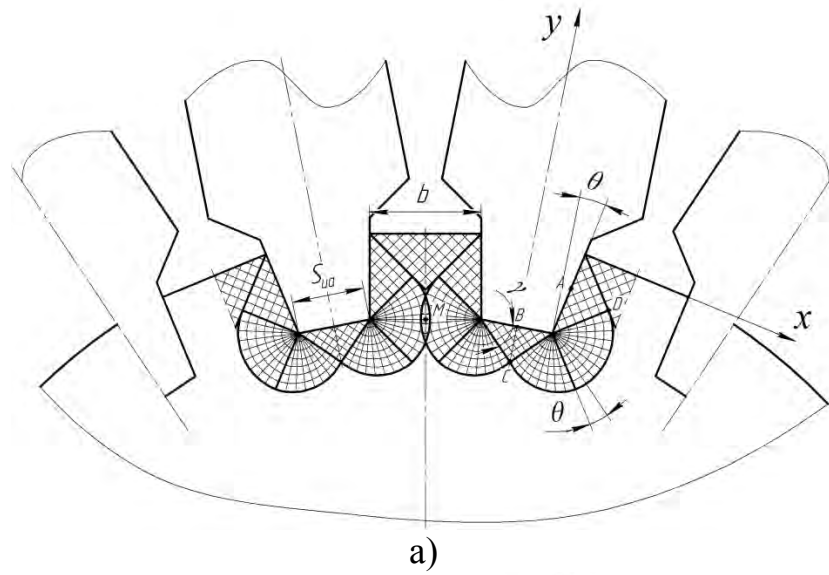


Рисунок 2.1 – Возможные поля линий скольжения при холодном деформировании инструментом из Р6М5:

а) без учёта сил трения; б) с учётом сил трения инструментом из Р6М5,  $\mu = 0,05$ ;

в) с учётом сил трения инструментом из P6M5+TiZrN,  $\mu = 0,026$ .

Усилие, действующее на каждый накатной ролик при  $\mu = 0,05$ :

$$T_{осев}^{пол} = 3,85 \cdot \sigma_T \cdot A \quad (2.11)$$

При использовании инструмента с покрытием P6M5+TiZrN, коэффициент трения  $\mu = 0,026$ . Для этого случая (рисунок 2.1,в):

$$\sigma_{cp1} = 2 \cdot k \left( 1 + \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{120} \right), \quad (2.12)$$

$$\sigma_{cp2} = 2 \cdot k \left( 1 + \pi - \frac{\pi}{16} + \frac{\pi}{60} \right), \quad (2.13)$$

$$\sigma_{cp} = 2 \cdot K \cdot 3,30. \quad (2.14)$$

Действующее усилие на каждый накатной ролик при  $\mu = 0,026$ :

$$T_{осев}^{пол} = 3,81 \cdot \sigma_T \cdot A. \quad (2.15)$$

Таким образом, при накатывании прямоугольных шлицевых профилей усилия, действующие на накатной ролик, увеличиваются пропорционально повышению коэффициента контактного трения.

Увеличение усилий деформирования и напряжений при многопроходной накатке происходит в связи с упрочнением поверхностных слоёв заготовки. Данное повышение напряжений, происходит по степенному закону. Для холодного накатывания является характерным, что напряжение текучести зависит от очага деформации за предыдущие этапы накатывания.

Как отмечается в работе [16], решение задачи по отысканию поля напряжений с учётом влияния упрочнения может быть получено методом интегрирования по теории течения. Однако этот способ сложен и не позволяет получить замкнутого решения в виде аналитической функции.

Одним из вариантов приближённого решения данной задачи, является метод, по которому определяют поле напряжений без учёта влияния упрочнения. Впоследствии определяют величину деформаций, по которой находят новое значение напряжений.

Для нахождения упрочнения заготовки, можно воспользоваться степенной зависимостью вида [16]:

$$\sigma_s = \sigma_T + B \cdot \varepsilon^n, \quad (2.16)$$

где  $B$  – константа, характеризующая интенсивность упрочнения в процессе деформирования и зависящие от свойств материала заготовки [98];  $\varepsilon$  – деформация заготовки;  $n$  – показатель деформационного упрочнения [16].

Из уравнения (2.46) следует, что с возрастанием деформации увеличивается напряжение текучести вследствие упрочнения. Это является существенной причиной увеличения усилия накатывания на завершающем проходе накатной головки, когда в очаг деформации поступает упрочнённый материал предварительно сформированного зуба.

Процесс накатывания шлицевых профилей характеризуется тем, что размеры и форма очага деформации изменяются в процессе деформирования. Такой очаг деформации называется нестационарным, а процесс деформирования называется немонотонным. При монотонном процессе деформирования на каждом отдельном проходе величину единичной деформации в мгновенном очаге деформации, определяют как относительный смещённый объём [16]:

$$\varepsilon = V_c / V_o, \quad (2.17)$$

где  $V_c$  – объём до деформации,  $\text{м}^3$ ;  $V_o$  – смещённый объём после деформации,  $\text{м}^3$ .

Значения деформаций для немонотонного процесса можно определить методом изменения микротвёрдости по эмпирической формуле [16]:

$$\varepsilon = \sqrt[n]{\frac{HB - HB_0}{C}}, \quad (2.18)$$

где  $HB$ ,  $HB_0$  – начальная и конечная твёрдость по Бринеллю;  $C$  – коэффициент, зависящий от марки стали [69, 98].

После преобразования выражения (2.16) получим выражение для упрочнения заготовки:

$$\sigma_s = \sigma_T + \frac{B}{C} \cdot (HB - HB_0) \quad (2.19)$$

Дальнейшее определение усилий деформирования делится на усилия приходящие на цилиндрическую и конусные части накатного ролика.

Схема к определению усилий, действующих на цилиндрическую часть накатного ролика, представлена на рисунке 2.2.



Рассмотрим накатной ролик в равновесном то действующих на него сил. Прямоугольные треугольники ЕДО и СВЕ подобны, соответственно угол ЕОД равен углу ВСЕ, тогда нормальная реакция действующая на ролик равна:

где  $\psi$  – угол наклона клина, град;  $d_i$  – коэффициент трения качения, м.

$$T_i = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi}{\sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right)}, \quad (2.21)$$

Для определения усилий действующих на пятно контакта конических поверхностей инструмента, рассмотрим рисунок 2.3.

$$\Phi_{oi} = \frac{T_i}{\sin \theta}, \quad (2.22)$$

где  $\theta$  – угол наклона образующей основного конуса, град.

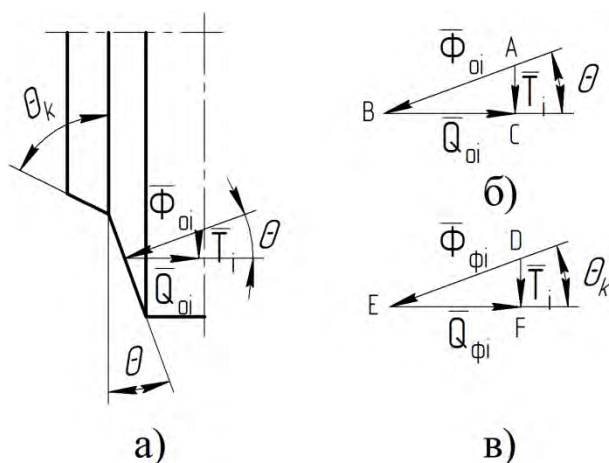


Рисунок 2.3 – Схема к расчёту усилий на пятне контакта по конусной части накатного ролика:

- а) схема расположения векторов сил на инструменте; б) силовой многоугольник для основного конуса формирующего боковую поверхность шлица;
- в) силовой многоугольник для вспомогательного конуса, формирующего фаску

Рассмотрим силовой многоугольник для вспомогательного конуса формирующего фаску (рисунок 2.3,в). Из треугольника  $DEF$  найдём усилие  $\Phi_{\phi i}$ :

$$\Phi_{\phi i} = \frac{T_i}{\sin \theta_k}, \quad (2.24)$$

$$\Phi_{\phi i} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi}{\sin \left( \frac{\lambda_i}{2} \right) \cdot \sin \theta_k}, \quad (2.25)$$

где  $\theta_k$  – угол наклона образующей конуса формирующего фаску к плоскости, град.

Данные усилия рассчитаны на одну боковую поверхность деформирующего инструмента (ролика).

## 2.2 Математическая модель расчёта площади контакта «инструмент – заготовка»

Для определения площади пятна контакта основного конуса накатного ролика, воспользуемся расчётной схемой, приведённой на рисунке 2.4.

Для нахождения площади пятна контакта  $A_{ABE}$  на конусной части ролика спроецируем её на плоскость (рисунок 2.5) и найдём площадь проекции  $A_{ABC}$ .

$$A_{ABC} = A_{OAB} - A_{OCB}, \quad (2.26)$$

где  $A_{OAB}$  – площадь сектора OAB, м<sup>2</sup>;  $A_{OCB}$  – площадь треугольника OCB, м<sup>2</sup>.

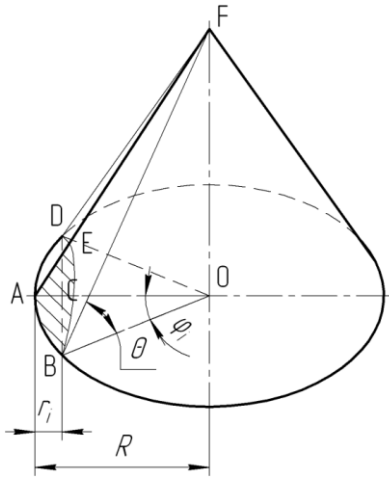


Рисунок 2.4 – Расчётная схема площади пятна контакта образующего конуса

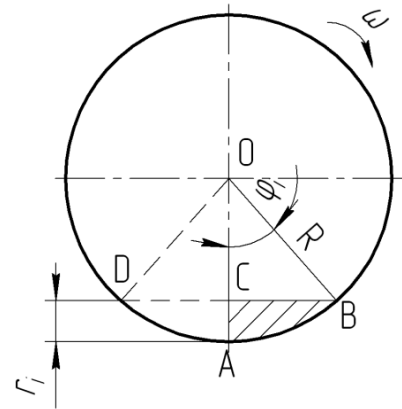


Рисунок 2.5 – Проекция площади пятна контакта на плоскость

$$A_{OAB} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \varphi_i}{360}, \quad (2.27)$$

где  $R$  – радиус накатного ролика, м;  $\varphi_i$  – угол сектора AOB, град.

$$A_{OCB} = \frac{OC \cdot CB}{2} = \frac{(R - r_i) \cdot R \cdot \sin \varphi_i}{2}, \quad (2.28)$$

где  $r_i$  – попоходная глубина внедрения накатного ролика, м.

Рассматривая треугольник OCB определим величину угла  $\varphi_i$ :

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{R - r_i}{R}\right). \quad (2.29)$$

Подставляя уравнения (2.27), (2.28) и (2.29) в уравнение (2.26) получаем:

$$A_{ABC} = \frac{R}{2} \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R - r_i}{R}\right) - (R - r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R - r_i}{R}\right)\right) \right]. \quad (2.30)$$

С целью определения искомой площади пятна контакта  $A_{ABE}$  на конусной части ролика рассмотрим треугольник EAC (рисунок 2.4), откуда следует:

$$A_{ABE(1-3)} = \frac{R}{2 \cdot \cos \theta} \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) - (R-r_i) \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) \right) \right]. \quad (2.31)$$

Деформирующий инструмент при холодном накатывании имеет сложную форму, состоящую из двух конусов: основного конуса, формирующего шлиц, и вспомогательного конуса, формирующего фаску. Соответственно формула (2.31) справедлива для первых трёх проходов фильеры. При последующих проходах в контакт вступает вспомогательный конус.

Рассчитаем площадь пятна контакта вспомогательного конуса при последующих проходах, в момент вступления в работу конуса, формирующего фаску.

Для этого необходимо рассчитать площадь пятна контакта  $A_{BMNC(4-6)}$  (рисунок 2.6) основного конуса формирующего шлиц при 4-6 проходах фильеры.

$$A_{BMNC(4-6)} = \frac{A_{BDC} - A_{MDN}}{\cos \theta}, \quad (2.32)$$

где  $A_{BDC}$  – проекция полной площади пятна контакта боковой поверхности ролика при 4-6 проходах на плоскость, м<sup>2</sup>;  $A_{MDN}$  – проекция площади пятна контакта конуса формирующего фаску на плоскость, м<sup>2</sup>.

Определяем площадь  $A_{MDN}$ :

$$A_{MDN} = A_{MON} - A_{DON}, \quad (2.33)$$

где  $A_{MON}$  – площадь сектора MON, м<sup>2</sup>;  $A_{DON}$  – площадь треугольника DON, м<sup>2</sup>.

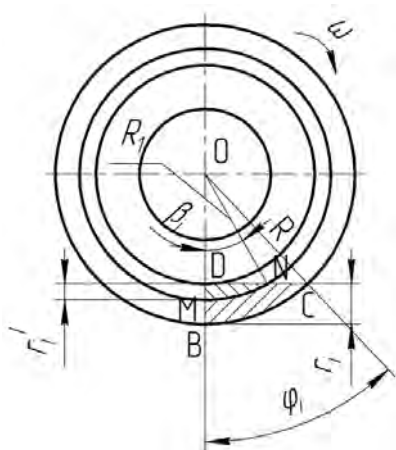


Рисунок 2.6 – Проекция площади пятна контакта вспомогательного конуса

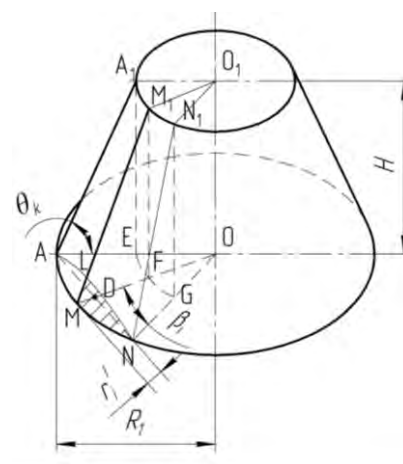


Рисунок 2.7 – Расчётная схема площади пятна контакта вспомогательного конуса

$$A_{MON} = \frac{\pi \cdot R_1^2 \cdot \beta_i}{360}, \quad (2.34)$$

где  $R_1$  – радиус основания конуса, формирующего фаску, м;  $\beta_i$  – угол сектора DON, град.

$$A_{DON} = \frac{DO \cdot DN}{2} = \frac{(R_1 - r_i^I) \cdot R_1 \cdot \sin \beta_i}{2}, \quad (2.35)$$

где  $r_i^I$  – попоходная глубина внедрения ролика на вспомогательном конусе, м.

Рассмотрим треугольник DON и определим величину угла  $\beta_i$  (рисунок 2.7):

$$\beta_i = \arccos\left(\frac{R_1 - r_i^I}{R_1}\right). \quad (2.36)$$

Подставляя уравнения (2.34), (2.35) и (2.36) в уравнение (2.33) получаем:

$$A_{MDN} = \frac{R_1}{2} \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1 \cdot \arccos\left(\frac{R_1 - r_i^I}{R_1}\right) - (R_1 - r_i^I) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1 - r_i^I}{R_1}\right)\right) \right]. \quad (2.37)$$

Площадь  $F_{BDC}$  определяется по формуле (2.30), отсюда подставляя уравнения (2.30) и (2.37) в уравнение (2.32) получаем:

$$A_{BMNC(4-6)} = \frac{R \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R - r_i}{R}\right) - (R - r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R - r_i}{R}\right)\right) \right]}{2 \cdot \cos \theta} - \frac{R_1 \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1 \cdot \arccos\left(\frac{R_1 - r_i^I}{R_1}\right) - (R_1 - r_i^I) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1 - r_i^I}{R_1}\right)\right) \right]}{2 \cdot \cos \theta}. \quad (2.38)$$

Определим площадь пятна контакта боковой поверхности вспомогательного конуса, формирующего фаску  $A_{LMN}$ . Данная площадь задействована только при 4-6 проходах фильеры. Из треугольника  $LMD$  (рисунок 2.7) следует:

$$A_{LMN} = \frac{F_{MDN}}{\cos \theta_k}, \quad (2.39)$$

Подставляя уравнение (2.37) в уравнение (2.39) получаем:

$$A_{LMN} = \frac{R_1}{2 \cdot \cos \theta_k} \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1 \cdot \arccos\left(\frac{R_1 - r_i^I}{R_1}\right) - (R_1 - r_i^I) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1 - r_i^I}{R_1}\right)\right) \right]. \quad (2.40)$$

Площадь пятна контакта  $A_{ABCD}$  (рисунок 2.8) цилиндрической поверхности деформирующего инструмента (ролика) при различной глубине внедрения определим по выражению:

$$A_{ABCD} = l_{AB} \cdot a, \quad (2.41)$$

где  $l_{AB}$  – длина дуги контакта, м;  $a$  – ширина цилиндрической части накатного ролика, м.

$$l_{AB} = \frac{\pi \cdot R \cdot \lambda}{180}, \quad (2.42)$$

где  $\lambda$  – угол дуги контакта, град.

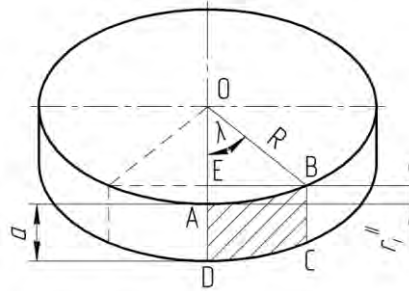


Рисунок 2.8 – Расчётная схема площади пятна контакта на цилиндрической поверхности накатного ролика

Определяем угол  $\lambda$  из треугольника ЕОБ (рисунок 2.8):

$$\lambda = \arccos\left(\frac{R - r_i^{II}}{R}\right), \quad (2.43)$$

где  $r_i^{II}$  – глубина внедрения деформирующего инструмента (ролиka) при каждом отдельном проходе фильеры, м.

Подставляем уравнение (2.42) и (2.43) в уравнение (2.41) и получаем:

$$A_{ABCD} = \frac{\pi \cdot R \cdot a \cdot \arccos\left(\frac{R - r_i^{II}}{R}\right)}{180}. \quad (2.44)$$

Равенство справедливо для всех шести проходов накатной головки.

Определим суммарную площадь горизонтальной проекции пятна контакта накатного ролика от цилиндрической и двух конусных частей [105].

Воспользуемся формулой (2.41) для расчёта площадей цилиндрической поверхности деформирующего инструмента (ролиka) преобразовав её под наши условия в соответствии с рисунком 2.9.

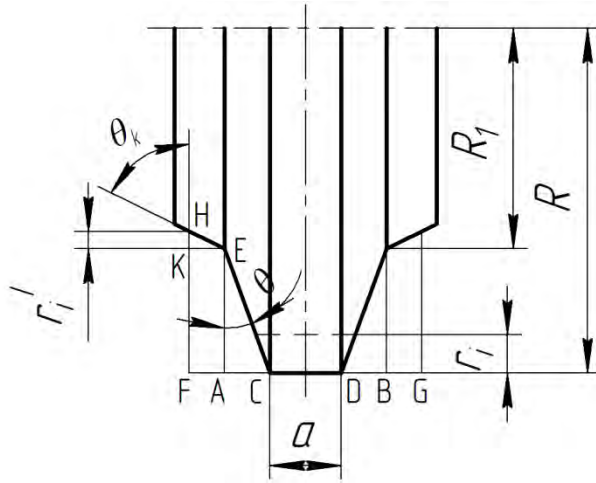


Рисунок 2.9 – Схема к расчёту суммарной горизонтальной проекции площади пятна контакта «инструмент – заготовка»

$$A_{ABCD(1-3)}^I = l_{AB} \cdot AB_i, \quad (2.45)$$

$$A_{ABCD(4-6)}^I = l_{AB} \cdot FG_i, \quad (2.46)$$

где  $AB_i$   $FG_i$  – ширина горизонтальной проекции пятна контакта рабочей части деформирующего инструмента (ролика) при 1-3 и 4-6 проходах, м.

Находим ширину горизонтальной проекции пятна контакта рабочей части деформирующего инструмента (ролика) при 1-3 проходах по рисунку 2.9:

$$AB_i = 2 \cdot AC_i + a. \quad (2.47)$$

Из прямоугольного треугольника EAC находим  $AC_i$ :

$$AC_i = r_i \cdot \operatorname{tg} \theta. \quad (2.48)$$

Отсюда находим  $AB_i$ :

$$AB_i = 2 \cdot r_i \cdot \operatorname{tg} \theta + a. \quad (2.49)$$

Находим ширину горизонтальной проекции пятна контакта рабочей части деформирующего инструмента (ролика) при 4-6 проходах по рисунку 2.9:

$$FG_i = AB_4 + 2 \cdot FA_i, \quad (2.50)$$

где  $AB_4$  – ширина горизонтальной проекции пятна контакта рабочей части деформирующего инструмента (ролика) при 4 проходе.

Из прямоугольного треугольника KHE находим  $KE_i$ :

$$FA_i = KE_i = r_i^I \cdot \operatorname{tg} \theta_k, \quad (2.51)$$

$$AB_4 = 2 \cdot (R - R_1) \cdot \operatorname{tg} \theta + a. \quad (2.52)$$

Отсюда находим  $FG_i$ :

$$FG_i = 2 \cdot (R - R_l) \cdot \operatorname{tg} \theta + a + 2 \cdot r_i^I \cdot \operatorname{tg} \theta_k. \quad (2.53)$$

Подставляем уравнение (2.39) и (2.42) в уравнение (2.45) и уравнение (2.53) и (2.41) в уравнение (2.46) получаем:

$$A_{ABCD(1-3)}^I = \frac{\pi \cdot R \cdot \lambda (2 \cdot r_i^I \cdot \operatorname{tg} \theta + a)}{180}, \quad (2.54)$$

$$A_{ABCD(4-6)}^I = \frac{\pi \cdot R \cdot \lambda (2(R - R_l) \operatorname{tg} \theta + a + 2 \cdot r_i^I \cdot \operatorname{tg} \theta_k)}{180}. \quad (2.55)$$

### 2.3 Расчёт нормальных и тангенциальных напряжений, действующих на накатной ролик

Для определения фактических значений нормальных напряжений в пятне контакта «инструмент – заготовка» определим напряжения, действующие как на цилиндрическую поверхность накатного ролика, так и на конусные его части.

Определяем напряжения, действующие на цилиндрическую поверхность накатного ролика от действия равнодействующей силы  $T_i$  по проходам.

$$\sigma_y = \frac{T_i}{A_{ABCDi}}. \quad (2.56)$$

Подставляем уравнение (2.21) и (2.44) в уравнение (2.56) после преобразований окончательно получаем:

$$\sigma_y = \frac{180 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi}{\pi \cdot R \cdot a \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \arccos\left(\frac{R - r_i^{II}}{R}\right)}. \quad (2.57)$$

Напряжения, действующие на цилиндрическую проекцию ролика от действия равнодействующей силы  $T_i$  попоходно вычисляется по формуле:

$$\sigma_y^I = \frac{T_i}{A_{ABCDi}^I}. \quad (2.58)$$

Подставляем уравнение (2.21) и (2.54) в уравнение (2.58) после преобразований окончательно получаем выражение при формировании основного конуса:



$$\sigma_{u(1-3)}^I = \frac{180 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi}{\pi \cdot R \cdot \lambda_i \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot (2 \cdot r_i \cdot \operatorname{tg} \theta + a)} . \quad (2.59)$$

Подставляем уравнение (2.21) и (2.55) в уравнение (2.58) после преобразований окончательно получаем выражение при формировании вспомогательного конуса:

$$\sigma_{u(4-6)}^I = \frac{180 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi}{\pi \cdot R \cdot \lambda_i \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot (2(R - R_1) \operatorname{tg} \theta + a + 2 \cdot r_i' \cdot \operatorname{tg} \theta_k)} . \quad (2.60)$$

Определяем напряжения, действующие на боковую поверхность деформирующего инструмента (ролика) и на весь ролик от действия равнодействующей силы  $T_i$ ,  $\Phi_i$  [106, 107].

Схема напряжений на боковой поверхности накатного ролика представлена на рисунке 2.10.

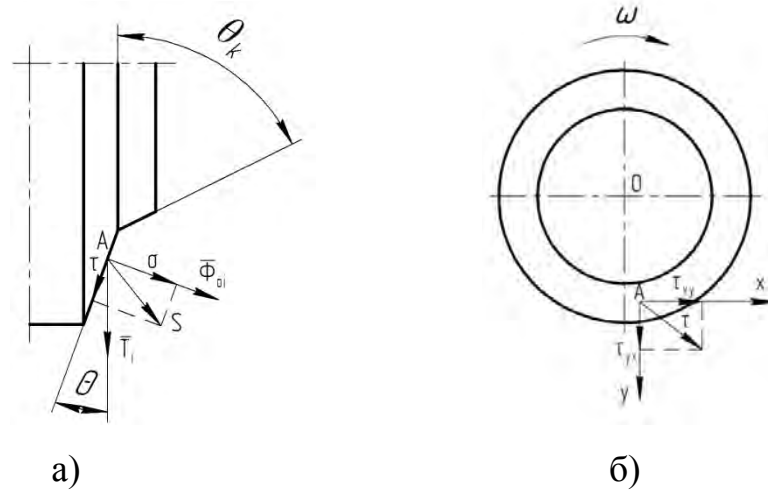


Рисунок 2.10 – Схема действия напряжений на боковой поверхности накатного ролика: а) схема расположения нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений; б) схема расположения касательных  $\tau$  напряжений.

Нормальные напряжения, действующие на боковую поверхность накатного ролика, при формировании основного конуса рассчитываются по выражению:

$$\sigma_{(1-3)} = \frac{\Phi_{oi}}{A_{ABE(1-3)}} . \quad (2.61)$$

Подставляем уравнения (2.23) и (2.31) в (2.61) и преобразуя окончательно получаем выражение расчёта нормальных напряжений при формировании основного конуса:

$$\sigma_{(1-3)} = \frac{2 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{ctg} \theta}{R \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right) - (R-r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right)\right) \right]}. \quad (2.62)$$

Нормальные напряжения, действующие на основной конус деформирующего инструмента (ролика), при формировании вспомогательного конуса вычисляется по формуле:

$$\sigma_{(4-6)} = \frac{\Phi_{oi}}{A_{BMNC(4-6)}}. \quad (2.63)$$

Подставляем уравнения (2.23) и (2.38) в (2.63) и после преобразований окончательно получаем выражение расчёта нормальных напряжений при формировании вспомогательного конуса:

$$\sigma_{(4-6)} = \frac{2 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{ctg} \theta}{\left[ \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R^2 \cdot \arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right) - R \cdot (R-r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right)\right) \right] - \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1^2 \cdot \arccos\left(\frac{R_1-r_i^I}{R_1}\right) - R_1 \cdot (R_1-r_i^I) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1-r_i^I}{R_1}\right)\right) \right] \right] \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right)}. \quad (2.64)$$

Нормальные напряжения, действующие на конус, формирующий фаску, при формировании вспомогательного конуса рассчитываем по формуле:

$$\sigma_{\phi(4-6)} = \frac{\Phi_{\phi i}}{A_{LMN(4-6)}}. \quad (2.65)$$

Подставив (2.25) и (2.40) в (2.65) и после преобразований получаем выражение для расчёта нормальных напряжений при формировании вспомогательного конуса:

$$\sigma_{\phi(4-6)} = \frac{2 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{ctg} \theta_k}{R_1 \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1 \cdot \arccos\left(\frac{R_1-r_i^I}{R_1}\right) - (R_1-r_i^I) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1-r_i^I}{R_1}\right)\right) \right]}. \quad (2.66)$$

Касательные напряжения, действующие в плоскости основного конуса накатного ролика, для 1-3 проходов рассчитывается по формуле (рисунок 2.10,б):

$$\tau_{(1-3)} = \frac{T_i \cdot \cos \theta}{A_{ABE(1-3)}}. \quad (2.67)$$

Подставив (2.21) и (2.31) в (2.67) и после преобразований получаем выражение для расчёта касательных напряжений:

$$\tau_{(1-3)} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \cos^2 \theta}{R \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right) - (R-r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right)\right) \right]}. \quad (2.68)$$

Касательные напряжения, действующие в плоскости основного конуса накатного ролика, при формировании вспомогательного конуса рассчитывается по формуле:

$$\tau_{(4-6)} = \frac{T_i \cdot \cos \theta}{A_{BMNC(4-6)}}. \quad (2.69)$$

Подставляем уравнение (2.21) и (2.38) в (2.69) и после преобразований получаем выражение для касательных напряжений при формировании вспомогательного конуса:

$$\tau_{(4-6)} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \cos^2 \theta}{\left[ \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R^2 \cdot \arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right) - R \cdot (R-r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right)\right) \right] - \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1^2 \cdot \arccos\left(\frac{R_1-r_i'}{R_1}\right) - R_1 \cdot (R_1-r_i') \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1-r_i'}{R_1}\right)\right) \right] \right] \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right)}. \quad (2.70)$$

Касательные напряжения, действующие в плоскости вспомогательного конуса, формирующего фаску, при формировании вспомогательного конуса рассчитывается по формуле:

$$\tau_{\phi(4-6)} = \frac{T_i \cdot \cos \theta_k}{A_{LMN(4-6)}}. \quad (2.71)$$

Подставив (2.21) и (2.40) в (2.71) и после преобразований получаем выражение для расчёта касательных напряжений при формировании вспомогательного конуса:

$$\tau_{\phi(4-6)} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \cos^2 \theta_k}{R_1 \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1 \cdot \arccos\left(\frac{R_1-r_i'}{R_1}\right) - (R_1-r_i') \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1-r_i'}{R_1}\right)\right) \right]}. \quad (2.72)$$

Суммарный вектор касательных напряжений раскладывается на две составляющие  $\tau_{xy}$  и  $\tau_{yx}$  (рисунок 2.10,б). Составляющая  $\tau_{xy}$  лежит в продольной плоскости и касательно к поверхности ролика. Составляющая  $\tau_{yx}$  направлена по радиусу ролика и перпендикулярна направлению накатки.

$$\tau = \sqrt{\tau_{xy}^2 + \tau_{yx}^2}. \quad (2.73)$$

Суммарные напряжения, действующие на боковую поверхность основного конуса деформирующего инструмента, при формировании основного конуса вычисляется:

$$S_{(1-3)} = \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}. \quad (2.74)$$

Подставив (2.62) и (2.68) в (2.74) и после преобразований получаем выражение для расчёта равнодействующей напряжений при формировании основного конуса:

$$S_{(1-3)} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \theta + \cos^4 \theta}}{R \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right) - (R-r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right)\right) \right]}. \quad (2.75)$$

Суммарные напряжения, действующие на боковую поверхность основного конуса деформирующего инструмента, при формировании вспомогательного конуса вычисляется:

$$S_{(4-6)} = \sqrt{\sigma_{(4-6)}^2 + \tau_{(4-6)}^2}. \quad (2.76)$$

Подставляем уравнение (2.64) и (2.70) в (2.76) и после преобразований получаем выражение равнодействующей напряжений при формировании вспомогательного конуса:

$$S_{(4-6)} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \theta + \cos^4 \theta}}{\left[ \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R^2 \cdot \arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right) - R \cdot (R-r_i) \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R-r_i}{R}\right)\right) \right] - \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1^2 \cdot \arccos\left(\frac{R_1-r_i'}{R_1}\right) - R_1 \cdot (R_1-r_i') \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1-r_i'}{R_1}\right)\right) \right] \right] \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right)}. \quad (2.77)$$

Суммарные напряжения, действующие на вспомогательный конус накатного ролика для 4-6 проходов рассчитывается по выражению:

$$S_{\phi(4-6)} = \sqrt{\sigma_{\phi(4-6)}^2 + \tau_{\phi(4-6)}^2} . \quad (2.78)$$

Подставив (2.66) и (2.72) в (2.78) и после преобразований получаем выражение для расчёта суммарных напряжений при формировании вспомогательного конуса:

$$S_{\phi(4-6)} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \sqrt{ctg^2 \theta_k + \cos^4 \theta_k}}{R_1 \cdot \sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R_1 \cdot \arccos\left(\frac{R_1 - r_i'}{R_1}\right) - (R_1 - r_i') \cdot \sin\left(\arccos\left(\frac{R_1 - r_i'}{R_1}\right)\right) \right]} . \quad (2.79)$$

Результаты расчётов напряжений в пятне контакта накатного ролика приведены в разделе 4.

## 2.4 Классификация погрешностей при холодном пластическом деформировании шлицевых профилей на валах, влияющих на стойкость инструмента

При обработке металлов давлением деформируемый металл скользит по поверхности инструмента, в результате чего возникают силы контактного трения, затрудняющие его скольжение.

Трение при обработке металлов давлением, за исключением отдельных операций, когда оно играет активную роль (например прокатка, вальцовка, некоторые операции листовой штамповки, волочение труб на оправке и др.), является вредным фактором [56].

1. Контактное трение ведёт к возникновению неоднородности деформации или усиливает эту неоднородность, если последняя определяется самим характером осуществляемой операции. Это объясняется тем, что в каждой точке поверхности контакта возбуждаются элементарные касательные силы трения, что вызывает появление касательных напряжений на контактных поверхностях деформируемого тела, направленных противоположно направлению скольжения металла относительно поверхности инструмента в каждой данной точке. В результате может измениться и сама схема напряжённого состояния. Действие трения от контактных поверхностей распространяется в глубину деформируемого тела и со-

здаются зоны затрудненной деформации. Неоднородность деформации нарушает идентичность условий протекания упрочняющих и разупрочняющих процессов в объёме тела, в результате чего может возникать неоднородность металла (различная степень упрочнения по объёму поковки, различная величина зерна и т. п.) [1, 56, 103, 104].

2. Контактное трение в конечном итоге преодолевается активной нагрузкой. Следовательно, контактное трение увеличивает необходимое деформирующее усилие и работу деформации. Увеличение усилия бывает весьма заметным – в несколько раз.

3. Контактное трение снижает стойкость инструмента как в результате непосредственного износа контактной поверхности так и увеличения напряжений в связи с ростом деформирующего усилия.

4. Контактное трение вызывает необходимость применения технологических смазок. Это усложняет технологический процесс, а также иногда требует предварительной обработки исходного материала [56].

Кроме того, силы внешнего трения влияют также на напряжённое и деформированное состояние металла в очаге деформации и, следовательно, на некоторые технологические параметры накатывания. Степень точности и надёжности любого решения в теории обработки металлов давлением зависит от точности формулировки граничных условий, в том числе, точности определения сил трения, их связи с другими факторами.

Процесс накатывания шлицев протекает при наличии внешних зон, которые взаимодействуют с геометрическим очагом деформации и существенно влияют на силовые и кинематические условия накатывания, в том числе и на контактное смещение с последующим изменением геометрии шлиц.

Шлицевая часть карданных валов передаёт значительный крутящий момент с относительным смещением поверхностей, работает в тяжелых условиях абразивного изнашивания и больших контактных нагрузок. Качество поверхности шлицевых профилей и их геометрическая точность определяют эксплуатационную надёжность карданных валов [108].

5. На качество и точность при продольном накатывании шлицевых профилей влияют: биение заходной фаски вала, диаметра под накатывание и опорного торца, перпендикулярность опорного торца относительно оси центров заготовки, величина отклонения наружного диаметра заготовки под накатывание, величина перепада твердости между партией деталей, перепад твердости как в осевом, так и в поперечном сечениях вала, качество и точность центров и др. Перечисленные погрешности и отклонения размеров в сопряжении шлиценакатной головки способствуют возникновению момента закручивания вала со стороны шлиценакатной головки, что в конечном итоге приводит к отклонению шлицевого профиля от номинальных размеров их по длине вала, а неодинаковая твердость заготовки по радиусу приводит к отклонению шлицев по высоте.

Твердость заготовки в различных сечениях оказывает большое влияние на точность получаемых профилей [109]. Особое влияние оказывает «пятнистая» твердость, так как она не предсказуема и может находиться в любой части сечения заготовки. При накатывании ролик испытывает большое сопротивление со стороны участка с повышенной твердостью и отклоняется в сторону меньшей твердости, что влечёт к отклонению от геометрических параметров шлиц. При низкой твердости всего вала (менее 150 HV), в связи с малым его сопротивлением происходит закручивание шлицевой части и отклонение всех размеров от номинальных. При высокой твердости (свыше 210 HV) резко возрастают усилия на деформирование, и снижается стойкость инструмента. В связи с этим рекомендуемая твердость заготовки под накатывание должна соответствовать HV 156-207.

Все погрешности влияющие на точность получаемых шлицевых профилей можно классифицировать по следующим признакам:

1. Погрешности взаимного положения заготовки и инструмента (статические погрешности):

- а) биение заходной фаски вала;
- б) биение диаметра под накатывание;
- в) биение опорного торца;
- г) величина отклонения наружного диаметра под накатывание;

- д) величина перепада твёрдости между партией детали;
- е) перепад твёрдости в осевом сечении вала;
- ж) перепад твёрдости в поперечном сечении вала;
- з) конструктивные особенности узлов станка;
- и) качество и точность центров.

2. Погрешности, связанные с действующими при накатывании силами (динамические погрешности):

- а) схема деформирования металла;
- б) величина радиальной подачи инструмента по проходам;
- в) количество проходов;
- г) способ базирования заготовки.

3. Погрешности, связанные с течением металла (погрешности метода):

- а) жёсткость станка в целом;
- б) жёсткость отдельных узлов станка;
- в) погрешности изготовления узлов станка.

Применительно к шлицевому профилю карданных валов автомобилей УАЗ отклонения от номинальных размеров должны соответствовать 7-8 качеству точности ГОСТ 1139-80 [19, 110, 111], в реальности при накатывании данные отклонения соответствуют 9-10 качеству точности.

В данной работе предлагается: 1. Снижение сил трения нанесением износостойкого покрытия на инструмент (ролик) методом КИБ. Для подбора необходимого покрытия с низким коэффициентом трения, необходимо знать сдвигающие силы, касательные напряжения  $\tau$ , возникающие на рабочей поверхности инструмента. Для определения касательных напряжений необходимо рассчитать усилия деформирования и площади пятна контакта. Особое значение имеет действие момента закручивания со стороны накатной головки на шлицевый вал, а также перемещение объёма деформируемого металла.

2. Для снижения влияния неточностей предварительной обработки заготовки на точность шлицевого вала, неподвижный упор накатного стана 1126 ПС вы-

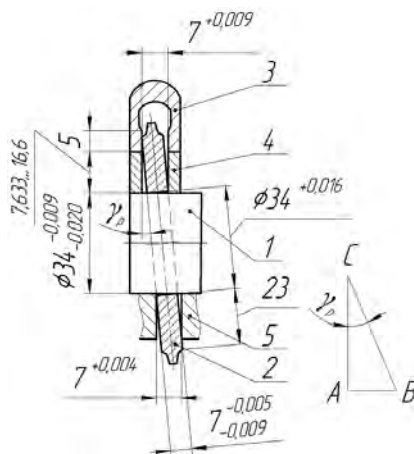


полняется сферическим, имеющим возможность при базировании заготовки в центрах повернуться и занять соосное с накатной головкой положение [112].

В процессе холодной накатки шлицевых профилей карданных валов возможно радиальное смещение рабочей кромки цилиндрической части накатного ролика по отклонениям в сопряжениях накатной головки (таблица 1), относительно оси симметрии на величину, зависимую от соотношения полей допусков (рисунок 2.11).

Таблица 2.1 – Отклонения в сопряжениях шлиценакатной головки [110]

| №<br>п/п | Параметр  | Величина               |
|----------|---|------------------------|
| 1        | Диаметр оси $d_{оси}$ , мм                          | $34_{-0,02}^{-0,009}$  |
| 2        | Внутренний диаметр накатного ролика, $d_{рол}$ , мм | $34_{+0,016}^{+0,005}$ |
| 3        | Ширина ролика, $H_{рол}$ , мм                       | $7_{-0,009}^{-0,005}$  |
| 4        | Ширина паза вставки, $H_{вст}$ , мм                 | $7_{+0,009}^{+0,005}$  |
| 5        | Ширина паза клина, $H_{кл}$ , мм                    | $7,5_{+0,08}^{+0,3}$   |
| 6        | Ширина паза втулки, $H_{вт}$ , мм                   | $7_{+0,004}^{+0,009}$  |



1 – ось; 2 – накатной ролик; 3 – вставка; 4 – клин; 5 – втулка

Рисунок 2.11 – Схема расчёта бокового смещения накатного ролика

Определяем наибольшие отклонения:

$$\Delta d_{\max} = d_{рол.\max} - d_{оси.\min} , \quad (2.79)$$

$$\Delta H_{\max} = H_{\text{вст. max}} - H_{\text{пол. min}} \quad (2.80)$$

$$\Delta d_{\max} = 0,036 \text{ мм}; \Delta H_{\max} = 0,018 \text{ мм}.$$

Ширину паза клина не учитываем вследствие её большой величины.

Величина  $\Delta$  свидетельствует о том, что в конструкции шлиценакатной головки уже заложены отклонения, которые равны предельно допустимым отклонениям от геометрических параметров накатываемых деталей.

Из расчётов видно, что отклонение по ширине накатного ролика  $\Delta H_{\max} < \Delta d_{\max}$  следовательно в дальнейших расчётах будем использовать  $\Delta H_{\max}$ , т. к. именно оно будет влиять на отклонения и угол наклона ролика.

Определим угол отклонения ролика от оси симметрии  $\gamma_p$ :

Из треугольника  $\triangle ABC$  где  $AB = \Delta H_{\max} = 0,018 \text{ мм}$ ;

$$AC = 16,6 + 5 = 21,6 \text{ мм}.$$

$$\text{Определим } \operatorname{tg} \gamma_p = \frac{AB}{AC} = 0,000833, \text{ тогда } \gamma_p = \operatorname{arctg} \frac{AB}{AC} = 0,0478^\circ.$$

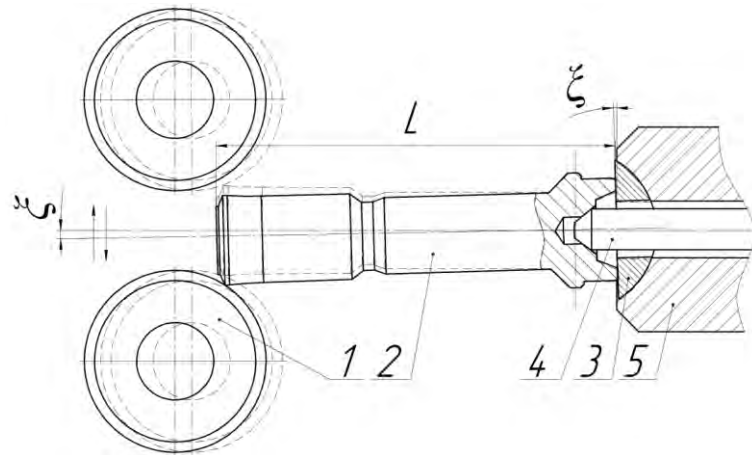
Действующие при накатывании силы изменяют взаимное положение заготовки и инструмента как в момент захода роликов на заготовку, так и в процессе накатывания шлица. В момент встречи с заготовкой контактирует наружная поверхность ролика, выкатывающая дно впадины. Поскольку эта поверхность у различных роликов располагается на разном расстоянии от оси возникает сила, сдвигающая заходный конец заготовки. Величина такого перемещения определяется конкретной наладкой и жёсткостью центральной группы. В результате перемещения заходного конца заготовки её фактическая ось повернется, что приведет к появлению соответствующей погрешности направления. Это явление усугубляется биением  $\delta_3$  заходного конца заготовки относительно линии центров [108, 109].

Возможный угол поворота заготовки смещения верхнего конца заготовки при низкой жёсткости центральной группы найдём по формуле:

$$\xi = 2 \arcsin \frac{BE}{AB} = 2 \arcsin \frac{\delta_3}{2 \cdot L}, \quad (2.81)$$

где  $L = 0,178$  – общая длина заготовки, м [18];  $\delta_3 = 0,1 \cdot 10^{-3}$  – биением заходного конца заготовки относительно линии центров, м.

Таким образом, угол  $\zeta = 0,0322^\circ$ .



1 – накатной ролик; 2 – заготовка; 3 – сферический упор; 4 – центр;  
5 – неподвижный упор

Рисунок 2.12 – Схема расчёта погрешностей заходной фаски и биения опорного торца заготовки на точность шлицевых профилей

Величину смещения  $e$  для каждого из роликов можно рассматривать как связанную с несовпадением реального центра накатной головки с осью детали. Как можно заметить,  $C$  не влияет на ширину шлицев (рисунок 2.12, 2.13)

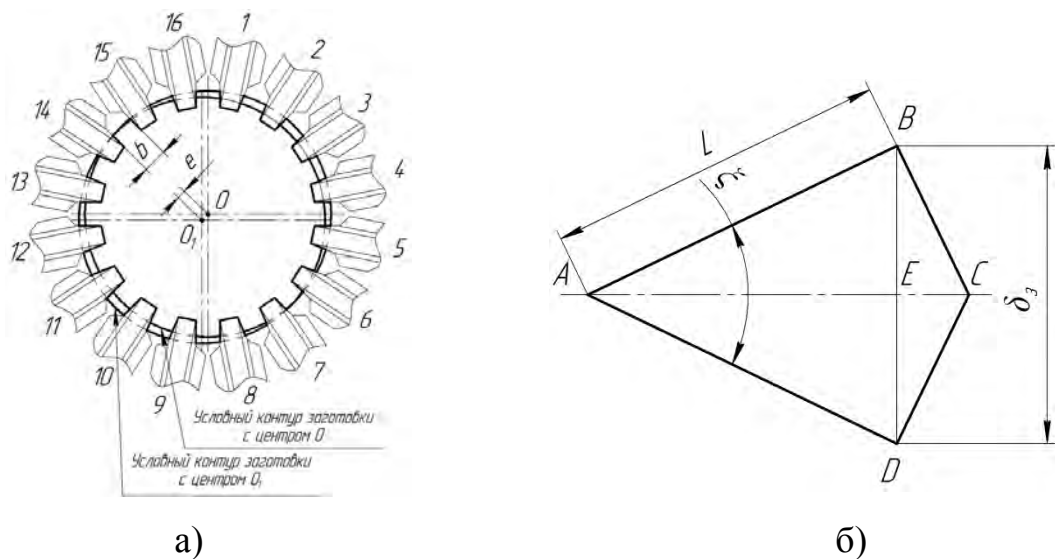


Рисунок 2.13 – Схема расчёта смещения оси заготовки относительно реальной оси накатной головки: а) смещение оси заготовки относительно реальной оси накатной головки; б) схема к определению угла  $\zeta$

Смещение  $e$  сказывается на величине радиусов  $r_{\text{вн}}$  выкатываемых впадин. Расчёт смещения  $e$  проведём из рисунка 2.13,б:

$$e = L \cdot \operatorname{tg} \xi. \quad (2.82)$$

Таким образом, смещение оси заготовки относительно реальной оси накатной головки составит  $e = 0,1$  мм. При этом смещении глубина внедрения накатных роликов по окружности заготовки будет различна и скажется на сборке деталей в сборочный узел.

Для исключения данного смещения нами предлагается изменение заднего неподвижного упора на сферический подвижный, на который устанавливается основание заготовки. За счёт оборотной стороны сферической формы, заготовка, в момент касания её накатными роликами, поворачивается в любом направлении относительно оси центров, совмещая ось симметрии заготовки с осью симметрии накатной роликовой головки, тем самым исправляя погрешности предварительной обработки заготовки (неперпендикулярность опорного торца заготовки, отклонение заходного конуса и отклонение центровых отверстий). При деформировании момент трения подвижного упора относительно базового торца больше момента трения заготовки относительно упора за счёт больших усилий деформирования и упор находится в неподвижном состоянии. За счёт этого глубина внедрения роликов в заготовку становится равномерной на всей длине шлицев (приложение А).

Выполнение оборотной стороны подвижного упора сферической с возможностью поворота упора с заготовкой относительно оси центров позволяет совместить оптическую ось заготовки и роликовой головки и накатать одинаковый полный профиль шлицев на полную глубину внедрения роликов в заготовку на всей длине шлицев независимо от погрешностей предварительной обработки заготовки. Данное устройство защищено патентом на изобретение: «Устройство для повышения точности шлицевых профилей на валах при холодном пластическом деформировании» [112].

Следующим этапом для оценки погрешностей изготовления шлицевых профилей, необходимо оценить допустимый крутящий момент на шлицевой части вала при холодной накатке.

При накатывании шлицевых профилей на валах необходимо, чтобы прямолинейность шлиц относительно оси вращения находилась в поле допуска. При этом момент закручивания шлицевой части вала в процессе накатывания не должен превышать значений, способствующих выходу прямолинейности шлиц из поля допуска [113].

$$M_k = \frac{\pi \cdot \gamma_v \cdot J_p \cdot G}{180 \cdot l} [\text{Н} \cdot \text{м}], \quad (2.83)$$

где  $\gamma_v$  – угол закручивания вала, град.;  $J_p$  – полярный момент инерции сечения,  $\text{м}^4$ ;  $G$  – модуль упругости при сдвиге, Па;  $l$  – длина участка закручивания вала, м.

Модуль упругости при сдвиге для стали равен  $G = 8,2 \cdot 10^{10}$  Па [113].

Рассматривая схему деформирования рисунок 2.14 и 2.15 в котором длина шлицевой части  $AB = l = 0,077$  м [110], а допустимое отклонение  $BC = \delta = 0,04 \cdot 10^{-3}$  м, то угол закручивания будет равен:  $\gamma_v = 0,029^\circ$ . Для перехода на 7 квалитет точности (ГОСТ1139-80) при  $l = 0,1$  м,  $\delta = 0,03 \cdot 10^{-3}$  м, угол закручивания будет равен:  $\gamma_v = 0,017^\circ$ .

Полярный момент инерции сплошного круглого сечения [113] определяется:

$$J_p \cong 0,1 \cdot D^4, \quad (2.84)$$

где  $D$  – внешний диаметр вала, м.

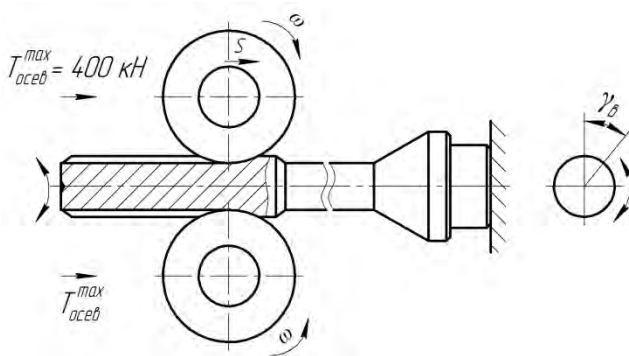


Рисунок 2.14 – Схема накатывания шлиц

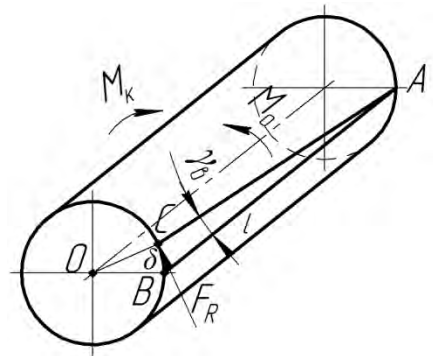


Рисунок 2.15 – Схема и угол закручивания шлицевого вала

Подставив выражения (2.84) в (2.83) получим:

$$M_k = \frac{0,1 \cdot \pi \cdot \gamma_B \cdot D^4 \cdot G}{180 \cdot l} [\text{Н} \cdot \text{м}]. \quad (2.85)$$

Таким образом, момент закручивания шлицевой части вала:

для 8 квалитета точности при  $\gamma_B = 0,029^\circ$   $[M_k] = 112,4 \text{ Н/м}$ ;

для 7 квалитета точности при  $\gamma_B = 0,017^\circ$   $[M_k] = 66,7 \text{ Н/м}$ .

Для определения крутящего момента от фильеры, необходимо рассмотреть схему приложения действующих сил на один накатной ролик (рисунок 2.16).

При устойчивом прямолинейном движении накатного ролика сумма моментов от всех накатных роликов должна быть равна нулю. Составим уравнение моментов относительно точки  $O_l$  (рисунок 2.17), где  $\sum M_{O_l} = 0$ .

$$\sum M_{O_l} = (F_2 - F_{\text{тр}1} + F_{\text{тр}2} + F_2^I) \cdot h_1 + F_1^I \cdot h_2, \quad (2.86)$$

где  $F_{\text{тр}1}, F_{\text{тр}2}$  – силы трения металла о поверхность ролика, Н;  $F_2 = T_{\text{осев}}^{\text{рол}} \cdot \cos \gamma_B$ ;

$F_1^I = T_{\text{осев}}^I \cdot \sin \gamma_B$ ;  $F_2^I = T_{\text{осев}}^I \cdot \cos \gamma_B$  (рисунок 2.17);  $T_{\text{осев}}^{\text{рол}}$  – осевая сила противодействия накатного ролика, Н.

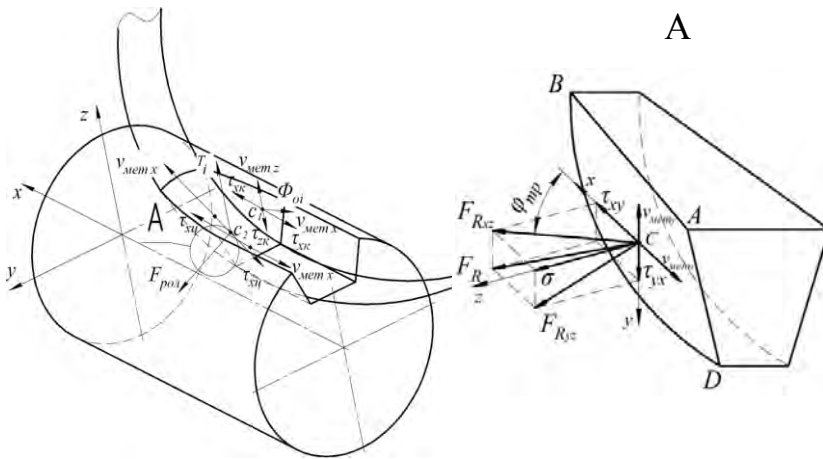


Рисунок 2.16 – Схема действия усилий на конической поверхности накатного ролика

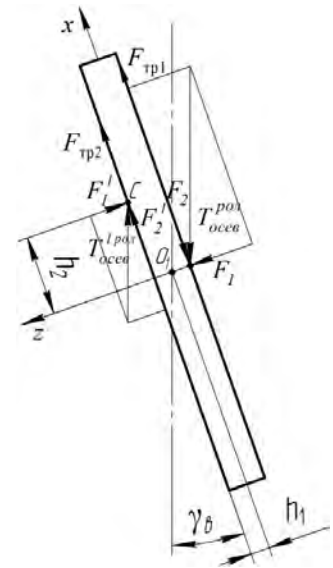


Рисунок 2.17 – Схема нагружения накатного ролика действующими силами

Для определения расстояний  $h_1$  и  $h_2$  необходимо рассмотреть площадь пятна контакта при отклонении накатного ролика от прямолинейного положения. При этом площадь касания со стороны действия силы  $T_{\text{осев}}^{\text{пол}}$  имеет форму дуги расположенной симметрично оси накатного ролика (рисунок 2.18), а площадь со стороны силы  $T_{\text{осев}}^{I \text{ пол}}$  имеет форму сектора смещённого относительно оси накатного ролика (рисунок 2.19).

Из рисунков 2.18-2.20 расположения точки  $C$  приложения сил, определим  $h_1$  и  $h_2$ :

$$h_1 = \frac{a}{2} + \frac{2}{3} \cdot r_i \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (2.87)$$

$$h_2 = \frac{1}{3} \cdot \sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}, \quad (2.88)$$

где  $a$  – ширина цилиндрической части деформирующего инструмента (ролика), м;  $r_i$  – попоходная глубина внедрения ролика, м;  $\theta$  – угол наклона образующей основного конуса, град;  $R$  – радиус накатного ролика, м.

Подставляя уравнения (2.87) и (2.88) в уравнение (2.86) и преобразовывая получаем:

$$\begin{aligned} \sum M_{O1} = & (T_{\text{осев}}^{\text{пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}} - F_{\text{тр1}} + F_{\text{тр2}} + T_{\text{осев}}^{I \text{ пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}}) \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{2}{3} \cdot r_i \operatorname{tg} \theta \right) + \\ & + T_{\text{осев}}^{I \text{ пол}} \cdot \sin \gamma_{\text{в}} \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}. \end{aligned} \quad (2.89)$$

Равнодействующее усилие от одного ролика закручивающее вал  $F_R$  приложенную в точку  $B$  (рисунок 2.19) можно определить по выражению:

$$F_R = \frac{\sum M_{O1}}{AB}. \quad (2.90)$$

$$\begin{aligned} F_R = & \frac{(T_{\text{осев}}^{\text{пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}} - F_{\text{тр1}} + F_{\text{тр2}} + T_{\text{осев}}^{I \text{ пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}}) \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{2}{3} \cdot r_i \operatorname{tg} \theta \right) + T_{\text{осев}}^{I \text{ пол}} \cdot \sin \gamma_{\text{в}} \cdot \frac{1}{3} \cdot \sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}}{\sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}} \\ F_R = & \frac{(T_{\text{осев}}^{\text{пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}} - F_{\text{тр1}} + F_{\text{тр2}} + T_{\text{осев}}^{I \text{ пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}}) \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{2}{3} \cdot r_i \operatorname{tg} \theta \right)}{\sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}} + \frac{1}{3} \cdot T_{\text{осев}}^{I \text{ пол}} \cdot \sin \gamma_{\text{в}}. \end{aligned} \quad (2.91)$$

Крутящий момент от накатной головки будет складываться от моментов всех накатных роликов в шлиценакатной головке (рисунок 2.15 и 2.21).

$$\sum M_{\phi} = n(M_o + M_p), \quad (2.92)$$

где  $M_O$  – момент создаваемый перекосом накатного ролика, Н·м;  $M_p$  – момент создаваемый боковым смещением накатного ролика (рисунок 2.21), Н·м;  $n$  – количество накатных роликов в фильере, шт.

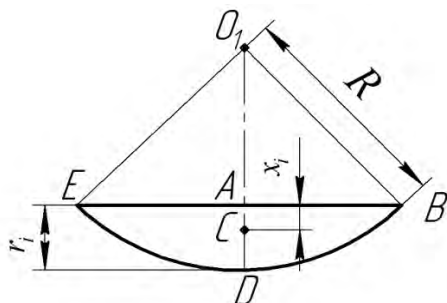


Рисунок 2.18 – Площадь контакта со стороны действия силы  $T_{осев}^{рол}$ :  
 $x_i = 1/3 r_i$ ;  $y_i = 0$

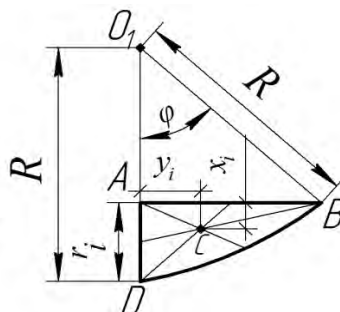


Рисунок 2.19 – Площадь контакта со стороны действия силы  $T_{осев}^{I рол}$ :  
 $x_i = 1/3 r_i$ ;  $y_i = 1/3 AB$

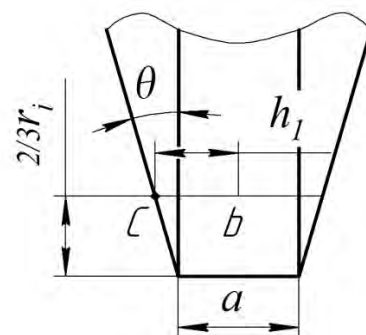


Рисунок 2.20 – Схема расположения точки приложения сил на рабочем профиле ролика

Из рисунка 2.15 момент создаваемый перекосом накатного ролика определим по выражению:

$$M_O = F_R \cdot r_a \cdot \cos \theta, \quad (2.93)$$

где  $F_R$  – равнодействующее усилие от одного ролика, Н;  $r_a$  – радиус вала по вершине зуба, м.

Из рисунка 2.21 момент создаваемый боковым смещением накатного ролика определим по выражению:

$$M_p = n \cdot T_i \cdot h, \quad (2.94)$$

где  $T_i$  – нормальная реакция, Н;  $h$  – отклонение накатного ролика от центра вала создаваемое углом  $\gamma_p$ , м,  $h = (r_a - r_i + R) \tan \gamma_p$  (рисунок 2.21).

$$T_i = \frac{T_{осев}^{рол} \cdot \cos \psi}{d_i}, \quad (2.95)$$

где  $\psi$  – угол наклона клина, град (рисунок 2.2).



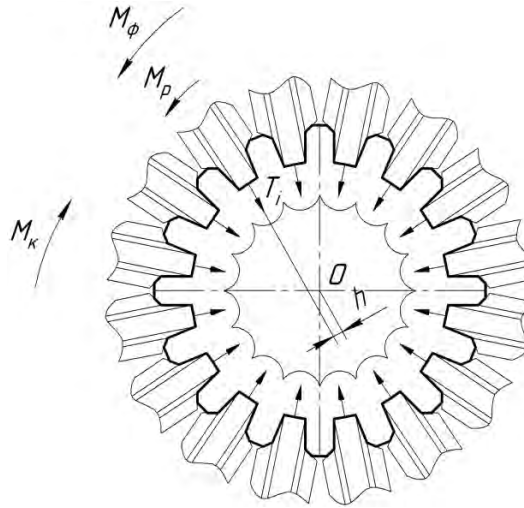


Рисунок 2.21 – Схема к расчёту момента закручивания шлицевого вала накатной головки

Подставляя уравнения (2.93), (2.94), (2.95), (2.91) и (2.89) в уравнение (2.92) имеем:

$$\sum M_{\phi} = n \left[ \left( \frac{(T_{\text{осев}}^{\text{пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}} - F_{\text{тр1}} + F_{\text{тр2}} + T_{\text{осев}}^{\text{пол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}}) \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{2}{3} r_i \tan \theta \right)}{\sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}} + \frac{1}{3} \cdot T_{\text{осев}}^{\text{пол}} \cdot \sin \gamma_{\text{в}} \right) \cdot r_a \cdot \cos \theta + n \cdot T_{\text{осев}}^{\text{пол}} \cdot \cos \psi \cdot (r_a - r_i + R) \cdot \tan \gamma_{\text{р}} \right], \quad (2.96)$$

Наиболее полно описывает трение поверхностей без смазочной плёнки пластически недеформированных тел молекулярно-механическая модель сухого трения И. В. Крагельского [1], согласно которой равнодействующая молекулярного и механического взаимодействия контактных поверхностей:

$$F_{\text{тр}} = \xi \cdot S_{\phi} + \mu \cdot N, \quad (2.97)$$

где  $\xi$  – коэффициент молекулярного сцепления;  $S_{\phi}$  – фактическая площадь контакта,  $\text{м}^2$ ;  $\mu$  – коэффициент, учитывающий скорость изменения касательных напряжений при изменении нормальных напряжений;  $N$  – нормальная сила, Н.

Разделив выражение (2.97) на фактическую площадь контакта мы получим:

$$\tau = \xi + \mu \cdot \sigma, \text{ откуда } F_{\text{тр}} = \tau \cdot A_{\text{ABE}(1-3)}, \quad (2.98)$$

где  $\sigma$  – нормальное контактное напряжение, МПа;  $\tau$  – касательные контактное напряжение, МПа;  $A_{\text{ABE}(1-3)}$  – контактная площадь конусной части накатного ролика (со стороны действия силы  $T_{\text{осев}}^{\text{пол}}$ ),  $\text{м}^2$ .

С учётом (2.98) и рисунка 2.21, выражение (2.96) примет вид [114]:

$$\Sigma M_{\phi} = n \left[ \left( \frac{(T_{\text{осев}}^{\text{рол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}} - \tau_{\text{xy1}} \cdot A_{\text{ABE}(1-3)}^I + \tau_{\text{xy2}} \cdot A_{\text{ABE}(1-3)} + T_{\text{осев}}^{\text{рол}} \cdot \cos \gamma_{\text{в}}) \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{2}{3} r_i \tan \theta \right)}{\sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}} + \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{3} \cdot T_{\text{осев}}^{\text{рол}} \cdot \sin \gamma_{\text{в}} \right) \cdot r_a \cdot \cos \theta + n \cdot T_{\text{осев}}^{\text{рол}} \cdot \cos \psi \cdot (r_a - r_i + R) \cdot \tan \gamma_{\text{р}} \right], \quad (2.99)$$

где  $A_{\text{ABE}(1-3)}^I$  – площадь пятна контакта со стороны действия силы  $T_{\text{осев}}^{\text{рол}}$ , м<sup>2</sup>.

Таким образом, для того чтобы шлицевый профиль укладывался в поле допуска по ГОСТ 1139-80, необходимо, чтобы момент создаваемый фильерой был меньше или равен допускаемому моменту на валу:

для 8 квалитета точности при  $\gamma_{\text{в}} = 0,029^\circ$ :  $\Sigma M_{\phi} \leq [M_k] = 112,4$  Н/м;

для 7 квалитета точности при  $\gamma_{\text{в}} = 0,017^\circ$ :  $\Sigma M_{\phi} \leq [M_k] = 66,7$  Н/м.

Используя выражение (2.99), принимая  $T_{\text{осев}}^{\text{рол}} = \frac{1}{3} \cdot T_{\text{осев}}^{\text{рол}}, f = 0,16$  и учитывая, что по паспортным данным [110]:  $R = 0,04$  м,  $a = 2,48 \cdot 10^{-3}$  м,  $r_a = 0,038$  м,  $n = 16$  шт.,  $\theta = 11,25^\circ$ ,  $\psi = 2^\circ$ ,  $r_i = 1,075 \cdot 10^{-3}$  м, не трудно оценить осевые усилия приходящие на один накатной ролик  $T_{\text{осев}}^{\text{рол}}$ :

$$T_{\text{осев}}^{\text{рол}} = \frac{[M_k]}{1,1528 \cdot 10^{-5} \cdot \cos \gamma_{\text{в}} + 6,631 \cdot 10^{-2} \cdot \sin \gamma_{\text{в}} + 1,641 \cdot 10^{-2}} \quad (2.100)$$

для 8 квалитета точности при  $\gamma_{\text{в}} = 0,029^\circ$ :  $T_{\text{осев}}^{\text{рол}} = 6828,8$  Н;

для 7 квалитета точности при  $\gamma_{\text{в}} = 0,017^\circ$ :  $T_{\text{осев}}^{\text{рол}} = 4055,9$  Н.

Для перехода на более точный квалитет при накатывании шлицев на валах необходимо снизить осевые усилия, приходящиеся на один накатной ролик, чтобы они не превышали допустимых значений. Один из путей снижения осевых усилий деформирования – снижение сил трения между заготовкой и накатным роликом нанесением износостойких покрытий на рабочие части накатных роликов с низким коэффициентом трения.

От действия момента закручивания со стороны фильеры и пятнистой твёрдости в заготовке, на накатном ролике возникают изгибающие напряжения способствующие разрушению инструмента в процессе эксплуатации.

От рассчитанного изгибающего момента, действующего на накатной ролик, необходимо оценить изгибающие нормальные и касательные напряжения. Внача-

ле при помощи метода сечений определим внутренние силовые факторы, возникающие в поперечном сечении накатного ролика. После этого на основании принципа независимости действия сил определим нормальные и касательные напряжения. Для этого рассмотрим расчётную схему (рисунок 2.23).

Из схемы (рисунок 2.23) изгибающий момент на ролике  $M_{изг}$  определим по следующему выражению:

$$M_{изг} = T_y \cdot (R - r_i) = T_{осев}^{пол} \cdot (R - r_i) \cdot \sin \gamma_B, \quad (2.101)$$

где  $T_y$  – изгибное усилие, Н;  $\gamma_B$  – угол закручивания, град.

Зная изгибающий момент  $M_{изг}$  на ролике и момент кручения  $M_{O1}$  можно определить нормальные напряжения при изгибе с кручением [36, 40]:

$$\sigma_{и} = \frac{M_{изг} + M_{O1}}{W} = \frac{(M_{изг} + M_{O1})y}{J_x} \leq [\sigma]_{и}, \quad (2.102)$$

где  $W$  – момент сопротивления при изгибе,  $м^3$ ;  $J_x$  – момент инерции сечения относительно нейтральной линии,  $м^4$ ;  $y$  – координата нулевой линии, м.

Момент инерции сечения относительно нейтральной линии [36, 40] определим по рисунку 2.23:

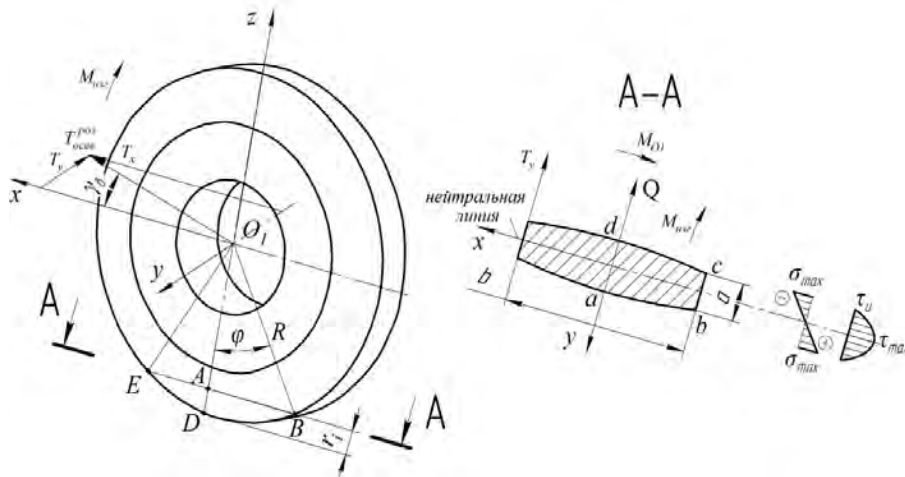


Рисунок 2.23 – Схема действия изгибных усилий и напряжений на накатном ролике

$$J_x = \frac{R^3 \sin^3 \varphi ((2r_i t g \theta + bc)^2 + 4(2r_i t g \theta + bc)bc + bc^2)}{18(2r_i t g \theta + bc)bc} \quad (2.103)$$

Подставляя уравнения (2.89), (2.101) и (2.103) в (2.102) получим:

$$\sigma_u = \frac{9 \cdot T_{осев}^{пол} \cdot a \cdot (2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a)^2 (R - r_i) \cdot \sin \gamma_6}{R^3 \cdot \sin^3 \varphi \cdot ((2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a)^2 + 4 \cdot a \cdot (2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a) + a^2)} +$$

$$+ \frac{(T_{осев}^{пол} \cdot \cos \gamma_6 - \tau_{xy1} \cdot A'_{ABE} + \tau_{xy2} \cdot A_{ABE} + T_{осев}^{пол} \cdot \cos \gamma_6) \cdot \left(\frac{a}{2} + \frac{2}{3} \cdot r_i \cdot tg\theta\right) + \frac{1}{3} T_{осев}^{пол} \cdot \sin \gamma_6 \cdot \sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}}{R^3 \cdot \sin^3 \varphi \cdot ((2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a)^2 + 4 \cdot a \cdot (2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a) + a^2)} \leq [\sigma]_u \quad (2.104)$$

Для определения касательных напряжений, рассмотрим формулу Журавского [40]:

$$\tau = \frac{Q_y \cdot S_x}{b \cdot J_x}, \quad (2.105)$$

где  $Q_y$  – абсолютная величина поперечной силы в сечении, где вычисляются касательные напряжения, Н;  $S_x$  – абсолютная величина статического момента относительно нейтральной линии, м<sup>3</sup>;  $b$  – ширина сечения на уровне, где определяют, м.

Абсолютная величина статического момента относительно нейтральной линии [40] определяется по рисунку 2.23:

$$S_x = A \frac{ad}{2} = \frac{R \cdot \sin \varphi (bc + r_i tg\theta)(bc + 2r_i tg\theta)}{2}, \quad (2.106)$$

где  $A$  – площадь сечения, м<sup>2</sup>.

$$Q_y = T_{осев}^{пол} \cdot \sin \gamma. \quad (2.107)$$

Подставляя уравнения (2.106) и (2.107) в уравнение (2.105) получим:

$$\tau_u = \frac{9 \cdot T_{осев}^{пол} \cdot a \cdot (a + r_i \cdot tg\theta)(2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a) \cdot \sin \gamma}{R^3 \cdot \sin^3 \varphi \cdot ((2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a)^2 + 4 \cdot a \cdot (2 \cdot r_i \cdot tg\theta + a) + a^2)} \leq [\tau]_u, \quad (2.108)$$

Таким образом, по выражениям (2.104) и (2.108) можно оценить нормальные и касательные изгибные напряжения, действующие на накатные ролики при накатывании шлицевых профилей на валах.

## 2.5 Влияние размеров накатного ролика и заготовки на долговечность инструмента

При установившемся процессе накатывания шлицевых профилей, нормальные и касательные напряжения действуют на металл по всей дуге захвата, а кон-

тактные силы трения в начале и в конце дуги захвата имеют противоположные направление. Таким образом, сечение в котором контактные силы трения изменяют направление, называют нейтральным, а угол называют нейтральным углом  $\gamma_n$ .

Для определения угла  $\gamma_n$  и анализа условий движения металла составляем уравнение равновесия на ось  $x$  (рисунок 2.24).

$$\sum x = -F_{пол} \cdot \sin \alpha_x \cdot R d\alpha_x + \tau_x \cdot \cos \alpha_x \cdot R d\alpha_x - \tau_x \cdot \cos \alpha_x \cdot R d\alpha_x + \frac{(T_1 - T_0)}{2 \cdot d_{вн}} = 0. \quad (2.109)$$

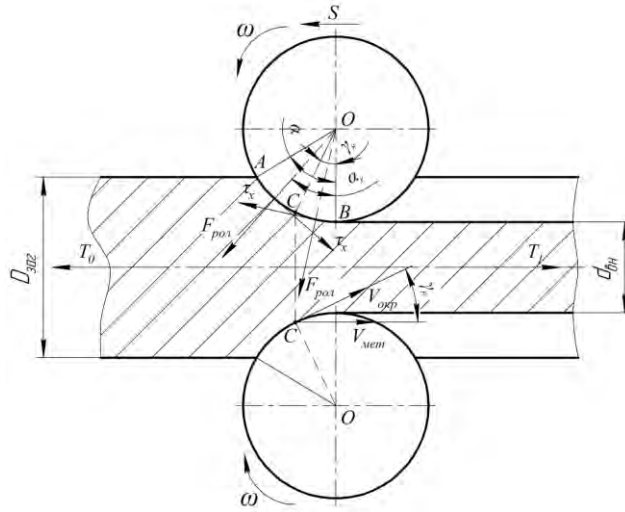


Рисунок 2.24 – Расчётная схема действующих сил при накатывании  
Продифференцируем по углу захвата  $\alpha$  и приняв  $T_1 = T_0 = 0$  получим:

$$-\int_0^{\alpha} F_{пол} \cdot \sin \alpha_x \cdot R d\alpha_x + \int_{\gamma_n}^{\alpha} \tau_x \cdot \cos \alpha_x \cdot R d\alpha_x - \int_0^{\gamma_n} \tau_x \cdot \cos \alpha_x \cdot R d\alpha_x = 0$$

$$F_{пол} \cdot R \cdot \cos \alpha_x \Big|_0^{\alpha} + \tau_x \cdot R \cdot \sin \alpha_x \Big|_{\gamma_n}^{\alpha} - \tau_x \cdot R \cdot \sin \alpha_x \Big|_0^{\gamma_n} = 0$$

$$R \left[ F_{пол} \cdot (\cos \alpha - \cos 0) + \tau_x \cdot (\sin \alpha - \sin \gamma_n) - \tau_x \cdot (\sin \gamma_n - \sin 0) \right] = 0$$

$$R \left[ F_{пол} \cdot (\cos \alpha - 1) + \tau_x \cdot (\sin \alpha - \sin \gamma_n - \sin \gamma_n) \right] = 0$$

$$R \left[ F_{пол} \cdot (\cos \alpha - 1) + \tau_x \cdot (\sin \alpha - 2 \sin \gamma_n) \right] = 0$$

$$R \neq 0, \text{ тогда } F_{пол} \cdot (\cos \alpha - 1) + \tau_x \cdot (\sin \alpha - 2 \sin \gamma_n) = 0$$

$$F_{пол} \cdot (\cos \alpha - 1) = -\tau_x \cdot (\sin \alpha - 2 \sin \gamma_n)$$

$$\frac{F_{пол}}{\tau_x} \cdot (\cos \alpha - 1) = 2 \sin \gamma_n - \sin \alpha$$

Приняв  $\tau_x = \mu \cdot F_{пол}$  получим:

$$\begin{aligned} \frac{F_{пол}}{\mu \cdot F_{пол}} \cdot (\cos \alpha - 1) &= 2 \sin \gamma_n - \sin \alpha \\ 0,5 \cdot \left( \frac{\cos \alpha - 1}{\mu} + \sin \alpha \right) &= \sin \gamma_i \\ \sin \gamma_i &= 0,5 \cdot \sin \alpha + \frac{\cos \alpha - 1}{2\mu} \\ \sin \gamma_i &= 0,5 \cdot \sin \alpha - \frac{1 - \cos \alpha}{2\mu}. \end{aligned} \quad (2.110)$$

Выражение (2.110) формула Экелунда [115].

При  $\gamma_n = 0$  угол захвата достигает теоретического максимума:

$$\begin{aligned} 0,5 \sin \alpha_{\max} &= \frac{1 - \cos \alpha_{\max}}{2\mu} \quad \text{или} \quad \frac{1}{\mu} \cdot 2 \sin^2 \frac{\alpha_{\max}}{2} = 2 \sin \frac{\alpha_{\max}}{2} \cdot \cos \frac{\alpha_{\max}}{2}; \quad \frac{1}{\mu} \sin \frac{\alpha_{\max}}{2} = \cos \frac{\alpha_{\max}}{2} \\ \mu &= \frac{\sin \frac{\alpha}{2}}{\cos \frac{\alpha}{2}} \Rightarrow \mu = \operatorname{tg} \frac{\alpha_{\max}}{2}. \end{aligned} \quad (2.111)$$

На основании изложенного при  $F_{пол} = \text{const}$ ,  $\tau_x = \mu \cdot F_{пол} = \text{const}$  и  $T_0 = T_l = 0$ .

$$\alpha_{\max} = 2\varphi, \quad (2.112)$$

где  $\varphi$  – угол трения.

Учитывая, что угол захвата  $\alpha \leq 13^\circ$ , а  $\cos \alpha$  этого угла практически равен единицы, то вторая часть уравнения Экелунда равна нулю и формула приобретает вид:

$$\sin \gamma_i = 0,5 \cdot \sin \alpha \Rightarrow \gamma_i = \frac{\alpha}{2}. \quad (2.113)$$

С целью уточнения расположения нейтрального угла на конусной части накатного ролика, необходимо сравнить окружную скорость накатного ролика со скоростью перемещения деформируемого металла.

Для определения окружных скоростей рассмотрим рисунок 2.25.

Рассчитаем время деформации заготовки  $t_{деф.}$  по формуле:

$$t_{деф.} = t_{пол.} - t_{х.х.}, \quad (2.114)$$

где  $t_{пол.}$  – полное время движения фильеры, с;  $t_{х.х.}$  – время движения фильеры к заготовке (холостого хода), с.

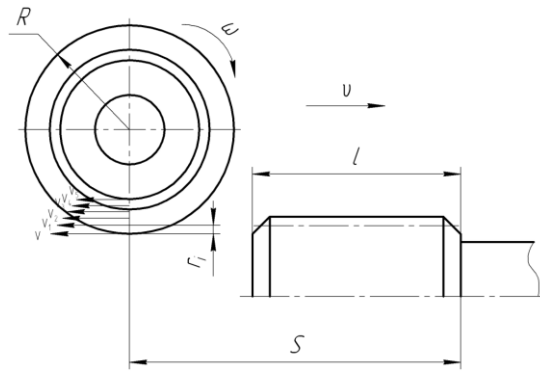


Рисунок 2.25 – Расчётная схема определения окружных скоростей

Для определения времени холостого хода  $t_{x.x.}$  необходимо рассчитать путь холостого хода фильеры  $S_{x.x.}$

$$S_{x.x.} = S_n - l_i, \quad (2.115)$$

где  $S_n$  – полный путь движения фильеры, м;  $l_i$  – длина деформируемой части заготовки на каждом проходе, м.

В процессе накатывания заготовка увеличивает длину от 12 до 14 мм, следовательно, увеличение длины после одного прохода в среднем составляет:

$$\Delta l_{прох.} = \frac{(12...14)}{5} = 2,4...2,8.$$

Полное время деформирования рассчитываем по формуле:

$$t_{пол.} = \frac{S_n}{v_{cp}}, \quad (2.116)$$

где  $v_{cp}$  – средняя скорость движения фильеры, м/с.

Время холостого хода рассчитываем по формуле:

$$t_{x.x.} = \frac{S_{x.x.}}{v_{cp}}. \quad (2.117)$$

Длина окружности деформирующего инструмента (ролика) вычисляется по формуле:

$$l_{рол} = 2 \cdot \pi \cdot R. \quad (2.118)$$

Рассчитаем число оборотов деформирующего инструмента (ролика), которое он совершает во время деформирования заготовки:

$$n = \frac{l_i}{t_{деф.} \cdot l_{рол}}. \quad (2.119)$$

Окружная скорость деформирующего инструмента (ролика) для каждого прохода вычисляется по формуле:

$$V_i = 2 \cdot \pi \cdot n_i \cdot R_i, \quad (2.120)$$

где  $R_i$  – радиус деформирующего инструмента (ролика) зависящий от глубины внедрения ролика, м.

$$R_i = R - r_i. \quad (2.121)$$

Подставляя уравнение (2.119), (2.121), (2.118), (2.114), (2.116) и (2.117) в уравнение (2.120) после преобразований окончательно получаем выражение для определения окружной скорости деформирующего инструмента (ролика):

$$V_i = v_{cp} \cdot \left(1 - \frac{r_i}{R}\right). \quad (2.122)$$

Определим количество накатанных деталей  $N$  при которых ролик займёт первоначальное положение, совершив один оборот по рисунку 2.26.

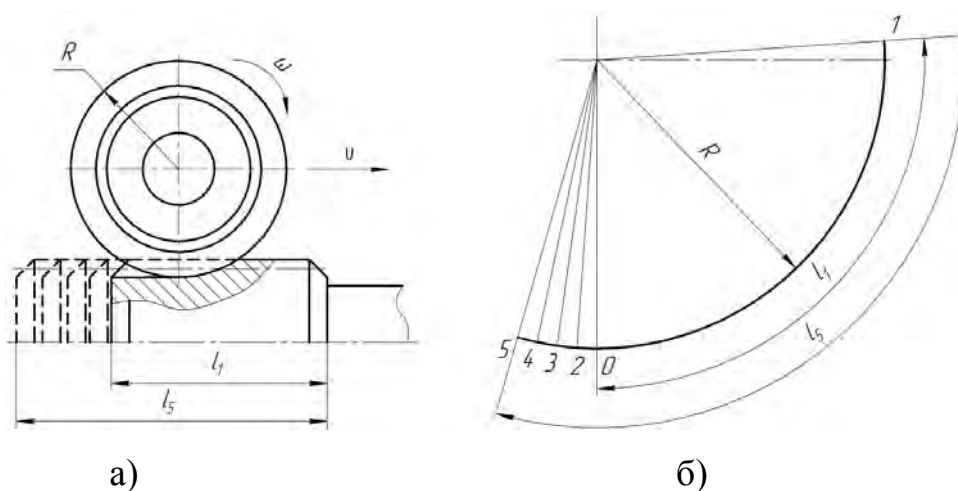


Рисунок 2.26 – К расчёту числа циклов накатного ролика:

а) попоходное удлинение заготовки; б) попоходная дуга захвата ролика

$$n_i = \frac{l_i}{l_{пол}}, \quad (2.123)$$

где  $n_i$  – количество оборотов совершаемое роликом при  $i$  проходе.

При накатывании одной детали ролик провернётся на  $n^l$ :

$$n^l = n_5 - n_1. \quad (2.124)$$



Для определения количества накатанных деталей  $N$  до возвращения ролика в исходное положение необходимо:

$$N = \frac{1}{n^I} \quad (2.125)$$

Подставляя формулы (2.118) и (2.124) в формулу (2.125) имеем:

$$N = \frac{l_{\text{рол}}}{l_5 - l_1} = \frac{0,251}{0,0767 - 0,0655} = \frac{0,251}{0,011} = 25 \text{ деталей.}$$

При средней накатке в 6000 деталей, количество циклов совпадений будет равно 240. Т. е. ролик выдерживает в среднем 240 совпадающих повторений нагружения.

Расчёт осевых скоростей движения металла в заготовке рассчитаем по изменению угла наклона фаски в процессе накатывания шлиц. Т. к. в процессе накатывания шлиц послойное движение металла неодинаковое, то на детали появляются волны деформирования на разном расстоянии друг от друга, а угол фаски имеет разное значение.

Рассчитаем фактическое значение отставания верхней части металла заготовки от сердцевин  $P$  за шесть проходов:

$$P = c_d - c_3, \quad (2.126)$$

где  $c_d$  – длина конической части детали, м;  $c_3$  – длина конической части заготовки, м.

Определим истинное значение смещения металла за один проход:

$$M_i = k_i - m_i, \quad (2.127)$$

где  $k_i$  – попоходное расстояние расположения волн деформаций на детали после накатки, м;  $m_i$  – попоходное расстояние расположения точек волн деформаций на заготовке до накатки, м.

Определим попоходное расстояние расположения точек волн деформаций на заготовке до накатки  $m_i$ , рассмотрев рисунок 2.27,а.

Из прямоугольного треугольника ABC вычислим попоходное расстояние расположения точек волн деформаций на заготовке  $m_i$ :

$$m_i = \frac{2 \cdot r_i^{II} \cdot c_3}{D_2 - D_1}, \quad (2.128)$$

где  $D_1$  – диаметр фаски, м;  $D_2$  – наибольший диаметр заготовки, м.

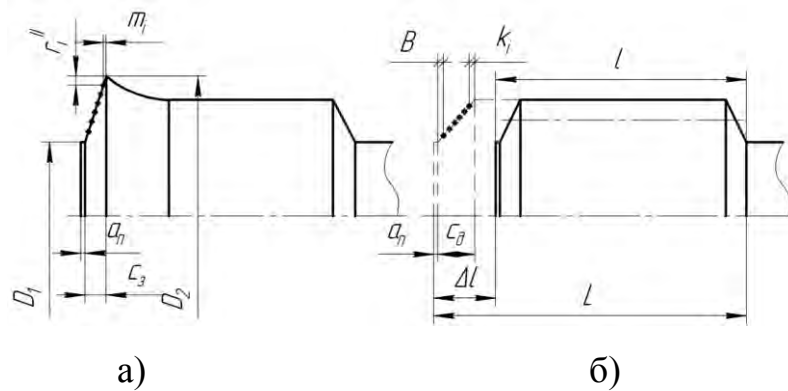


Рисунок 2.27 – Схема расположения волн деформирования:

а) до накатки; б) после накатки

Рассмотрим данный конус как треугольник ABC рисунок 2.28.

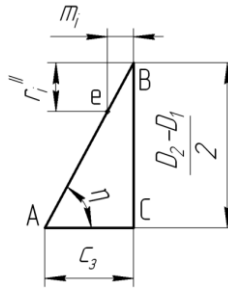


Рисунок 2.28 – Расчётная схема расположения точек волн на заготовке

Определим перемещение верхних слоёв металла в заготовке при накатывании шлиц:

$$\Delta l_i = \Delta l - M_i, \quad (2.129)$$

где  $\Delta l$  – смещение сердцевин в процессе накатывания шлиц, м.

Подставляем уравнение (2.127) и (2.128) в уравнение (2.129) получаем:

$$\Delta l_i = \Delta l - \left( k_i - \frac{2 \cdot r_i'' \cdot c_3}{D_2 - D_1} \right). \quad (2.130)$$

Рассчитываем скорость течения верхних слоёв металла в заготовке при накатывании шлиц:

$$v_{мет} = \frac{\Delta l_i}{t_{деф}}. \quad (2.131)$$

Подставляем уравнение (2.130) и (2.114) в уравнение (2.131) преобразовав, получаем:

$$v_{мет} = \frac{v_{cp} \left[ \Delta l - \left( k_i - \frac{2 \cdot r_i'' \cdot c_3}{D_2 - D_1} \right) \right]}{S - S_{x.x.}}. \quad (2.132)$$

При продольном накатывании шлицев на валах течение металла происходит в двух направлениях: радиальном и осевом. Количественное распределение перемещающегося металла в этих направлениях зависит от многих факторов и, в частности, от величины относительной деформации металла за один проход деформирующих инструментов (роликов), схемы деформирования, отношения диаметра заготовки к диаметру накатного ролика, коэффициента замкнутости контура и т. д. [47].

Процесс продольного накатывания шлицев характеризуется большой неравномерностью деформации, обусловленной внешними зонами сложной конфигурации и силами контактного трения, а также сложностью очага деформации. На неравномерное распределение деформации по объёму деформируемого тела влияет, прежде всего, величина и закономерности изменения течения металла по накатанной поверхности, кинематику которого, в свою очередь, изменяет контактное трение.

В продольном сечении заготовки характер течения металла в очаге деформации можно рассмотреть в четырёх зонах (рисунок 2.29).

Деформация определённого объёма металла заготовки начинается на некотором расстоянии от места входов роликов в металл (в очаг деформации). При дальнейшем внедрении роликов в заготовку частицы металла, находящиеся вблизи роликов, начинают выпучиваться и перемещаться в направлении движения роликов. Такое течение металла происходит в зоне  $AB$ .

При дальнейшем внедрении ролик вступает в непосредственный контакт с заготовкой в точке  $B$ , и с этого момента свободному перемещению металла начинает препятствовать торможение, так как направление течения металла и вращение ролика не совпадают и металл проскальзывает по поверхности ролика.

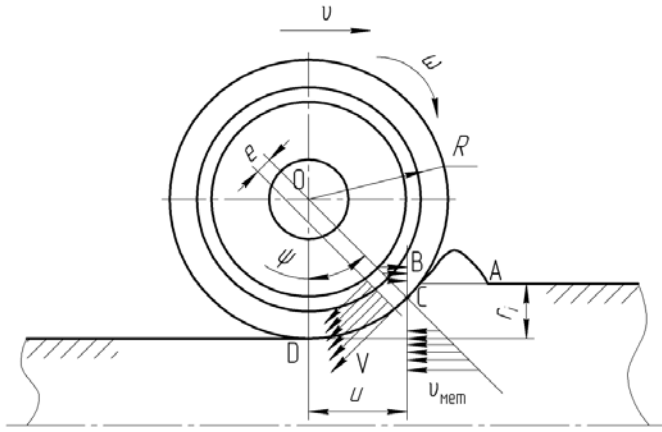


Рисунок 2.29 – Схема определения точки равенства скоростей

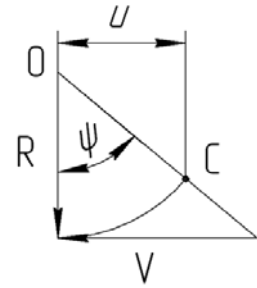


Рисунок 2.30 – Расчётная схема для определения угла  $\psi$

С ростом площади контакта ролика с заготовкой увеличивается сопротивление проскальзыванию, поэтому скорость проскальзывания от точки  $B$  к точке  $C$  постепенно снижается. В точке  $C$  скорость перемещения металла равняется окружной скорости роликов, поэтому условную плоскость, проходящую через точку  $C$ , называют нейтральной плоскостью трения. Зона  $BC$  называется зоной скольжения, или отставания. За зоной отставания начинается зона опережения  $CD$ . В этой точке постепенно увеличивается скорость движения металла, так как течение металла и вращение роликов происходят в одном направлении.

Из рисунка 2.30 найдём угол  $\psi$ :

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{V}{R}, \text{ откуда } \psi = \operatorname{arctg} \left( \frac{V}{R} \right), \quad (2.133)$$

в свою очередь:

$$\omega = \frac{V}{R} = 2 \cdot \pi \cdot n. \quad (2.134)$$

Подставляем уравнение (2.134) в (2.133) и получаем:

$$\psi = \operatorname{arctg} (2 \cdot \pi \cdot n). \quad (2.135)$$

Откуда следует, что угол  $\psi$  зависит от частоты вращения ролика и не зависит от его геометрических размеров. С увеличением  $n$ , увеличивается и угол  $\psi$ . Следовательно, чем быстрее вращается ролик, тем больше угол  $\psi$  и на большем расстоянии от оси находится точка равенства скоростей  $C$ .

Выразим угол  $\psi$  через скорость движения фильеры:

$$n = \frac{v}{2 \cdot S}. \quad (2.136)$$

Подставляем уравнение (2.136) в уравнение (2.135) и получаем:

$$\psi = \arctg\left(\frac{v}{2 \cdot S}\right). \quad (2.137)$$

Из формулы (2.137) следует, что при  $S_n = const$  угол  $\psi$  прямо пропорционален скорости фильеры  $v$ . С увеличением скорости фильеры  $v$  угол  $\psi$  увеличивается и наоборот с уменьшением  $v$  угол  $\psi$  уменьшается.

По рисунку 2.30 найдём расстояние на котором расположена точка С от оси ролика.

$$u = R \cdot \sin \psi. \quad (2.138)$$

Подставляем уравнение (2.137) в уравнение (2.138) и получаем:

$$u = R \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{v}{2 \cdot S}\right)\right). \quad (2.139)$$

Следует отметить, что отставание скорости течения металла, от окружной скорости накатного ролика, приводит к проскальзыванию металла по конусной части ролика. В связи с этим происходит смещение центра приложения нагрузки на боковую часть накатного ролика. Это способствует увеличению крутящего момента и возникновению разрывных усилий приводящих к образованию радиальных микротрещин, из-за которых накатной ролик разрушается.

## 2.6 Выводы

1. Рассчитаны погрешности смещения накатного инструмента по допускам сопряжённых деталей в процессе накатывания шлицевых профилей на валах и погрешности биения заходной фаски, диаметра под накатывание относительно опорного торца влияющих на базирование заготовок на станках, относящиеся к статическим погрешностям.

2. Установлено, что в процессе холодного пластического деформирования в пятне контакта от разности скоростей перемещения металла и накатного инстру-

мента, качества обработанных поверхностей накатного инструмента и погрешностей сопряжений шлиценакатной головки, возникают силы внешнего трения, способствующие повышению неоднородности распределения напряжений, деформаций и возникновению моментов сил, отклоняющих накатной инструмент от прямолинейного движения. Это приводит к возникновению отклонений шлицевых профилей, как от параллельности, так и по толщине. Нами предлагается снижение возмущающих усилий деформирования, приводящих к снижению момента закручивания накатной головки, путём снижения внешних сил трения на контактных поверхностях, нанесением плёночных износостойких покрытий с низким коэффициентом трения.

3. Разработана математическая модель фактического значения усилий действующих на контактные конические и цилиндрические поверхности накатного инструмента по действующему давлению в гидросистеме накатного стана 1126 ПС.

4. Разработана математическая модель расчёта площадей контакта рабочего и вспомогательного конуса, цилиндрической поверхности накатного ролика, горизонтальной проекции пятна контакта «инструмент-деталь» при многопроходном холодном деформировании профилей, в которых находятся контактные площади, а также рассчитаны нормальные и касательные напряжения на профилирующих поверхностях накатных роликов при накатывании профилей по фактическим осевым усилиям деформирования.

5. Разработана методика расчёта скоростей перемещения металла при накатывании шлицевых профилей, которые были сопоставлены с окружными скоростями накатного инструмента. По разнице данных скоростей установлено влияние трения в пятне контакта «инструмент-деталь». Также был рассчитан угол нейтрального сечения на цилиндрической части накатного ролика, который показывает, в какой части очага деформирования происходит выравнивание скоростей металла и инструмента и оценены нормальные и касательные изгибные напряжения влекущие к образованию кольцевых трещин на инструменте и последующему выходу его из строя.

### 3 Методика проведения исследований, аппаратура, оборудование

#### 3.1 Инструментальные и обрабатываемые материалы

В качестве инструментального материала использовали ролики 1126.03-009 из быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 19265 – 73) (таблица 3.1), взятые из одной партии.

Таблица 3.1 – Химический состав и физико-механические свойства быстрорежущей стали [70, 116, 117]

| Материал | Содержание элементов, % |         |         |         |         | Твёрдость<br>HRC, не менее |
|----------|-------------------------|---------|---------|---------|---------|----------------------------|
|          | C                       | Cr      | W       | V       | Mo      |                            |
| P6M5     | 0,8–0,88                | 3,8–4,4 | 5,5–6,5 | 1,7–2,1 | 5,0–5,5 | 58                         |

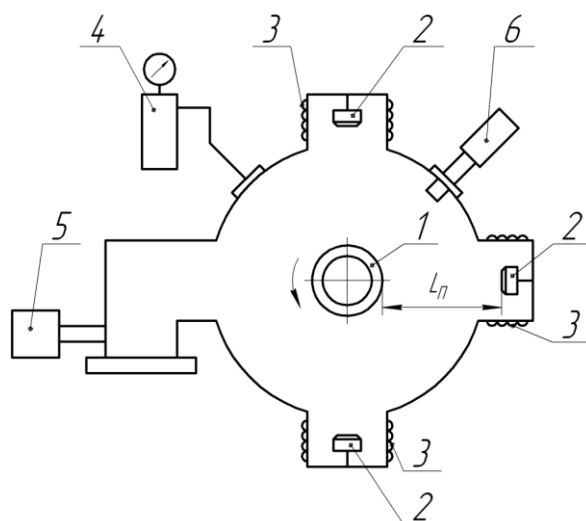
В качестве обрабатываемого материала для стойкостных испытаний использовали заготовки 3171-2201020 из углеродистой конструкционной стали 45 (ГОСТ 1050 – 88) (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Физико-механические свойства обрабатываемого материала [118, 119]

| Обрабатываемый материал | $\sigma_b$ , МПа | $\sigma_t$ , МПа | Твёрдость, НВ | Коэффициент обрабатываемости К |
|-------------------------|------------------|------------------|---------------|--------------------------------|
| 45                      | 600              | 350              | 156-207       | 1                              |

#### 3.2 Оборудование для нанесения покрытий

Нанесение покрытий производили на серийной вакуумно-плазменной установке типа «Булат-6», оснащённой системой магнитной фокусировки плазменного потока (рисунок 3.1). Ролики устанавливались в оправку, которая вращалась с частотой 8 мин<sup>-1</sup>, что обеспечивало равномерный прогрев инструмента.



1 – образец; 2 – катоды; 3 – фокусирующие катушки; 4 – система подачи реакционного газа в камеру; 5 – вакуумные насосы; 6 – пирометр

Рисунок 3.1 – Компоновочная схема установки «Булат-6»

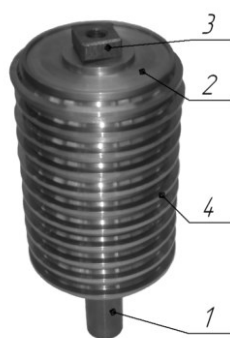
Технологический процесс подготовки поверхностей роликов включал следующие этапы: предварительную очистку в бензине Б-70 или ацетоне; ультразвуковую очистку в установке УЗУ-0,25 с использованием водной эмульсии на основе препарата КМ-1 с концентрацией от 60 до 80 г/л при температуре от 60 до 80 °С в течении 15-20 мин; промывку в дистиллированной воде; протирку бязью, смоченной в этиловом спирте; сушку в сушильном шкафу при температуре от 120 до 140 °С в течении 15-20 мин. После размещения роликов в камере установки проводили ионную очистку в режиме: остаточное давление  $p_0 = 6,65 \cdot 10^{-3}$  Па, ток дуги  $I_d = 100$  А, ток фокусирующей катушки  $I_\phi = 0,3$  А, напряжение  $U_{оп} = 1100$  В, время ионной очистки  $\tau_0 = 10$  мин при температуре 560 °С. Процесс конденсации покрытий протекал при давлении  $p_0 = 3,9 \cdot 10^{-1}$  Па, температура роликов была в пределах от 280 до 400 °С в зависимости от требований к технологическому процессу нанесения покрытий. После конденсации покрытия и отключения электродуговых испарителей и подачи газа производили выдержку деформирующего инструмента с покрытием при высоком вакууме. При снижении температуры деформирующего инструмента до 150-200 °С осуществляли напуск воздуха и извлечение роликов из камеры установки [120].



Измерение температуры производили бесконтактным способом с помощью оптического инфракрасного пирометра ЯЗЧ-51, разработанного в ХФТИ АН Украины, а также оптическим микропирометром ВИМП-015М (ЛОМО) [120].

В качестве реакционного газа при конденсации покрытий использовались газы и газовые смеси на основе азота (ГОСТ 9293-74) и ацетилена (ГОСТ 5457-75). При напылении покрытий на основе карбонитридов содержание ацетилена в смеси газов варьировалось от 15 до 30 %. В качестве материалов для катодов испарителей был использован материал: титановый сплав ВТ1-0.

Для крепления деформирующего инструмента в камере установки была изготовлена оправка из стали 20Х13. Оправка для закрепления деформирующего инструмента (ролика) при нанесении покрытий защищена патентом на полезную модель [121]. Данная оправка способна одновременно крепить до 11 роликов. Оправка (рисунок 3.2) состоит из оси 1, 12 оригинальных шайб необходимых как для разграничения инструмента между собой, так и скрывает нерабочих поверхностей инструмента от попадания покрытий 2 и гайки 3 не обходимой для зажима инструмента (приложение А).



1 – ось оправки; 2 – шайба; 3 – гайка; 4 – ролик

Рисунок 3.2 – Оправка для нанесения покрытий на ролики

Оправка в камеру устанавливается в вертикальном положении, таким образом, чтобы рабочая поверхность роликов была перпендикулярна катодам. Крепление оправки осуществляется за счёт резьбовой части в основании оси. Перед нанесением покрытий, оправка проходит все стадии очистки вместе с деформирующим инструментом (роликом). Применение данной оправки позволяет равно-

мерно наносить слой покрытия на рабочую часть деформирующего инструмента (ролика), а так же предохранять от ионного потока боковые поверхности инструмента не допустимые для нанесения покрытий по технологическим параметрам.

Толщина получаемых покрытий на инструменте измерялась по образующей ступеньке с помощью профилографа-профилометра модели К-202 завода «Калибр».

В эксперименте использовали однослойные покрытия на основе материалов: нитрид титана  $TiN$ , нитрид титана циркония  $TiZrN$  и карбонитрид титана  $TiCN$ . Толщина покрытий варьировалась в пределах от 2 до 6 мкм.

### **3.3 Исследование параметров структуры и свойств покрытий**

При исследовании структуры покрытий использовали стандартные методы.

Структурные исследования образцов с покрытиями проводили методами рентгеновской дифрактометрии. Исследование дефектов кристаллического строения методами рентгеновской дифрактометрии опирается на теорию рассеивания рентгеновских лучей в деформированных кристаллах [122]. В результате происходит перераспределение интенсивности лучей, что в свою очередь вызывает размытие и смещение дифракционных максимумов и изменение их интенсивности.

Измерение параметров структуры проводили по методике, изложенной в работе [123], на дифрактометре «ДРОН-3М» с использованием фильтрованного  $Cu_{K\alpha}$ -излучения. С целью повышения контрастности рентгеновских линий и снижения фона от флуоресцентного излучения применяли пирографитовый монохроматор на выходном пучке. Для получения узких главных интерференционных максимумов проводили специальный подбор щелей источника излучения и счётчика. Управление дифрактометром «ДРОН-3М», а также обработка результатов рентгеновской съёмки осуществляли с помощью ЭВМ IBM PC.

В качестве исследуемых параметров кристаллической структуры были выбраны:

- период кристаллической решётки  $a$ ;
- показатель текстурированности – отношение интенсивностей рентгеновских линий  $J_{111} / J_{200}$ ;
- истинное физическое уширение рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , характеризующее степень дефектности структуры покрытия;
- остаточные напряжения первого рода  $\sigma_0$ .

Определение остаточных напряжений проводили методом  $\sin^2\psi$  в фильтрованном  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучением [124]. В качестве параметров, определяющих механические свойства покрытий, использовали микротвёрдость, модуль Юнга, прочность сцепления с основой, коэффициент трещиностойкости и коэффициент сцепления покрытия с подложкой.

Микротвёрдость полученных износостойких покрытий измеряли на приборе ПМТ-3 [124, 125]. Использовался метод определения микротвёрдости по восстановленному отпечатку. Перед проведением измерений производилась локальная подполировка поверхности алмазными пастами и обезжиривание роликов спиртом. Для обеспечения перпендикулярности поверхности ролика к оси индентора ролик устанавливался на оригинальную подставку (рисунок 3.3) при помощи магнитиков. Подставка имеет шарнир, при помощи которого можно установить нужный угол измеряемой поверхности к оси индентора. Инструмент при помощи магнита крепится к подвижной плоскости. Неподвижная плоскость (основание)



1 – неподвижная плоскость (основание); 2 – подвижная плоскость; 3 – шарнир;  
4 – ролик

Рисунок 3.3 – Подставка крепления деформирующего инструмента (ролика)  
в заданном положении

закрепляется на столик ПМТ-3 и осуществляется индентирование с выдержкой от 12 до 15 с. После снятия нагрузки и удаления индентора измеряли параметры оставшегося отпечатка, по которым определяли величину микротвёрдости.

Значение микротвёрдости вычисляли по формуле:

$$H_{\mu} = \frac{1,854 \cdot P}{d^2}, \quad (3.1)$$

где  $P$  – нормальная нагрузка, приложенная к алмазному наконечнику;  $d$  – среднее арифметическое значение длин обеих диагоналей квадратного отпечатка.

Для определения модуля Юнга износостойких покрытий использовали методику, предложенную в работах [126-128] для хрупких тонкоплёночных материалов. Методика основана на внедрении в исследуемый материал алмазного индентора Кнупа ромбической формы на микротвердомере ПМТ-3 при нагрузке 2,6 Н. При этом глубина внедрения индентора во всех случаях составляла менее 2,5 мкм, то есть сплошность покрытия не нарушалась. Перед проведением измерений производили локальную подполировку поверхности алмазными пастами и обезжиривание пластин спиртом. Расчёт модуля упругости определяли по формуле:

$$E = \frac{H_{\mu} \cdot \alpha}{\frac{b_1}{d_1} - \frac{b}{d}}, \quad (3.2)$$

где  $H_{\mu}$  – микротвёрдость по Кнупу, ГПа;  $\alpha$  – безразмерный коэффициент ( $\alpha = 0,45$ );  $b_1$ ,  $b$  – малая диагональ отпечатка пирамиды Кнупа соответственно на свинцовом образце и на исследуемом образце;  $d_1$ ,  $d$  – большая диагональ отпечатка (рисунок 3.4)

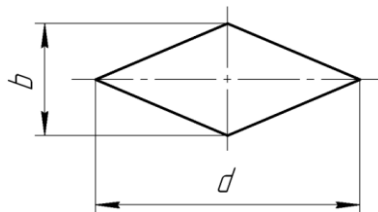


Рисунок 3.4 – Схема определения длин диагоналей

Микротвёрдость по Кнупу определяли по формуле:

$$H_{\mu} = \frac{12,89 \cdot P}{d^2}. \quad (3.3)$$

По данным работы [128] отношение длин диагоналей для свинца постоянное и может быть принято равным 0,1406.

Прочность сцепления покрытия с инструментальной основой оценивали методом вдавливания алмазного конического индентора (конус Роквелла) с использованием твердомера ТК-2М при нагрузке 1000 Н. Прочность сцепления определяли по коэффициенту отслоения [4]:

$$K_0 = \frac{S_0}{S_l}, \quad (3.4)$$

где  $S_0$  – площадь отслоения покрытия вокруг лунки от индентора;  $S_l$  – площадь лунки (рисунок 3.5)

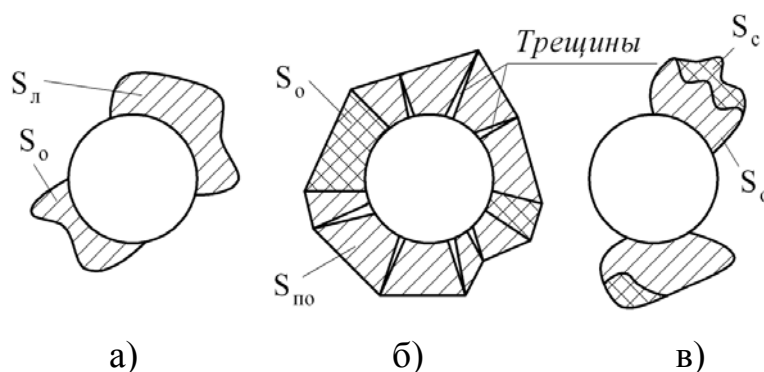


Рисунок 3.5 – Схемы определения коэффициентов отслоения (а), трещиностойкости (б) и сцепления слоёв (в)

Исследования трещиностойкости покрытий и прочности сцепления слоя покрытия с подложкой проводили методом алмазного индентирования на твердомере ТК-2М при нагрузке 1000 Н.

Трещиностойкость покрытий оценивали по коэффициенту трещиностойкости  $K_{тр}$  [15, 16], который определяли как отношение площади разрушенного покрытия  $S_0$  вокруг отпечатка индентора к площади «потенциально возможного отслоения»  $S_{по}$  (площади многоугольника, вершинами которого являются концы радиальных трещин (рисунок 3.5,б)):

$$K_{TP} = \frac{S_0}{S_{no}}, \quad (3.5)$$

где  $S_{no}$  – площадь «потенциально возможного отслоения» (площадь многоугольника, проведённого по вершинам радиальных трещин за вычетом площади лунки).

Прочность сцепления слоя покрытия с подложкой оценивали по коэффициенту сцепления  $K_{cc}$  [129]. Коэффициент  $K_{cc}$  определяли как отношение видимой площади нижележащего слоя к площади отслоения (рисунок 3.6,в):

$$K_{cc} = \frac{S_c}{S_o}, \quad (3.5)$$

где  $S_c$  – видимая площадь слоя покрытия.

Характер разрушения покрытия при определении коэффициентов  $K_0$ ,  $K_{mp}$  и  $K_{cc}$  исследовали по фотографиям образцов, а площадь отслоения покрытия от основы и при расслоении слоёв определяли с помощью оптического микроскопа РМЕ (Германия). Для обработки полученных изображений отпечатков и расчёта площадей  $S_o$ ,  $S_c$ ,  $S_{no}$  использовался пакет прикладных программ Adobe Photoshop 9.0.

### **3.4 Изучение микроструктуры, микротвёрдости и шероховатости накатных роликов**

При подготовке образцов для микроскопического анализа использовали стандартные методы.

Изучение в микроскопе структуры металлов возможно лишь при достаточно интенсивном отражении световых лучей от исследуемой поверхности. Поэтому поверхность образца была специально подготовлена.

Для приготовления шлифа вырезали образец из исследуемого материала и получали на нем плоскую и блестящую поверхность. При отборе образцов в соответствии с основными типами исследований придерживались следующих методов отбора образцов:

1. Производственный контроль. Место вырезки образцов, их размеры и количество определяли требованиями стандартов, технических условий и другой нормативно-технической документации.

2. Исследование причин поломки или дефекта детали. Образцы вырезались как можно ближе к излому или трещине. Для сравнения структуры исследовали также образцы материала с удовлетворительными свойствами.

3. Проведение исследовательской работы, когда место отбора образца определялась её целью.

Образцы получали механическим способом (резка). Влияние наклепа и нагрева при этом можно свести к минимуму, применяя малые подачи и охлаждение.

Наиболее удобная форма образцов для исследования показана на рисунке 3.6. При изготовлении микрошлифов образцы малых размеров, для надежного крепления, помещали в металлические обоймы и заливали эпоксидной смолой (рисунок 3.7).



Рисунок 3.6 – Образцы микрошлифов

При резании нарушается структура поверхностного слоя материала. Глубина нарушенного слоя у металлов достигает десятков доли миллиметра. Для того, чтобы исследовать структуру объекта, необходимо удалять деформированный слой с его поверхности. С этой целью проводили шлифование и полирование образцов.

После полирования микрошлиф промывали водой, затем спиртом и просушивали фильтровальной бумагой.

Изучение микроструктуры начинали с рассмотрения микрошлифа «в нетравленном виде», т. е. непосредственно после полирования, промывки и высушивания. Под микроскопом такой шлиф имеет вид светлого круга, на котором часто можно заметить темные участки (серые или черные), а иногда желтые или другого цвета, небольших размеров. Эти участки являются неметаллическими включениями. Большая часть от них является оксидами, сульфидами, нитридами, силикатами. Для общей характеристики стали по степени зарождения её неметаллическими включениями применяется шкала (ГОСТ 1778-70).

После просмотра нетравленного шлифа для более полного изучения структуры проводили травление шлифа.

Травление проводили методом избирательного растворения фаз. Метод основан на различных физико-химических свойствах отдельных фаз и пограничных участков зерен. В результате различной интенсивности растворения создается рельеф поверхности шлифа. Если освещать шлиф падающим светом, то из-за присутствия косых лучей образуются теневые картины, по которым можно судить о структуре сплава. Меньшей интенсивности отражения света от более сильно протравившихся зерен способствует большее его растворение. Под действием химически активной среды (растворов кислот, солей, щелочей) степень травимости отдельных зерен на поверхности микрошлифа оказывается различной. Световой поток, направленный через объектив на микрошлиф, отражается различно от разных зерен. На участках стыков зерен возникает значительное рассеяние и отраженные лучи не попадают в поле зрения, поэтому по границам зерен возникают темные линии, которые воспроизводят картину действительных стыков между зернами.

Для травления микрошлиф погружали полированной поверхностью в реактив 3...4 % раствор азотной кислоты  $\text{HNO}_3$  и через некоторое время (продолжительность травления зависела от состава изучаемого металла и состава раствора) вынимали; если полированная поверхность становилась слегка матовой, травление считалось законченным и шлиф сразу же промывали водой, затем спиртом и высушивают фильтровальной бумагой.



Измерение микротвёрдости образцов проводили на микротвердомере ПМТ-3. Использовался метод определения микротвёрдости по восстановленному отпечатку. Образец микрошлифа (рисунок 3.6) устанавливался на планке с помощью пластилина. Для обеспечения параллельности поверхности микрошлифа и планки использовался ручной прессик. Планка с образцом микрошлифа устанавливалась на предметный столик микротвердомера и зажималась прижимами. Для получения отпечатка и его измерения, прежде всего проверялась чувствительность нагружаемого механизма и, если она была нарушена, то проводилась её регулировка.

Для того, чтобы отпечаток, получаемый от вдавливания под нагрузкой алмазной пирамиды, располагался приблизительно в центре поля зрения, прибор ПМТ-3 центрировался. При центрировании, после нанесения накола, отпечаток, центровочными винтами центр отпечатка подводится с возможной точностью к центру перекрестия сетки винтового окуляр-микрометра, установленного в нулевое положение.

Число твёрдости определялось по приведённой таблице [130] и по выражению (3.1).

Для фотографирования на микротвердомере ПМТ-3 использовалась видео-насадка DCM310 и ноутбук (рисунок 3.7, 3.8)

Видеонасадку устанавливали в вертикальную насадку и подключали к ноутбуку при помощи USB разъёма и вели наблюдение и фотографирование поверхности микрошлифа.

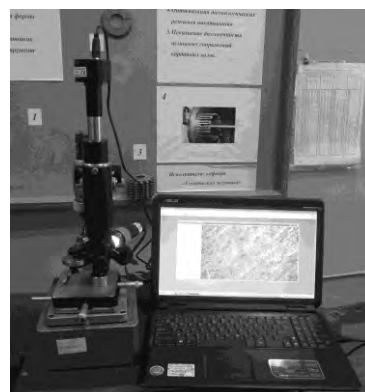


Рисунок 3.7 – Видеонасадка DCM310

Рисунок 3.8 – Вывод изображения с  
микротвердомера ПМТ-3 на дисплей  
ноутбука

Измерение шероховатости поверхности образцов проводили на профилометре модели 130 (рисунок 3.9).



Рисунок 3.9 – Профилометре модели 130

Профилометр модели 130 контактный, степени точности 1 по ГОСТ 19300-86 предназначен для измерения профиля и параметров шероховатости по системе средней линии (ГОСТ 25142-82) в соответствии с диапазонами значений, предусмотренными ГОСТ 2789-73 [131].

Принцип работы профилометра основан на ощупывании алмазной иглою неровностей измеряемой поверхности в процессе её перемещения вдоль измеряемой поверхности и последующем преобразовании возникающих при этом механических колебаний иглы индуктивным датчиком в измеряемые сигналы.

Измеряемый образец (ролик) на подставке (рисунок 3.9) устанавливали на плиту. К измеряемой поверхности подвели датчик закреплённый своим хвостовиком в гнезде движущегося при трассировании штоке привода. При измерении опора датчика скользит по измеряемой поверхности, ощупывая неровности измеряемой поверхности алмазной иглой. Преобразованные перемещения алмазной иглы в аналоговый цифровой сигнал далее обрабатывается в компьютере.

В окне измерения панели управления отображается профиль, который был получен в результате измерения. Параметры шероховатости вычисляются согласно ГОСТ 2789-73 на определённой базовой длине.

### **3.5 Исследование образцов накатных роликов с покрытиями на машине трения**

Для оценки эффективности работы накатного ролика с покрытиями при накатывании шлицевых профилей карданных валов в холодном состоянии, необходимо проведение лабораторных исследований по определению коэффициента трения покрытий и интенсивности их износа.

Для исследования образцов накатных роликов с покрытиями применялась машина трения 2070 СМТ-1, испытания по схеме «колодка-ролик». Машина трения оборудована датчиками, регистрирующими: усилие прижатия колодки к ролику  $F$  (Н), частоту вращения ролика  $n$  ( $\text{мин}^{-1}$ ) и момент трения  $M_{тр}$  (Н·м).

При накатке шлицев на валах в заводских условиях используется индустриальное масло И-20А. В связи с этим целесообразно для проведения эксперимента использовать данный смазочный материал. Обеспечивалась капельная подача масла в зону трения.

Образцы для испытаний изготавливались из материала, аналогичного материалу накатных роликов и шлицевых валов, закаленных до требуемой твёрдости.

Таким образом исследуемые образцы были изготовлены: ролик с внешним диаметром 30 мм из стали 45 (рисунок 3.10) и колодка диаметром 8 мм из стали Р6М5 с контактной поверхностью в виде сферы диаметром 16 мм, как без покрытия, так и с покрытиями (рисунок 3.11). В качестве исследуемых покрытий были выбраны (Ti, Zr)N, TiN, TiCN.



Рисунок 3.10 – Образец ролика Сталь 45      Рисунок 3.11 – Образец колодка Р6М5

Режимы испытаний выбирались, исходя из нагрузок, действующих при накатывании шлицевых профилей на валах в холодном состоянии, а так же скорости деформирования. Время проведения испытания соответствует установившемуся моменту трения. Таким образом, были приняты следующие режимы испытаний:

- твёрдость образца ролика HB 156-207;
- твёрдость образца колодки HRC 58-62;
- усилие прижатия образцов 80-1280 Н;
- частота вращения ролика 27-432 мин<sup>-1</sup>;
- время испытания в одном режиме 5 мин.

### 3.6 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований образцов накатных роликов с покрытиями на машине трения

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований заключалась в определении необходимого числа опытов по доверительной вероятности, оценке точности измерений, существенности различия сравниваемых величин [132-135].

Среднее значение исследуемых параметров определяли по формуле:

$$\overline{X_i} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i, \quad (3.6)$$

где  $n$  – число измерений;  $X_i$  – результат отдельного измерения.

Среднее квадратичное отклонение исследуемого параметра рассчитывали по формуле:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2. \quad (3.7)$$

Точность определения исследуемой величины вычисляли по формуле:

$$\Delta = \frac{\alpha^2}{n} \cdot \left( \frac{\sigma}{\bar{X}_i} \right)^2, \quad (3.8)$$

где  $\alpha$  – параметр доверительного интервала.

Оценку существенности различия полученных значений проводили по критерию Стьюдента:

$$t = \frac{\bar{X}_{i1} - \bar{X}_{i2}}{\sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1 - 1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2 - 1}}}, \quad (3.9)$$

где  $\bar{X}_{i1}, \bar{X}_{i2}$  – средние значения исследуемой величины, полученные в результате измерения в различных условиях;  $n_1, n_2$  – количество опытов.

Полученные значения критерия Стьюдента сравнивали с табличными значениями при разных уровнях значимости. Число степеней свободы  $\nu = n_1 + n_2 - 2 = 10 + 10 - 2 = 18$ . Если  $t > t_{табл}$  при  $P = 0,95$ , то различие является значимым, если  $t < t_{табл}$  – случайным. Если  $t > t_{табл}$  при  $P = 0,99$ , то различие считается весьма значительным, т. е. величины с индексами 1 и 2 имеют существенные различия средних [132, 135].

Коэффициент корреляции определяли по формуле:

$$r = \sqrt{\frac{(y - \bar{y})^2 - \sum (y - \bar{y}_x)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}, \quad (3.10)$$

где  $\sum (y - \bar{y})^2$  – сумма квадратов отклонений индивидуальных значений параметра оптимизации от общей средней арифметической  $\bar{y}$ ;  $\sum (y - \bar{y}_x)^2$  – сумма квадратов отклонений параметра оптимизации в конкретных точках плана эксперимента от частных средних  $\bar{y}_x$ , соответствующих определённым, фиксированным значениям независимых переменных.

Стандартную ошибку коэффициента корреляции определяют по формуле:

$$S_r = \sqrt{\frac{1-r^2}{n-2}}. \quad (3.11)$$

Корреляционное отношение для квадратичной зависимости рассчитывали:

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum (y_x - \bar{y}_x)^2}{\sum (y - \bar{y})^2}}, \quad (3.12)$$

где  $y_x$  – расчётное значение параметра оптимизации получаемое при подстановке значений факторов  $x$  в уравнение регрессии, при переходе от трёхфакторных уравнений к частным двухфакторным, необходимо пересчитывать;  $\bar{y}$  – среднее значение параметра оптимизации;  $y$  – действительные значения параметра оптимизации.

Ошибку критерия существенности корреляционного отношения вычисляли по формуле:

$$S_\eta = \sqrt{\frac{1-\eta^2}{n-2}}, \quad (3.13)$$

где  $n$  – число опытов (число пар значений по которым вычислен выборочный коэффициент корреляции).

Расчётное значение критерия Фишера определяли из отношения дисперсий:

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}, \quad (3.14)$$

где  $s_1^2$  и  $s_2^2$  – дисперсии.

В случае, когда две сравниваемые выборки являются случайными независимыми из общей совокупности с генеральной средней  $\mu$ , то фактическое значение  $F$  не выйдет за определённые пределы и не превысит критическое теоретическое значение критерия  $F$  ( $F_{\text{факт}} > F_{\text{теор}}$ ). Если генеральные параметры сравниваемых групп различны, то  $F_{\text{факт}} < F_{\text{теор}}$ .

Расчётное значение критерия Фишера для квадратичной зависимости определяли по формуле:

$$F = \frac{\eta^2(n-k)}{(1-\eta^2)(k-1)}, \quad (3.15)$$

где  $k$  – число коэффициентов уравнения регрессии.

Расчётное значение критерия критерий Кохрена рассчитывали по формуле:

$$G_p = \frac{S_{max}^2}{\sum S^2}, \quad (3.16)$$

где  $S_{max}^2$  – наибольшее значение из числа рассматриваемых параллельных серий;  $\sum S^2$  – сумма серий дисперсий.

Для математического описания полученных зависимостей использовались методы регрессивного моделирования, включающие в себя в виде процедур метод наименьших квадратов и регрессионный анализ.

Основной задачей планирования эксперимента являлось получение математической модели объекта исследования в виде полинома (уравнения регрессии), второй степени.

Общий вид уравнения регрессии второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_i^m b_i x_i + \sum_{i < j}^m b_{ij} x_i x_j + \sum_i^m b_{ii} x_i^2, \quad (3.17)$$

где  $b_0, b_i, b_j, b_{ij}, b_{ii}$  – коэффициенты регрессии;  $x_i, x_j$  – варьируемые величины;  $m$  – число факторов.

После определения вида поверхностей отклика выполняли их анализ с помощью двумерных сечений. Анализ проводили с закодированными величинами факторов.

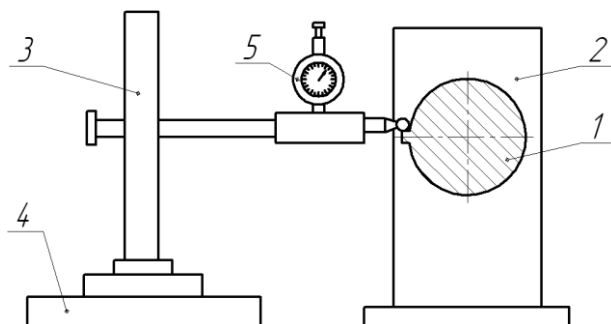
### **3.7 Исследование прямолинейности и толщины шлицевых профилей относительно оси детали**

Замеры точности накатанных валов в реальных условиях осуществляют выборочно. Толщина шлицев « $b$ » измерялась микрометром в двух сечениях вала. Микрометром измеряют в этих же сечениях наружный и внутренний диаметры шлицевого вала ( $d_n$  и  $d_{вн}$ ).

Погрешность направления шлицев, биение ненакатанной части шлицевого вала и шаговую ошибку определяют с помощью индикатора часового типа на специальном приспособлении (рисунок 3.12). Вал с накатанным шлицевым профилем зажимается в центра. К шлицевому профилю подводится индикатор часо-

вого типа и выставляется на нуль. Плавным перемещением индикатора вдоль шлиц снимаются показания его отклонения от прямолинейности.

При анализе точности предполагается, что наладка станка выполнена со всей тщательностью номинальный настроечный размер учитывает средние упругие и температурные деформации системы, а разница ширины шлицев на одной детали – минимальна.



1 – деталь; 2 – стойка с центрами; 3 – штатив; 4 – передвижная платформа;  
5 – индикатор

Рисунок 3.12 – Схема установки для измерения погрешностей шлицев

Если заготовка, накатная головка и средства установки заготовки (группа центров или цанговые зажимы и т. п.) изготовлены абсолютно точно (идеально), то продольная ось заготовки должна совпадать с «идеальной» осью накатной головки. На самом деле и заготовка, и элементы конструкции станка, накатной головки и группы центров – изготавливаются с определенными погрешностями.

За продольную ось заготовки принимают геометрическое место центров тяжести « $O$ » её конкретных поперечных сечений.

За ось симметрии рабочего профиля накатного ролика принимают прямую соединяющую середину оси вращения ролика (ширина ролика  $B_p$ ) и середину хорды  $b_0$  ширина впадины по наружному диаметру ( $d_n$  шлицевого вала).

Положение роликов определяется расположением базирующих поверхностей в корпусе накатной головки. В головках станка 1126 ПС [18] положение накатных роликов определяется точностью изготовления пазов во втулке, вставке



и клине корпуса головки. Центр тяжести многоугольника, образованного пересечением осей симметрии пазов, считается условным центром  $O_y$  накатной головки.

После установки инструмента – центр тяжести многоугольника, образованного пересечением осей симметрии рабочих профилей накатных роликов, – будет реальным центром накатной головки  $O_r$ . Соответственно, оси называются идеальной, условной и реальной, проходящие через указанные центра. Положение этих осей во многом определяет точность накатывания.

#### **4 Повышение долговечности инструмента при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах в холодном состоянии**

##### **4.1 Механизм изнашивания накатных роликов при холодном пластическом деформировании шлицевых профилей на валах**

В процессе накатывания шлицев на валах, причины и виды выхода из строя шлиценакатных роликов отличаются большим разнообразием.

Это разнообразие видов разрушений обуславливается состоянием сложного комплекса, именуемого в общем виде приспособлением «Станок-инструмент-деталь» и включающего в себя марку и состояние стали накатываемого вала, его конструктивные особенности; конструкцию, марку стали и состояние роликов в головке и головки в станке, режимы работы системы в целом.

Для энергосиловой схемы процесса накатывания шлицев в многороликовых головках характерны: большие абсолютные и удельные усилия металла на ролик, величина которых в большинстве случаев превышает 25 кН. Действие таких высоких нагрузок на ролик вызывает в нём напряжения, иногда превосходящие пределы прочности, в результате чего ролик разрушается. В связи с чем, к материалу роликов предъявляются высокие требования по твердости, прокаливаемости и прочности.

К состоянию металла роликов, влияющих на их стойкость, относятся карбидная неоднородность, форма и габаритные размеры роликов, анизотропия механических свойств, качество термической обработки [136-138]. При этом действие масштабного фактора увеличивает зависимость стойкости роликов от структурного состояния металла.

При анализе вышедших из строя роликов были установлены три основных вида разрушений, возникающих вследствие как отдельного, так и совокупного действия указанных выше причин:

1. Сквозные радиальные трещины (рисунок 4.1, 4.2);

2. Угловые поперечные трещины и выкрашивания по режущей кромке ролика (рисунок 4.3);

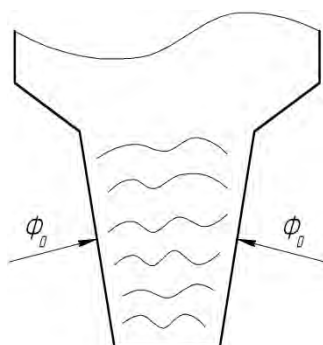
3. Кольцевые отслоения по рабочему профилю ролика (усталостные разрушения) [137] (рисунок 4.4).

Анализ каждого из указанных видов разрушения шлиценакатных роликов приведён ниже.

1. При эксплуатации роликов сквозные радиальные трещины (рисунок 4.1) появляются из-за возникновения в них рабочих напряжений, превышающих предел прочности металла, а также из-за неудовлетворительного структурного состояния металла (значительной карбидной неоднородности, низкого качестваковки и термической обработки). При анализе излома в месте радиальной трещины (рисунок 4.2) было выяснено, что она возникает на поверхности рабочего профиля в местах концентраторов напряжений (выкрашивания, вмятины, локальные прижоги, глубокие риски) и распространяется вглубь в направлении поверхности посадочного отверстия.



а)



б)



Рисунок 4.1 – Разрушение накатного ролика

по сквозной радиальной трещине:

а) сквозная радиальная трещина;

б) расположение карбидной сетки

Рисунок 4.2 – Излом по сквозной радиальной трещине

Радиальные разрушения роликов от поверхностных дефектов (прижогов, глубоких рисков) обычно проявляются в виде прямой трещины, а от выкрашива-

ний и вмятин – в виде нескольких трещин, причем центральная трещина прямая линия, профиль же окаймляющих трещин – ломаные линии.

Необходимо отметить, что выход шлиценакатных роликов из строя из-за радиальных сквозных трещин – явление, отрицательное для процесса накатывания шлицевых валов, и показывает на неотработанность конструкции ролика и технологии изготовления роликов, а также технологического процесса многопроходного накатывания шлицев на валах.

Снижение вероятности появления сквозных радиальных трещин в роликах при всех прочих условиях способствует повышению степени укова материала поковок, достигаемое в результате применения исходного прутка минимально возможного диаметра иковки его с трехкратным чередованием осадки и вытяжки. При этом расположение карбидной сетки совпадает с расположением радиальных трещин и способствует развитию радиальных трещин. В связи с этим мы предлагаем совершенствование схемыковки накатных роликов с целью поперечного расположения карбидной сетки в них. Эти исследования будут описаны ниже.

2. Угловые, поперечные трещины и выкрашивания по переходной кромке ролика (рисунок 4.3) – часто встречающийся вид разрушения, связанный с конструкцией шлиценакатного ролика, и прежде всего с геометрией его рабочего профиля. Между цилиндрической и конусной поверхностями, в результате циклических нагружений, происходит накопление напряжений, способствующих механической усталости металла. Далее, по мере накопления механической усталости, металл выкрашивается под действием больших усилий деформирования. В результате концентрации напряжений угловые трещины переходят впоследствии в поперечные по всему профилю (рисунок 4.3).

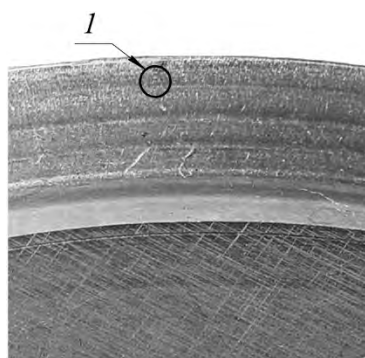
В процессе накатывания переходная кромка шлиценакатных роликов работает в тяжёлых стеснённых условиях. Её функцией является отделение потоков движущегося металла в заготовке, как вдоль оси заготовки, так и по направлению формирования шлица.

3. Кольцевые усталостные трещины (рисунок 4.4) обусловлены энергосило-вой схемой процесса шлиценакатывания. Этот вид разрушения самый распро-страненный.



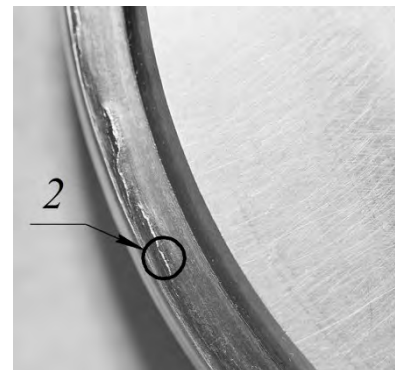
1 – выкрашивание металла;  
2 – поперечная трещина

Рисунок 4.3 – Износ переходной кромки инструмента для холодного пластического деформирования (x130)



а)

1 – concentрическая окружность сетки трещин;  
2 – кольцевая усталостная трещина



б)

Рисунок 4.4 – Кольцевые усталостные трещины:  
а) сетка радиальных трещин на конусной части накатного ролика; б) кольцевая трещина на конусной части накатного ролика

Разрушение металлов от усталости являются результатом действия повтор-ных циклических нагрузок, причем для таких разрушений в этом случае требуется значительно меньшая максимальная нагрузка, чем при статическом разрушении [80, 81, 139].

Этот вид разрушения характерен для данной технологии и не зависит от марки инструментального материала накатного ролика.

Кольцевые трещины в шлиценакатных роликах возникают симметрично на боковых поверхностях рабочего профиля на расстоянии, примерно равном глу-бине поперечного внедрения накатного ролика в заготовку (рисунок 4.5). Первоначально на этих боковых поверхностях возникают неровно-сти в виде чешуйчатости (рисунок 4.5,в), образование которых полностью зависит от движения металла вдоль инструмента.

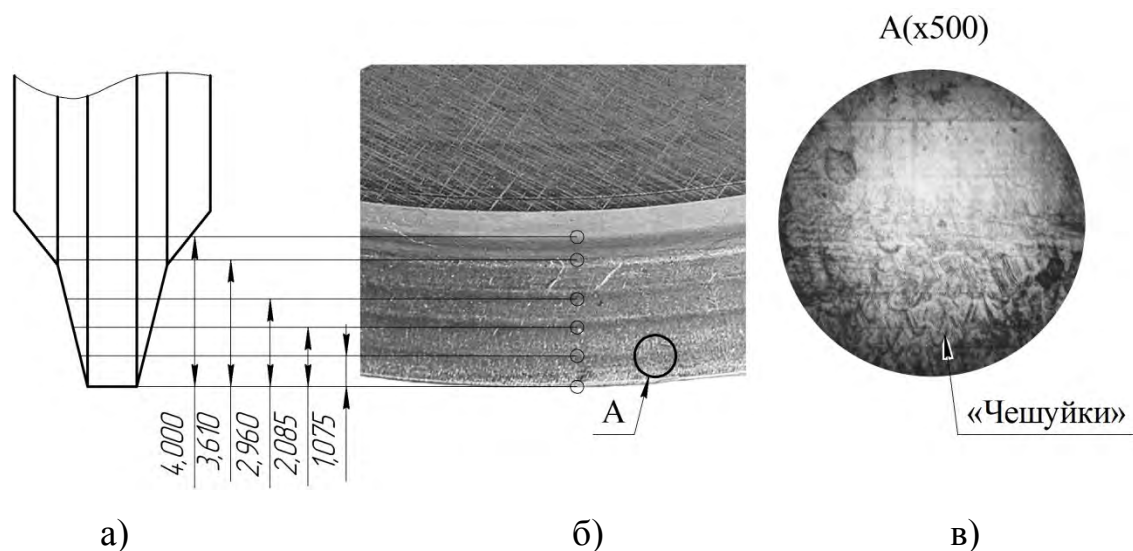


Рисунок 4.5 – Расположение кольцевых трещин по глубине внедрения инструмента: а) величина заглубления накатного ролика; б) расположение кольцевых трещин по глубине внедрения накатного ролика; в) «чешуйчатость» на конусной части накатного ролика

В процессе исследований установлено, что эти неровности «чешуйки» начало появления усталостных радиальных микрокротрещин. Процесс образования «чешуек» является важной стадией в развитии усталостного разрушения.

Радиальные микротрещины появляются при достижении 10 % от числа циклов, вызывающих разрушение и, таким образом, не менее 90% долговечности приходится на период их роста.

Зарождение трещин происходит быстро и, является необратимым процессом. Зарождению радиальных трещин способствует неравномерность окружных скоростей накатного ролика и осевого перемещения металла. Анализируя расчётные данные по отношению скоростей, нами установлено, что окружная скорость накатных роликов на два порядка превышает скорость перемещения металла (таблица 4.1). Это способствует проскальзыванию металла по конусной поверхности накатного ролика. В месте смены направления перемещения металла «нейтральном сечении» (рисунок 2.24, 2.29) возникает «скачок» по напряжениям, в результате чего возникают разрывные усилия, которые при циклическом наложении способствуют образованию радиальных микротрещин на накатном ролике.

Таблица 4.1 – Сопоставление окружной скорости накатного ролика и осевого перемещения деформируемого металла

| Параметры               | № прохода фильеры |         |         |         |         |
|-------------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------|
|                         | 1                 | 2       | 3       | 4       | 5       |
| $V_{окр.}, \text{ м/с}$ | 0,03766           | 0,03668 | 0,03584 | 0,03521 | 0,03483 |
| $v_{мет}, \text{ м/с}$  | 0,00107           | 0,00108 | 0,00105 | 0,00101 | 0,00097 |
| $\Delta V, \text{ м/с}$ | 0,03659           | 0,0356  | 0,03479 | 0,0342  | 0,03386 |

Долговечность при усталости определяется в основном временем, в течение которого трещины увеличиваются до катастрофических размеров. По мере накопления внутренней энергии на месте «чешуек» образуются субмикротрещины, которые суммируясь перерастают в радиальные микротрещины. Эти трещины развиваются по длине и ширине и от циклических нагрузок соединяются в одну кольцевую трещину, concentричную с наружной поверхностью ролика и поверхностью посадочного отверстия на расстоянии заглубления инструмента; этому способствует проникновение в трещины масла, а также твердых взвешенных в нем частиц. Развитие кольцевых трещин сопровождается появлением по всей их длине мелких выкрашиваний, имеющих вид точечного отшелушивания тонкого поверхностного слоя металла, что свидетельствует и о скрытом, не менее интенсивном развитии усталостного разрушения внутри рабочего профиля ролика.

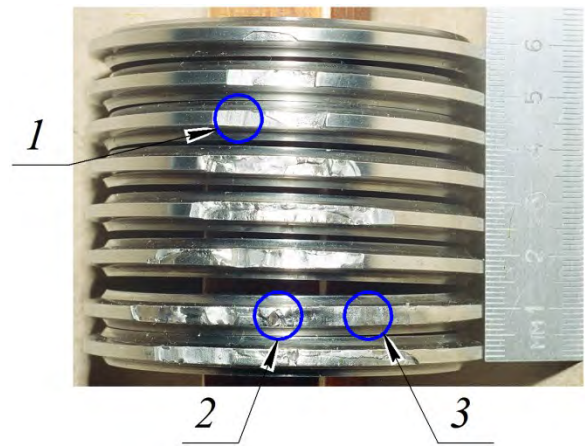
Усталостные трещины обычно мелкие и их трудно обнаружить, пока они не достигнут макроскопического размера, после чего они быстро распространяются и вызывают полное разрушение за короткий промежуток времени за счёт высоких усилий деформирования.

Трещины в шлиценакатных роликах распространяются с противоположных сторон в направлении, перпендикулярном к боковой поверхности рабочего профиля. Такое направление развития усталостных трещин совпадает с направлением действия касательных напряжений, возникающих в роликах в процессе работы.





а)



б)

1 – зона очага разрушения; 2 – зона постепенного развития усталостного разрушения; 3 – зона долома по кольцевому отслоению

Рисунок 4.6 – Кольцевое усталостное отслоение на рабочей поверхности шлиценакатного ролика: а) кольцевое отслоение; б) картина излома в месте отслоения

Анализ поверхности излома (рисунок 4.6) свидетельствует об усталостном характере разрушения, отличительная особенность которого – разрушение стали под действием повторяющихся нагрузок, значительно меньших номинального предела прочности. Об этом свидетельствует отсутствие следов пластической деформации на участке развития усталостного излома. В изломе кольцевого отслоения отчетливо видно 3 зоны: гладкая с сильным блеском – зона очага разрушения, где трещина развивается относительно медленно; менее гладкая – зона постепенного развития усталостного разрушения, где трещина распространяется быстрее и поверхность разрушения имеет нерегулярный характер, а также матовые (с зернистым строением) участки – зона долома, которая представляет собой поверхность, по которой происходит окончательное разрушение, когда сечение настолько уменьшено, что металл разрушается при приложении нагрузки (рисунок 4.6,б). Проведенный анализ позволяет охарактеризовать этот вид разрушения как повторный, а с учетом энергосиловой схемы процесса и его скоростного режима – как повторно-статический вид усталостного разрушения.

При этом все дефекты приводят к образованию трещин, а вся скрытая энергия, аккумулированная в инструменте, приводит к разрушению накатного ролика



[62, 138-141].

Для создания высокостойкого шлиценакатного инструмента актуальной задачей является отодвинуть момент возникновения усталостных трещин. Необходимо защитить контактную поверхность накатного ролика, снизить контактное трение способствующее возникновению пиковых напряжений по «нейтральному сечению». Барьером к развитию и возникновению трещин может служить нанесение на рабочую поверхность инструмента плёночных износостойких покрытий с низким коэффициентом трения, которое препятствует проникновению пиковых напряжений к матричному материалу накатного ролика, а так же снижают трение в пятне контакта.

#### **4.2 Совершенствование технологииковки шлиценакатных роликов**

В технологическом процессе изготовления шлиценакатных роликов, интерес представляют операции, ответственные за качество заготовок и готовых роликов. К числу этих операций относятся ковка, термическая обработка и финишное шлифование. Первые две операции определяют качество и стабильность структуры, а так же свойств металла в объеме всего ролика, в то время как шлифование влияет на качество поверхностного слоя готового инструмента.

В связи с этим разработка оптимальных схем и режимов, выбор средств осуществления этих операций, определение их места в технологической цепочке, является важным вопросом построения эффективного технологического процесса изготовления шлиценакатных роликов [142-144].

Критерием эффективности технологического процесса является получение шлиценакатных роликов с оптимальной структурой и свойствами [108, 145-147], с минимальным уровнем остаточных напряжений, что в дальнейшем при эксплуатации будет способствовать повышению стойкости роликов.

Качество поковок шлиценакатных роликов, как отмечают многие учёные [47, 50, 53, 148], существенно зависит от правильного выбора диаметра исходного прутка под ковку. Чем больше этот диаметр, тем выше неравномерность карби-

дов, тем труднее, уменьшить её путемковки. Для того чтобы получить наилучшую структуру и физико-механические свойства, поковка для шлиценкатных роликов должна быть как можно меньшего диаметра.

Применение дляковки шлиценкатных роликов исходной заготовки минимально возможного диаметра способствует обеспечению качественной структуры и свойств поковок.

Минимально возможный диаметр заготовки подковку роликов может быть определен по формуле [50]:

$$d = \sqrt[3]{\frac{k \cdot D^2 \cdot H}{n}}, \quad (4.1)$$

где  $d$  – диаметр исходной заготовки подковку;  $k$  – коэффициент, учитывающий угар металла (от 3 до 10%) в процессе основного нагрева подковку и промежуточных подогревов в процессековки ( $k$  от 1,03 до 1,10);  $D$  и  $H$  – диаметр и высота поковки, соответственно;  $n$  – отношение высоты исходной заготовки подковку к её диаметру ( $h/d$  от 2 до 3), предельное для случая свободнойковки и равное предельному коэффициенту устойчивости цилиндрической детали, нагружаемой в торец.

Входной контроль исходного проката диаметром 50 мм: величина карбидной неоднородности составляла от 3 до 4 балла. Ковка заготовок роликов производилась в два этапа по двум схемам, по 10 заготовок.

Заготовки роликов были с предварительным подогревом равномерно нагреты до температуры от 1140 до 1150 °С в соответствии с ГОСТ 1133-71 [149], бойки и песок подогреты (таблица 4.2).

Схемаковки: осадка до  $2/3 h_{исх}$ , протяжка на квадрат и обкатка  $\approx$  до  $2 h_{исх}$ , осадка до  $2/3 h_{исх} \div h_{исх}$ , протяжка на квадрат и обкатка  $\approx$  до  $2 h_{исх}$ , осадка  $\approx$  до  $1/2 h_{исх}$ , протяжка по диаметру до  $h_{исх}$ , осадка до  $h \approx$  до  $2 h_{пок}$ , протяжка по диаметру до  $1/2 h_{исх}$ , осадка до  $h < h_{пок}$ , обкатка и осадка в размер поковки  $\varnothing 88 \times 11$ , где  $h_{исх}$  – высота исходной заготовки.

Замеры температур начала и окончанияковки производились для каждой поковки оптическим пирометром «Проминь» в присутствии контролера ОТК.

Температура начала ковки измерялась на бойке в момент начала ковки, температура окончания ковки измерялась на бойке в момент последнего удара.

Ковка велась без дополнительных подогревов. Охлаждение поковок производилось в подогретом песке до полного охлаждения.

Трещин на поковках после охлаждения не обнаружено.

Отжиг поковок был осуществлен при 860°C в течение 6 часов, охлаждение с печью до температуры ниже 550°C, далее на воздухе. Партии, откованные первым и вторым кузнецом, были при отжиге отделены друг от друга.

Контроль твёрдости произведен на приборе «Бринелль» на 1 шт. от каждой партии. Твёрдость составила:

- от 1 партии – 229 НВ (диаметр отпечатка – 4,0 мм);
- от 2 партии – 217 НВ (диаметр отпечатка – 4,1 мм).

По действующему техпроцессу – диаметр отпечатка не менее 3,8 мм.

После отжига и дробеструйной очистки 1-ой партии была замаркирована меткой 1, 2-ая партия – без метки.

По 5 шт. от каждой партии были отправлены в ЦЗЛ на контроль твёрдости и структуры после отжига, а также величины карбидной неоднородности, результаты представлены в приложении Б таблица Б.1.

Затем обе партии поковок были отправлены на механическую обработку и предварительную шлифовку строго отдельно, после чего поступили на закалку и отпуск.

Таблица 4.2 – Показания температуры при ковке заготовок накатных роликов

|                 | По действ. техпроцессу | Для деталей, откованных |               |
|-----------------|------------------------|-------------------------|---------------|
|                 |                        | 1-ая партия             | 2-ая партия   |
| t° начала ковки | 1140°C                 | 1090...1130°C           | 1060...1100°C |
| t° оконч. ковки | 880°C                  | 915...930 °C            | 890...900 °C  |

Термообработка произведена в соответствии с действующим техпроцессом (каждая партия строго отдельно): закалка – подогрев от 830 до 850°C, 3 минуты, окончательный нагрев 1200°C, 1,5 минуты, охлаждение в масле, отпуск I и II – 560°C, 1,5 часа, отпуск III – 600°C, 1,5 часа (твёрдость после отпуска составила от 63 до 64HRC), отпуск IV (для получения требуемой твердости) – 620°C, 1,5 часа. Твердость после окончательного отпуска составила 62 HRC для обеих партий.

Контроль производился в соответствии с действующим техпроцессом (с помощью контрольной термопары, по записям на дисковой диаграмме рабочего потенциометра, твёрдомера «Роквелл»).

После термообработки по 5 шт. деталей, их отправляли в ЦЗЛ на контроль величины карбидной неоднородности. Результаты представлены в приложении Б таблица Б.2.

1. Карбидная неоднородность (ликвация) – это неравномерное распределение ледебуритных (первичных) карбидов, она возникает при кристаллизации стали при литье [97, 150]. Устранить карбидную ликвацию термической обработкой невозможно. Карбидную ликвацию снижают ковкой со значительной степенью укова.

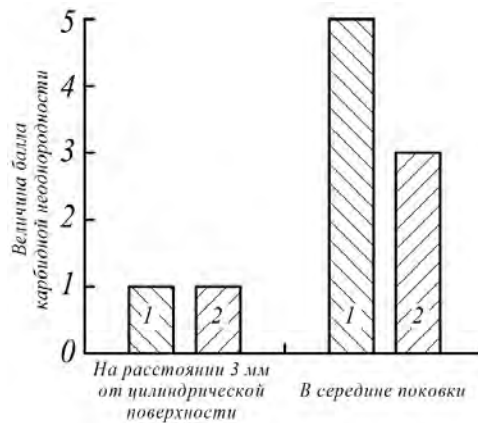
2. В деформированном металле распределение карбидов по сечению поковки неодинаково. Наиболее тонкая сетка карбидов наблюдается в поверхностных слоях металла. С увеличением степени уковки тонкая карбидная сетка в поверхностных слоях снижается, а в центральных слоях сохраняется сплошная или разорванная сетка карбидов (рисунок 4.7).

3. При ковке с увеличением степени деформации ледебуритная сетка (сетка первичных карбидов), образованная при литье, сначала разрывается, затем превращается в полосчатость и разрозненные карбиды, равномерно распределенные в массе металла.

4. Металлы подвергают ковке в определенном температурном интервале, который зависит от марки стали, – интервале наибольшей пластичности металла.

Температуру началаковки  $T_n$  выбирают такой, чтобы с расчетом подстывания заготовки ковка заканчивалась при температуре до 20-30°C превышающей

допустимую температуру концаковки  $T_k$ , а температуру нагрева устанавливают несколько выше  $T_n$  с учетом остывания заготовки за время её передачи от нагревательного устройства к молоту.



1 – существующая схемаковки; 2 – предлагаемая схемаковки

Рисунок 4.7 – Влияние схемы деформирования на карбидную неоднородность

Для стали Р6М5 по разным источникам температура началаковки 1100-1180°C, температура окончанияковки 850-900°C. Согласно утвержденному техпроцессу в ИМ температурный интервалковки 1140-880°C.

5. Чтобы поковки имели высокие механические свойства стремятся заканчиватьковку при температуре, близкой к температуре  $T_k$ , что обеспечивает мелкозернистую структуру металла. Если ковку заканчивать при более высоких температурах, в процессе охлажденияпоковок размеры зерен увеличиваются, а механические свойства ухудшаются.

6. Термообработка (закалка и отпуск) в лучшем случае может обеспечить сохранение размеров зёрен, полученных при ковке, но может привести и к росту зёрен без каких-либо возможных изменений их величин другими методами теплового воздействия на металл.

7. При нагреве стали с карбидной неоднородностью происходит неравномерный рост зёрен. В объёмах металла, обедненных карбидами, наблюдается более интенсивный рост зёрен.

8. Чем равномернее распределение карбидов в стали, тем менее интенсивно

растет зерно.

Из выше изложенного следуют выводы:

1. Полученные результаты свидетельствуют о том, что даже при соблюдении требований техпроцесса (температурного режима ковки, схемы ковки) не получается одинаковых результатов для каждой поковки. В этом играют роль скорость ковки, количество подогревов, степень проковки каждой заготовки.

2. Действующая схема ковки предложена после проведения опытных работ (см. приложение Б, рисунок Б.1, Б.2).

3. Рост величины карбидной неоднородности наблюдается, начиная с центра поковки (детали), с области с наиболее неравномерным распределением карбидов. При дальнейшей механической обработке в центральной части поковки высверливается отверстие диаметром 34 мм, при этом зона с наибольшей величиной карбидной неоднородности полностью или частично удаляется (см. приложение Б, рисунок Б.3-Б.5).

4. Закалка и отпуск обеспечивают, в лучшем случае, ту же величину карбидной неоднородности, что получена после ковки, или дают увеличение полученной после ковки величины карбидной неоднородности, начиная опять же с объемов металла с наиболее неравномерным распределением карбидов, т. е. с центра деталей.

5. Количество деталей, изготовленных из проката Р6М5 диаметром 50 мм с исходным баллом карбидной неоднородности от 3 до 4, из партии 20 шт. с превышением требуемого по чертежу 3 балла карбидной неоднородности, составляет 9 шт., т. е. 45%.

6. Контроль величины карбидной неоднородности – разрушающий, от каждой партии роликов (20-25 шт. деталей) испытывается одна, произвольно выбранная поковка, после отжига, и при удовлетворительных результатах её контроля вся партия отправляется на механическую обработку.

Опыт последующей сравнительной эксплуатации шлиценакатных роликов при многопроходном накатывании показывает, что они, выходя из строя по причине усталостного разрушения, как указывалось выше, а не износа.

Поэтому, при выборе марок сталей и режимов термической обработки, необходимо стремиться к получению максимальной прочности накатных роликов.

При этом необходимо, чтобы ролики выдерживали крайне высокие рабочие нагрузки, они не должны деформироваться, т. е. должны обладать достаточной твёрдостью и, вместе с тем, должны иметь высокую износостойкость.

Особое значение имеет, величина зерна стали. Известно [69, 80], что уменьшение размера зерна приводит к увеличению долговечности при циклическом нагружении с постоянной амплитудой напряжения. Уменьшение размера зерна очень важно для шлиценакатных роликов, работающих в условиях знакопостоянных повторных нагрузок.

Карбидная сетка должна располагаться перпендикулярно оси накатного ролика. В этом случае возрастает сопротивление материала ролика образованию кольцевых отслоений.

В придании указанных свойств роликам большое значение имеет правильное проведение закалки и последующего отпуска, включающего разработку режимов, порядок и условия их осуществления ГОСТ 5639-82 [151].

Для увеличения срока службы шлиценакатных роликов, работающих в условиях повторных знакопеременных нагрузок необходимо повышение усталостной прочности стали, из которой они изготовлены. Это достигается несколькими методами:

1. Выбором марки стали с соответствующими высокими механическими характеристиками.
2. Применение надлежащей упрочняющей и отделочной обработки (технологическое воздействие) [152].
3. Нанесение износостойких покрытий с низким коэффициентом трения [82, 129].

Большинство усталостных разрушений начинается на поверхности деталей или вблизи неё [153]. Поэтому выносливость деталей тесно связана с качеством их поверхностей: чем более гладкая поверхность, тем выше выносливость деталей.

Так же она связана со свойствами металла, из которого изготовлены детали: с микроструктурой, размером зерен, наличием включений, неоднородностью структурного состояния.

К характеристикам качества поверхности деталей относятся в первую очередь неровности поверхности, остаточные напряжения в поверхностном слое и наклеп.

Изменение схемыковки, приводит к перпендикулярному расположению карбидной сетки, относительно оси накатного ролика, что препятствует образованию кольцевых трещин и повышает стойкость роликов, а так же способствует дроблению карбидной сетки.

#### **4.3 Моделирование напряженного состояния инструмента и заготовки при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах**

В процессах формоизменения изделий деформирующий инструмент испытывает значительные силовые нагрузки, которые в большинстве случаев обуславливают необратимые деформации. Уровень силового воздействия на инструмент обычно характеризуется либо величиной давления на контактные поверхности, либо величинами нормальных и касательных напряжений.

На стойкость накатного ролика при многопроходном накатывании наибольшее влияние оказывают максимальные значения нормальных и касательных напряжений, возникающих в пятне контакта инструмент-деталь.

Для многопроходного холодного накатывания используется цилиндрический деформирующий инструмент сложной формы, у которого две конусные рабочие части и одна цилиндрическая. В процессе накатывания деформирующий инструмент зажат в заготовке обхватывающим металлом. Необходимые радиальные  $F_{рад.}$  усилия для деформирования металла увеличиваются до пяти раз за счёт клинового эффекта рабочего конуса  $N \approx 5 \cdot F_{рад.}$  в зависимости от величины угла  $\alpha$  (рисунок 4.8).



Эти усилия вызывают, при малых площадях контакта, большие нормальные и касательные напряжения, действующие как на конусную часть деформирующего инструмента, так и на цилиндрическую (рисунок 4.9).

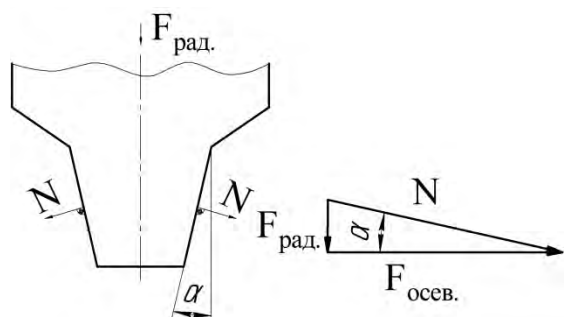
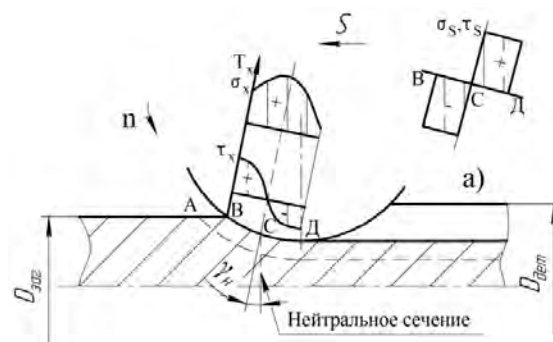


Рисунок 4.8 – Нагружение деформирующего инструмента активными усилиями



ВС – зона отставания;

СД – зона опережения

Рисунок 4.9 – Эпюры контактных нормальных и касательных напряжений по дуге захвата и по конусной части (а)

В работе по полученным математическим моделям были оценены контактные напряжения на профилирующей поверхности накатного ролика (рисунок 4.10). Данные напряжения возникают от действия активных сил со стороны фильеры и сопротивления заготовки пластическому деформированию.

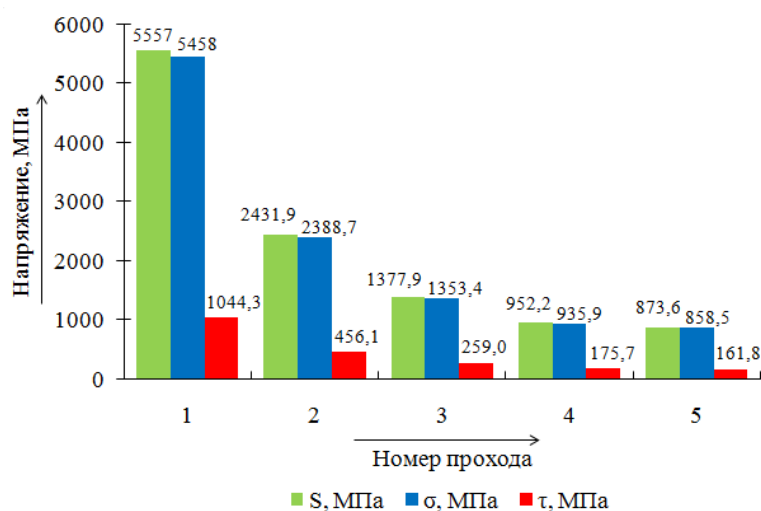


Рисунок 4.10 – Расчётные контактные напряжения на конусной части ролика

При продольном накатывании шлицев на валах, от действия активных сил со стороны инструмента, течение металла, в заготовке, происходит в двух направлениях: радиальном и осевом. Количественное распределение перемещающегося металла в этих направлениях зависит от многих факторов и, в частности, от величины относительной деформации металла за один проход деформирующего инструмента, схемы деформирования, отношения диаметра заготовки к диаметру инструмента, коэффициента замкнутости контура и т. д.

Процесс многопроходного деформирования рассчитывается таким образом, чтобы объёмы деформируемого металла на каждом проходе были примерно равны (рисунок 4.11).

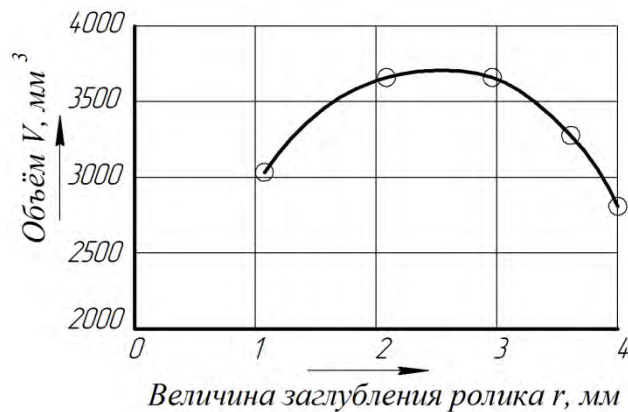
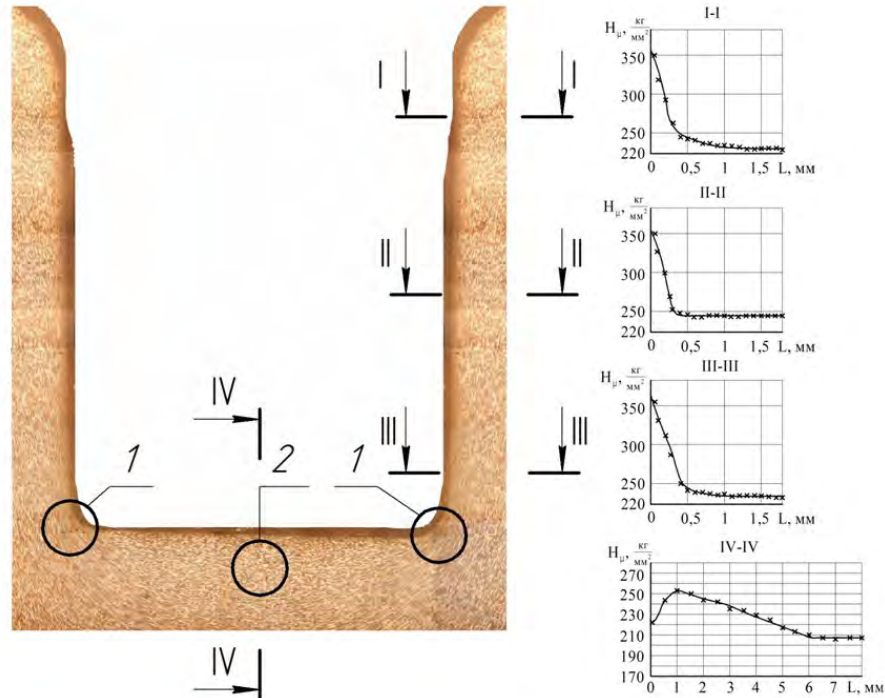


Рисунок 4.11 – Изменение объёма деформирования при многопроходном накатывании шлицевых профилей на валах

Несмотря на примерное равенство объёмов деформирования, упрочнение шлицевого вала в поперечном сечении происходит неравномерно (рисунок 4.12). По толщине зуба упрочнение равномерно распределяется (сечение I-I, II-II, III-III) это указывает на то, что зуб формируется в стеснённых условиях при движении металла по радиусу заготовки [99]. В зоне 2 по впадине шлица упрочнения не наблюдается, здесь возникает зона «застоя» в которой металл не испытывает активной деформации, а всё упрочнение возникает ниже зоны застоя (сечение IV-IV). Самое активное упрочнение наблюдается в местах концентрации контактных напряжений в зоне 1. Здесь металл испытывает активную деформацию и наибольшее упрочнение.

В продольном сечении заготовки, под цилиндрической частью накатного ролика, характер течения металла в очаге деформации и распределение напряжений можно рассматривать в четырех зонах АВ, ВС, С и СД (рисунок 4.9).



1 – зона активного течения металла; 2 – «застойная» зона

Рисунок 4.12 – Зоны упрочнения шлицевого вала

Деформация определённого объёма металла заготовки начинается на некотором расстоянии от места входа деформирующего инструмента в металл. При дальнейшем внедрении инструмента в заготовку частицы металла, находящиеся вблизи инструмента, начинают «выпучиваться» и перемещаться в направлении движения деформирующего инструмента (участок АВ). При дальнейшем внедрении инструмент вступает в непосредственный контакт с заготовкой в точке В, и с этого момента свободному перемещению металла начинает препятствовать торможение, так как направление течения металла и вращение инструмента не совпадают и металл проскальзывает по поверхности инструмента. С ростом площади контакта инструмента с заготовкой увеличивается сопротивление проскальзыванию, поэтому скорость проскальзывания от точки В к точке С постепенно снижается. В точке С скорость перемещения металла равняется окружной скорости ро-

ликов, поэтому условную плоскость, проходящую через точку  $C$ , называют нейтральной плоскостью течения. По этой причине в данной точке  $C$  нормальные напряжения имеют максимальную величину, а тангенциальные меняют знак. Зона  $BC$  называется зоной скольжения, или отставания. За зоной отставания начинается зона опережения  $CD$ . В этой зоне постепенно увеличивается скорость движения металла, так как течение металла и вращение инструмента происходят в одном направлении.

Из общей схемы движения металла в очаге деформации видно, что в зоне опережения металл движется со скоростью, большей окружной скорости деформирующего инструмента. При таком состоянии металл в зоне опережения как бы выдавливается из пространства между деформирующими инструментами.

Неравенство скоростей течения металла вызывает неравномерность распределения деформаций в заготовке. В связи с этим на поверхности инструмента одновременно возникают напряжения сжатия и растяжения (рисунок 4.9). Возникающие касательные напряжения растяжения и сжатия пытаются разорвать деформирующий инструмент. И при циклическом приложении нагрузки инструмент разрушается. В связи с этим возникает необходимость определения контактных напряжений в зоне инструмент-деталь при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах в холодном состоянии, а так же число таких максимальных совпадений, приводящих к разрушению материала накатного инструмента.

Для определения контактных напряжений в зоне инструмент-деталь, а так же напряжений в самом инструменте и заготовке во время деформирования, мы использовали программное обеспечение DEFORM-3D и SolidWorks [154-157]. В программном пакете SolidWorks были смоделированы трёхмерные модели заготовки и инструмента, а программном пакете DEFORM-3D был смоделирован процесс деформирования цилиндрического вала (Сталь 45) роликами (Р6М5) с различным коэффициентом и получением на нём шлицевого профиля [112].

При моделировании процесса деформирования приняты допущения:

– материал заготовки однороден в начальном состоянии;

- материал инструмента подчиняется в упругом состоянии закону Гука, а заготовки пластичности Губера-Мизеса и соотношениям Прандтля-Рейсса в пластическом состоянии;
- процесс формообразования разбивается на этапы;
- немонотонный процесс объёмного формообразования заменяется рядом монотонных процессов, для которых формообразование протекает однозначно и главные оси конечной деформации сохраняют своё положение в пространстве;
- напряжения текучести  $\sigma_T$  и коэффициент упрочнения  $H' = d\sigma_T / d\varepsilon$  являются функциями интенсивности пластической деформации  $\varepsilon_i$ .

Общий вид процесса накатывания шлиц приведён на рисунке 4.13.

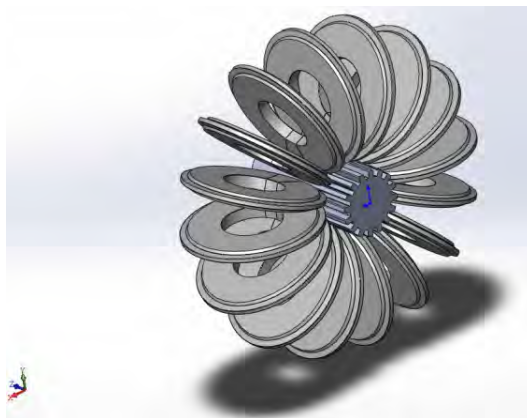


Рисунок 4.13 – Общий вид процесса продольного накатывания шлиц

Модель строилась на основе деформационной теории пластичности. Модель среды является упругопластической. На свободных поверхностях, где нет контакта заготовки с накатником и матрицей, заданы нулевые силовые условия в виде сил, действующих по нормали к поверхности. На контактных поверхностях заданы кинематические условия: величина и направление перемещений каждой из рассматриваемых точек. Касательные напряжения приняты равномерно распределёнными по грани рассматриваемого конечного элемента. Граничными условиями для расчёта напряжённо-деформированного состояния инструмента служат контактные напряжения, полученные при решении задачи объёмного формообразования заготовки.

На заготовку и инструмент была наложена сетка конечных элементов (рисунок 4.14 а, б).

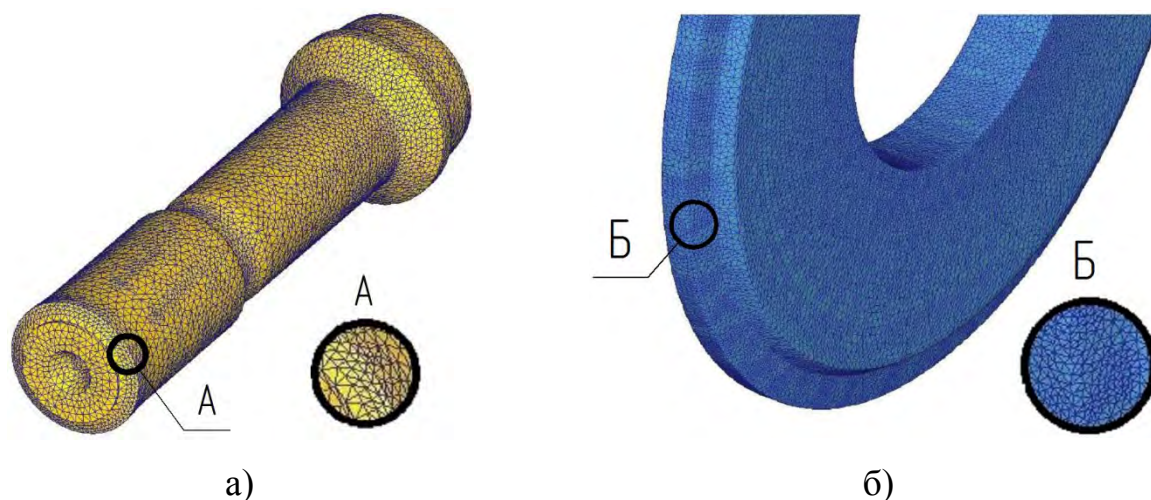


Рисунок 4.14 – Схема наложения сетки конечных элементов:

а) на заготовку; б) на инструмент

Условия деформирования были максимально приближены к реальным, протекающим при накатывании. Были заданы граничащие условия, материал, наложены ограничения и коэффициент трения. В результате расчёта были получены контактные напряжения при каждом из 5 проходов как на инструменте (рисунок 4.15) так и на заготовке в продольном и поперечном сечении (рисунок 4.16).

Из рисунка 4.15 видно, что максимальная концентрация напряжений при всех 5 проходах, сконцентрирована на режущей кромке инструмента. Неравномерность распределения напряжений связана с концентрацией конечных элементов на ролике. Режущая кромка накатного ролика разделяет деформируемый металл и способствует облегчению его перемещения вдоль ролика на формирование шлицев и вдоль заготовки на её удлинение. Радиус режущей кромки накатного ролика играет важную роль в разделении потоков деформированного металла и его значение оказывает большое влияние на концентрацию напряжений. Увеличение радиуса приводит к снижению контактных напряжений, но способствует ухудшению процесса разделения металла при деформировании.



В детали (рисунок 4.16) очаг напряжений не равномерно распределяется по каждому проходу. Это связано с неравномерным объёмом деформирования, а также с упрочнением металла заготовки на каждом последующем проходе. Таким образом, зона влияния напряжений вглубь заготовки, не равномерна. В центре заготовки образуется так называемая зона «С». В данной зоне металл не подвержен большим деформациям, вся зона (сердцевина заготовки) растягивается совместно с осевым удлинением заготовки.

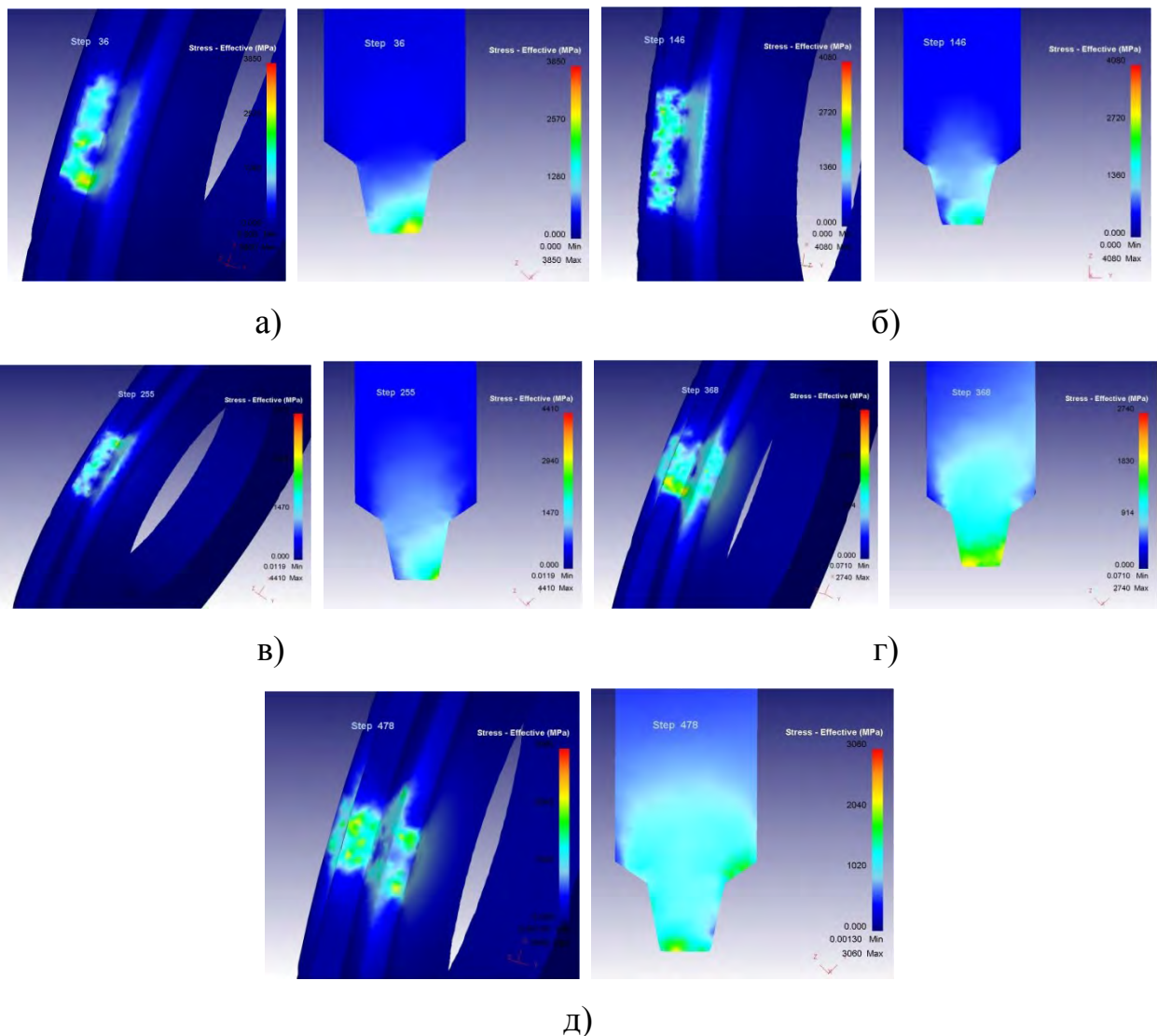
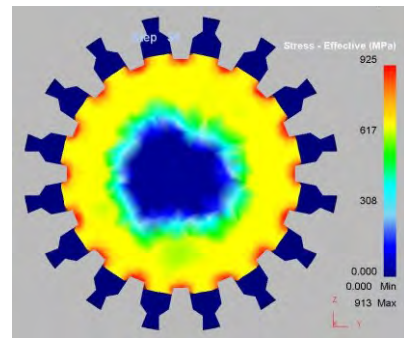
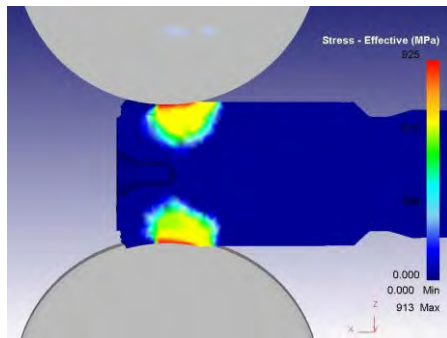
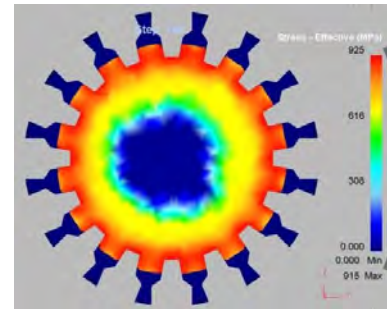
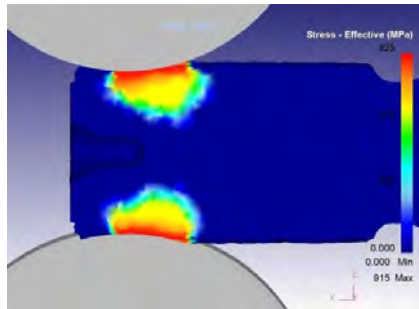


Рисунок 4.15 – Напряжённое состояние инструмента  
(контактные напряжения – слева и поперечный разрез – справа):  
а) 1 проход; б) 2 проход; в) 3 проход; г) 4 проход; д) 5 проход

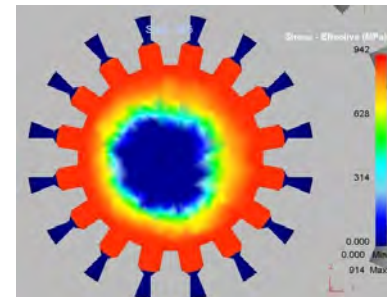
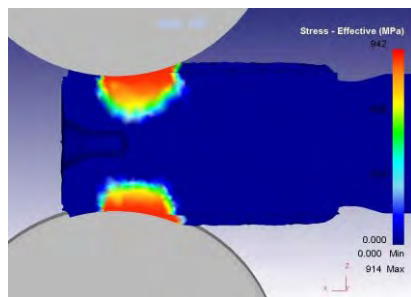
а)



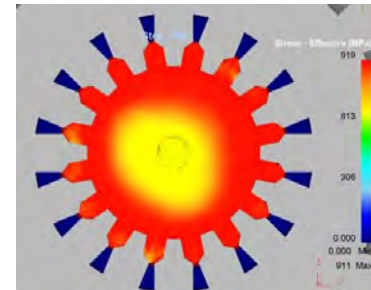
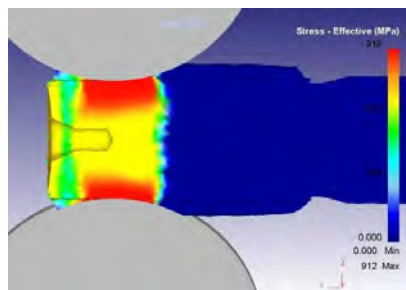
б)



в)



г)



д)

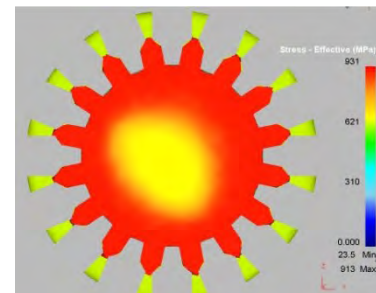
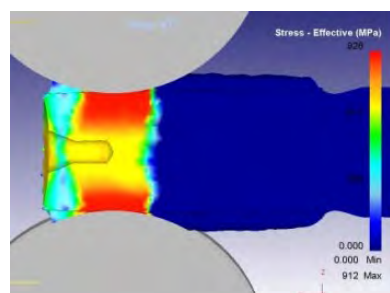


Рисунок 4.16 – Напряжённое состояние детали  
(продольное сечение – слева и поперечное сечение – справа):  
а) 1 проход; б) 2 проход; в) 3 проход; г) 4 проход; д) 5 проход



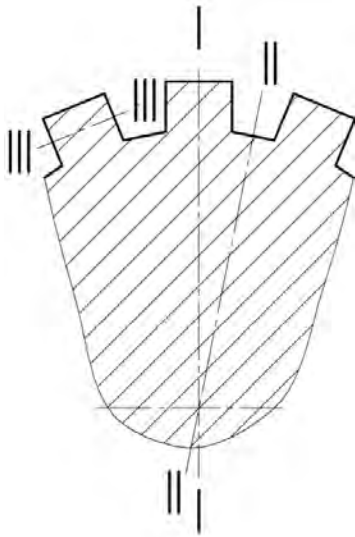


Рисунок 4.17 – Схема сечений для исследования напряжений на заготовке

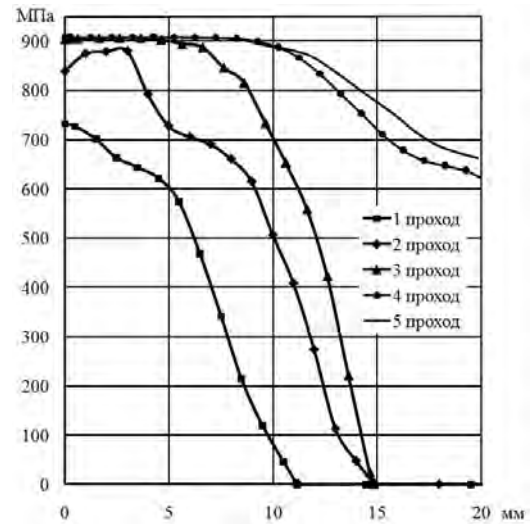


Рисунок 4.18 – Распределение напряжений от поверхности зуба к центру заготовки при коэффициенте контактного трения  $f = 0,12$  (сечение I-I)

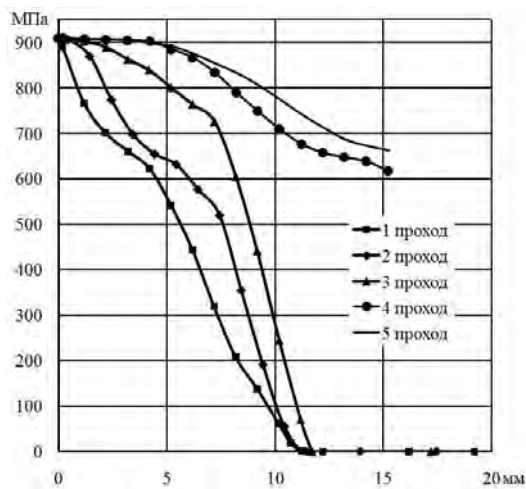


Рисунок 4.19 – Распределение напряжений от поверхности впадины шлица к центру заготовки  $f = 0,12$  (сечение II-II)

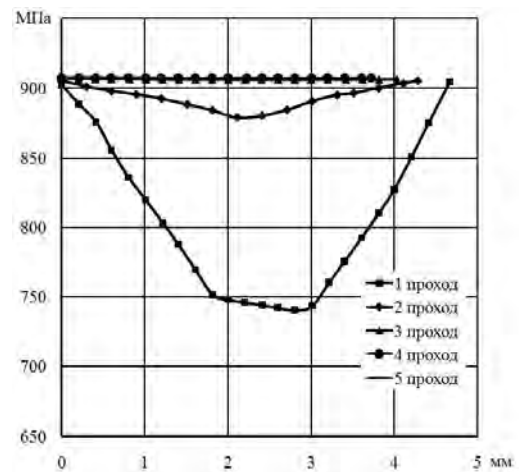


Рисунок 4.20 – Распределение напряжений по ширине зуба  $f = 0,12$  (по центру глубины внедрения, сечение III-III)

Исследуя снятые показания напряжений в разных сечениях заготовки в процессе накатывания шлицевого профиля при коэффициентах контактного трения  $f = 0,12$  и  $f = 0,7$  (рисунок 4.17-4.20, 4.24-4.26) необходимо отметить, что

напряжения возрастают с каждым проходом, это обусловлено степенью упрочнения металла и глубиной внедрения инструмента как отмечалось выше.

Напряжения в центре заготовки на первых трёх проходах равны нулю, т. е. это доказывает, что в центре заготовки не происходит интенсивных деформаций. На четвёртом и пятом проходах напряжения в центре заготовки имеют значения свыше 600 МПа, что говорит о сквозном проникновении деформаций вглубь заготовки. При повышении коэффициента контактного трения, напряжения в заготовке возрастают. При повышении коэффициента трения  $f$  с 0,12 до 0,7 напряжения возрастают на 15-20 %.

Рассматривая напряжения по ширине зуба (рисунок 4.20, 4.26), видно, что на первых двух проходах напряжения у боковых сторон имеют максимальное значение, а в центре зуба минимальное, что говорит о несквозном упрочнении металла. На 3-5-ом проходах, зуб упрочняется на всю его ширину.

Распределение напряжений в накатном ролике при коэффициентах контактного трения  $f = 0,12$  и  $f = 0,7$  (от центра к его периферии рисунок 4.21, 4.22, 4.27) с каждым проходом увеличивается. Причём до расстояния 15 мм напряжения находятся в пределах до 600 МПа, а на расстоянии от 20 мм и до периферии напряжения резко возрастают, в связи с приближением к зоне контакта инструмент-заготовка и геометрической форме поперечного сечения инструмента.

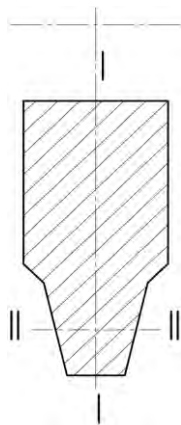


Рисунок 4.21. Схема сечений для исследования напряжений в ролике

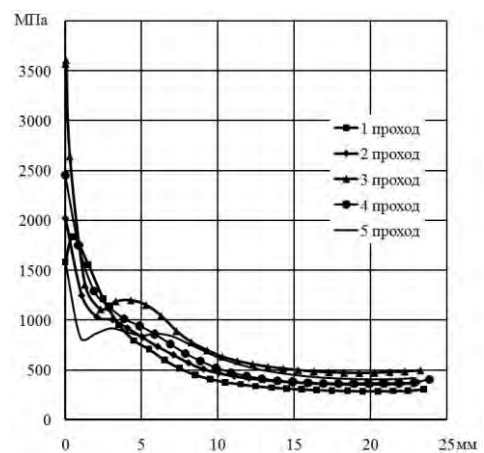


Рисунок 4.22 – Распределение напряжений от поверхности ролика к центру  $f = 0,12$  (сечение I-I)

В поперечном сечении инструмента (рисунок 4.23, 4.28) попоходное распределение напряжений распределено хаотично. При этом прослеживается скачок напряжений вблизи контактных поверхностей и снижение в центре инструмента. Как показали исследования, при изменении коэффициента контактного трения  $f$  с 0,12 до 0,7 напряжения в инструменте так же возрастают на 5...10 %.

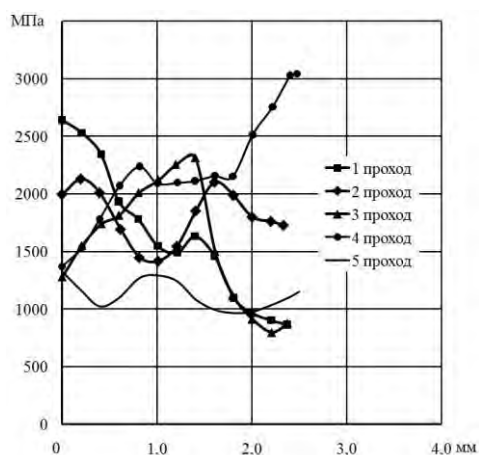


Рисунок 4.23 – Распределение напряжений в поперечном направлении ролика  $f=0,12$  (по центру глубины внедрения, сечение II-II)

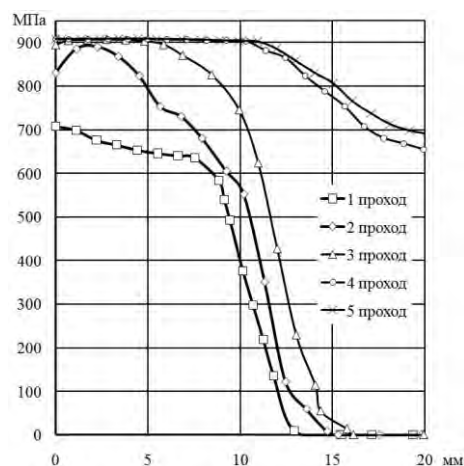


Рисунок 4.24 – Распределение напряжений от поверхности зуба к центру заготовки при коэффициенте контактного трения  $f=0,7$  (сечение I-I)

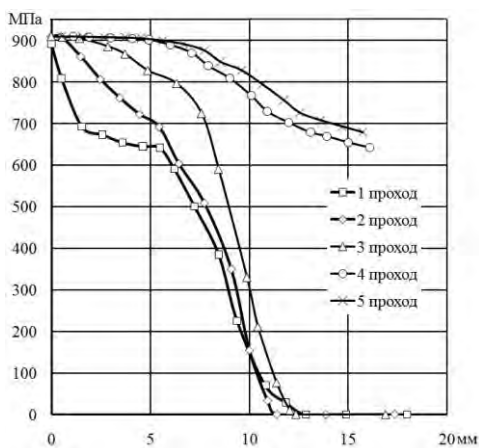


Рисунок 4.25 – Распределение напряжений от поверхности впадины шлица к центру заготовки  $f=0,7$  (сечение II-II)

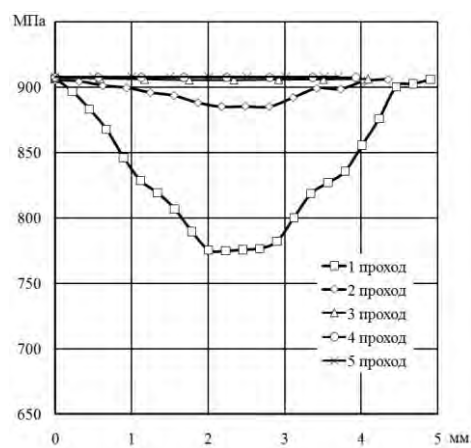


Рисунок 4.26 – Распределение напряжений по ширине зуба  $f=0,7$  (по центру глубины внедрения, сечение III-III)

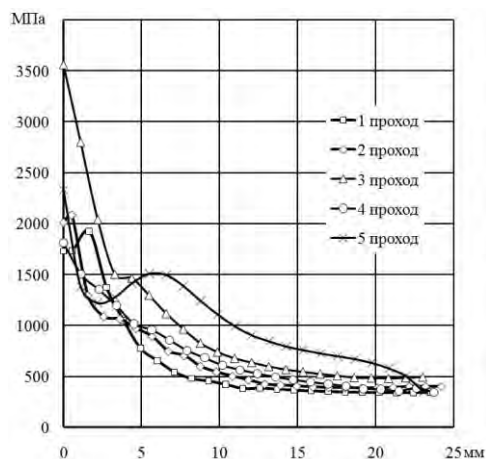


Рисунок 4.27 – Распределение напряжений от поверхности ролика к центру  $f = 0,7$  (сечение I-I)

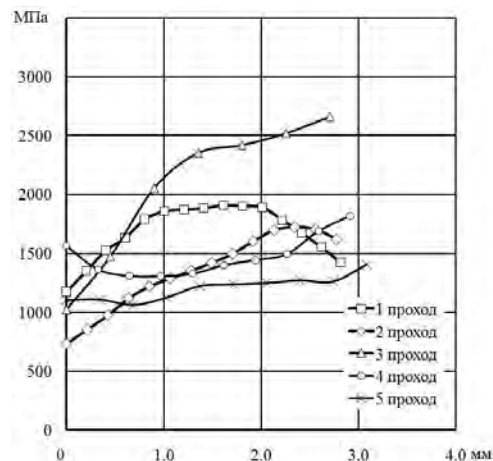


Рисунок 4.28 – Распределение напряжений в поперечном направлении ролика  $f = 0,7$  (по центру глубины внедрения, сечение II-II)

На рабочих поверхностях накатного ролика действуют усилия вызывающие растягивающие и сжимающие нормальные и касательные напряжения. Перепад напряжений вызывает появление трещин приводящих к разрушению инструмента. Расчёт контактных поверхностей при многопроходном накатывании шлицев на валах даёт возможность спрогнозировать и форму и размеры фактического очага деформации, определяющих и долговечность инструмента и прочностные характеристики шлицевого вала в целом. Снижение контактного трения (с 0,7 до 0,12) снижает напряжённое состояние, как заготовки, так и инструмента на 10...20 %.

#### 4.4 Повышение долговечности накатных роликов применением износостойких покрытий полученных методом КИБ

Как указывалось выше, основной причиной выхода накатного ролика из строя, является его поломка, вследствие действия и совпадения максимальных напряжений по «нейтральному сечению» приводящих к возникновению микро-трещин на рабочей поверхности ролика, а так же действия изгибных моментов со стороны накатной головки.

Для повышения стойкости шлиценакатного инструмента необходимо отодвинуть момент возникновения усталостных трещин. Необходимо защитить контактную поверхность накатного ролика и снизить контактное трение. Защитить контактную поверхность накатного ролика можно несколькими способами: азотированием поверхности, подбором высокопрочного материала ролика, нанесением плёночных покрытий методами химического либо физического осаждения вещества и др. Не смотря на многообразие методов повышения стойкости инструментов, каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. Использование высокопрочных материалов ведёт к повышению стоимости накатных роликов и не всегда приемлемо, т. к. высокопрочные материалы повышают прочность на сжатие, но ухудшают изгибные свойства. Использование азотирования поверхностных слоёв накатного ролика, так же процесс весьма дорогостоящий, хотя и достаточно эффективный при накатывании шлицевых профилей в холодном состоянии. Недостатком азотирования являются высокие температуры нагрева роликов, что приводит к отпуску материала ролика и к снижению его физико-механических свойств [99]. Нанесение износостойких плёночных покрытий это весьма эффективный метод и широко распространён для повышения стойкости режущего инструмента, что позволяет использовать их на инструменте для накатывания шлицевых профилей в холодном состоянии. В отличие от азотирования процесс нанесения покрытий протекает при температурах от 300 до 400 °С и экономически менее затратный.

Применение износостойких покрытий, позволяет повысить такие свойства, как прочность, вязкость, выносливость и твёрдость. Данные свойства зависят от состава, структуры, строения покрытий, а так же от типа формируемой связи покрытие – инструмент. Управлять свойствами инструмента с покрытиями, можно путём подбора химического состава покрытия, его структурой и типом связи с материалом инструмента.

При разработке накатного инструмента с износостойким покрытием важно определить требования к покрытию, исходя из условий разрушения инструмента. При холодном накатывании шлицевых профилей на валах из конструкционных

сталей, пиковые значения контактных напряжений достигают 5500 МПа [106, 107]. В связи с этим износостойкие покрытия, должны противостоять разрушению при напряжениях до 5500 МПа, иметь высокую способность адгезии к инструменту накатного ролика и высокую твёрдость. Для устойчивости к разрушению покрытие должно обладать высокими пределами выносливости, ударной вязкостью, должно быть малочувствительным к воздействию циклических нагрузок. Важным параметром износостойких покрытий, является коэффициент контактного трения, снижая который можно уменьшить усилия деформирования и момент закручивания со стороны заготовки. Это позволит повысить стойкость накатного ролика и точность накатываемых шлицев на валах.

В связи с этим, нами были проанализированы однослойные одно- и многоэлементные износостойкие покрытия на основе нитридов и карбонитридов титана TiN, TiCN, (Ti,Zr)N, (Ti,Zr)CN, (Ti,Fe)N, (Ti,Al)N, (Ti,Si)CN по нормальным  $\sigma$  и касательным  $\tau$  напряжениям, твёрдости  $H_\mu$ , коэффициенту отслоения  $K_O$  и коэффициенту контактного трения  $\mu$  [100, 101, 120, 123, 129, 158-162].

Анализ физико-механических свойств показал, что наибольшие нормальные напряжения выдерживают покрытия TiN и TiCN – 2174 и 2560 МПа соответственно, касательные напряжения выдерживают покрытия (Ti,Zr)N, (Ti,Zr)CN и (Ti,Si)CN – 525, 532 и 533 МПа соответственно. Наибольшую твёрдость имеют покрытия (Ti,Al)N, (Ti,Zr)N и (Ti,Si)CN – 40, 41,5 и 51,8 ГПа, а наименьший коэффициент отслоения у покрытий (Ti,Zr)N от 0,4 до 1,2 и (Ti,Al)N от 0,3 до 0,9.

В результате проведённого анализа по данным физико-механических свойств необходимо отметить, что для накатных роликов при холодном накатывании шлицевых профилей на валах можно использовать однослойные покрытия (Ti,Zr)N, (Ti,Al)N и (Ti,Si)CN. Однако у покрытия (Ti,Si)CN очень высокий коэффициент отслоения  $K_O = 2,1$ , что приведёт при пиковых напряжениях в 5500 МПа к быстрому его разрушению. Покрытие (Ti,Al)N тяжело получить и конденсировать на поверхность накатного ролика, себестоимость его нанесения практически в 2 раза выше (Ti,Zr)N, что экономически не целесообразно.

В связи с этим, для дальнейших опытно-промышленных испытаний были выбраны покрытия (Ti,Zr)N, TiN, TiCN которые способны выдерживать максимальные нормальные и касательные напряжения, способны противостоять длительным циклическим нагрузкам, и имеют наименьший коэффициент отслоения.

#### 4.4.1 Результаты лабораторных исследований износостойкости накатных роликов с износостойкими покрытиями и их анализ

Лабораторные исследования влияния износостойких покрытий на работоспособность шлиценкатных роликов проводили на машине трения 2070 СМТ-1 [163].

Предварительно проводились замеры шероховатости образцов (рисунок 4.29) на профилометре модели 130. Результаты измерения шероховатости показали, что шероховатость образцов: без покрытия (Р6М5)  $R_a$  от 0,12 до 0,09 мкм; с покрытием TiN  $R_a$  от 0,06 до 0,05 мкм; с покрытием TiCN  $R_a$  от 0,09 до 0,06 мкм; с покрытием TiZrN  $R_a$  от 0,05 до 0,03 мкм.

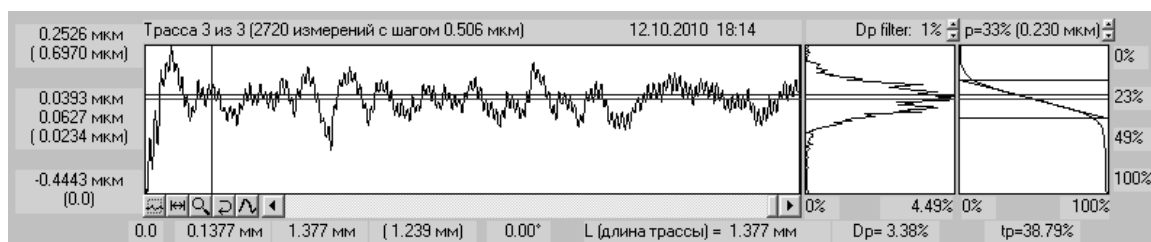


Рисунок 4.29 – Кривая шероховатости образцов

Исследования на машине трения были направлены с целью определение момента трения  $M_{тр}$  и прирост площади пятна контакта с течением времени  $J$  покрытий на различных режимах обработки [164, 165].

При исследовании по схеме «колодка-ролик» были получены диаграммы изменения значения момента трения покрытий, при разных режимах приложения нагрузки, твёрдости образцов и частоты вращения, а также пятно контакта на образцах (рисунок 4.30), позволяющее судить об износах покрытия. Измерение

площади пятна контакта проводилось на микроскопе ММИ-2. Обработка результатов проводилась с использованием программы Excel.



Рисунок 4.30 – Пятно контакта на образце колодка с покрытием TiN

Значение момента трения в зависимости от скорости и твёрдости при равной нагрузке  $F = 320$  Н представлены на рисунке 4.31, а, б, в.

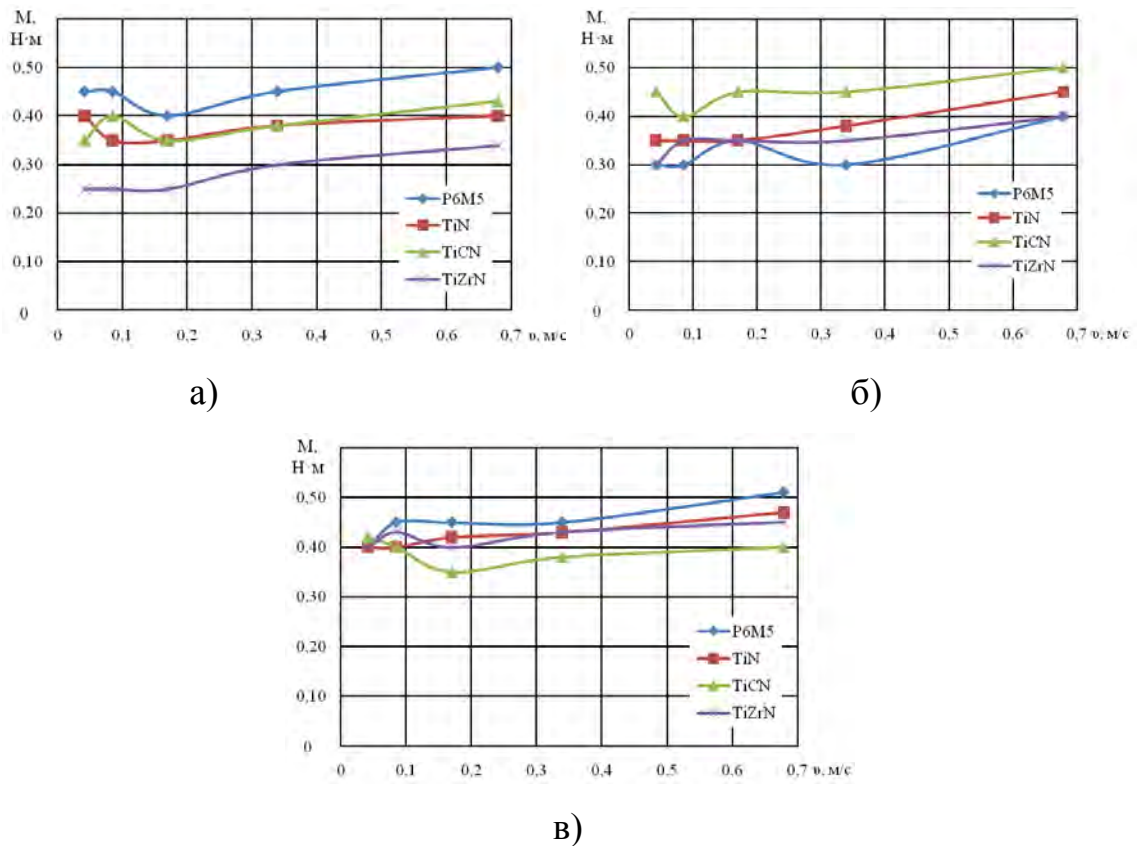


Рисунок 4.31 – Влияние скорости скольжения на момент трения в паре «ролик-колодка»: а) HB 156-172; б) HB 173-189; в) HB 189-210



Из графиков видно, что момент трения образцов изменяется не значительно при изменении скорости перемещения образцов. При этом момент трения на образцах без покрытия выше, чем на образцах с покрытием при низкой и самой высокой твёрдости. При средней твёрдости момент трения образцов без покрытия минимальный. Другая тенденция у образцов с TiCN покрытием. Здесь при низкой твёрдости момент трения находится на среднем уровне из представленных зависимостей, на средней твёрдости он имеет самую большую величину, а на высокой твёрдости минимальную. Покрытие TiZrN на низкой твёрдости показывает наименьший момент трения, в остальных случаях находится на среднем уровне. Момент трения TiN покрытия во всех случаях расположен на среднем уровне.

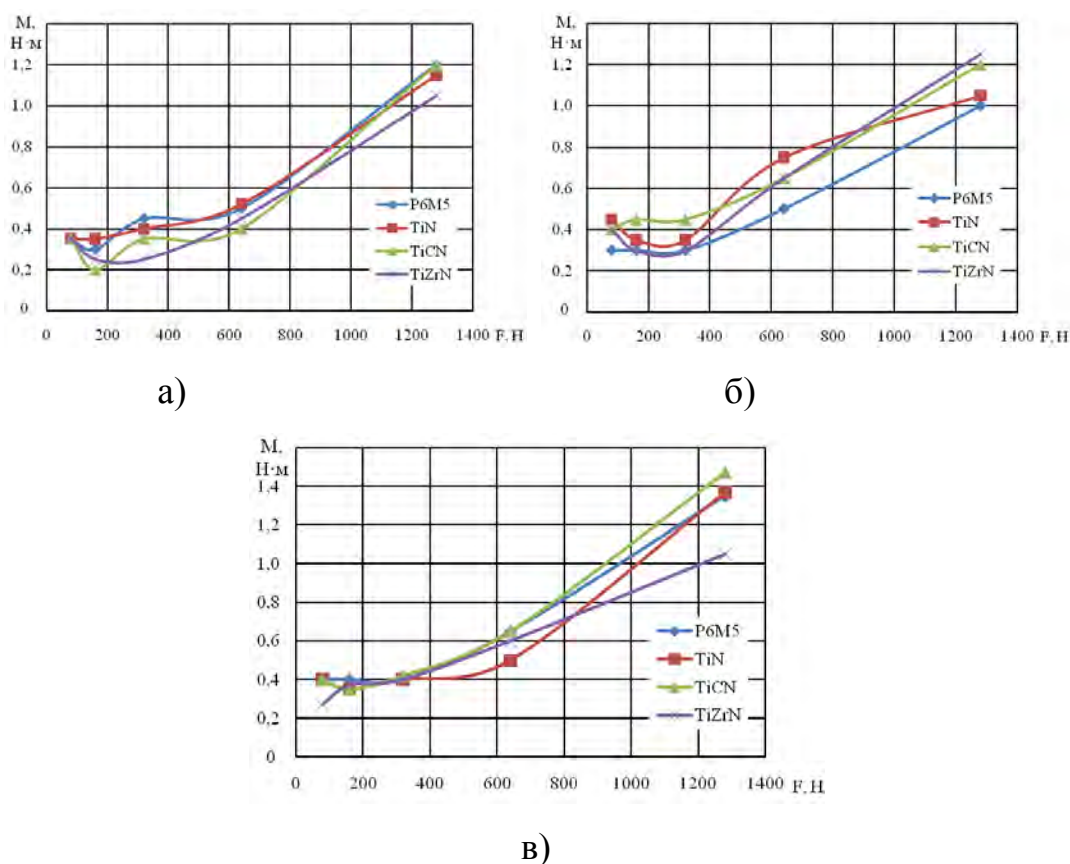


Рисунок 4.32 – Влияние усилия прижатия  $F$  на момент трения  $M$  в паре «ролик-колодка»: а) HB 156-172; б) HB 173-189; в) HB 189-210

Из графиков (рисунок 4.32,а, б, в) видно, что момент трения образцов при приложении нагрузки изменяется значительно. С увеличением усилия момент

трения с начало снижается и имеет минимум при 300 Н, при дальнейшем увеличении усилия момент трения начинает возрастать. Следует отметить, что момент трения всех покрытий при этом практически одинаков и расходится при максимальном усилии.

Значение момента трения в зависимости от твёрдости при равной скорости  $v = 0,042$  м/с и нагрузке  $F = 320$  Н представлен на рисунке 4.33.

На графике видно, что момент трения образцов без покрытия и с покрытием TiN имеет максимальное значение на низкой и на высокой твёрдости, а минимальное значение на твёрдости 183 НВ. Момент трения образцов с покрытием TiCN имеет противоположную картинку. Это обуславливается разной твёрдостью покрытия. У образца с покрытием TiZrN, момент трения возрастает на всём участке повышения твёрдости.

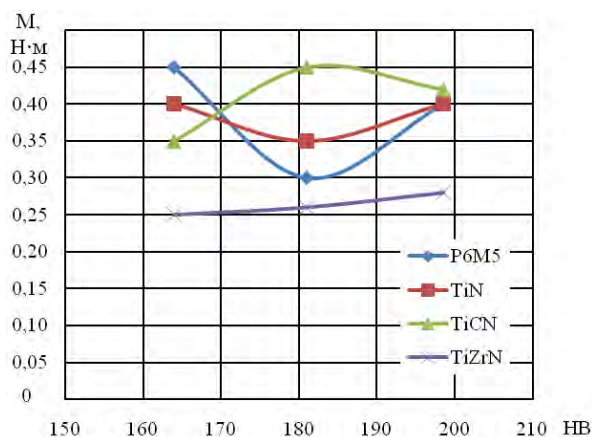


Рисунок 4.33 – Влияние твёрдости «ролика» на момент трения в паре «ролик-колодка»

Как следует из рисунок 4.34,а при твёрдости «ролика» НВ 152-172, интенсивность изнашивания покрытий TiN и TiCN практически не различаются при всех значениях твёрдостей и во всём диапазоне усилий прижатия. При твёрдости «ролика» НВ 173-189 (рисунок 4.34,б), покрытие TiZrN изнашивается меньше, чем покрытия TiN и TiCN. При твёрдости НВ 190-207 (рисунок 4.34,в) интенсивность изнашивания образцов с покрытием TiZrN сопоставима со скоростью изнашивания покрытий TiN и TiCN.

Сравнивая интенсивность изнашивания «колодок» с покрытиями в зависимости от твёрдости «ролика» при  $F = 320$  Н и  $V = 0,042$  м/с (рисунок 4.34,г), можно сделать вывод, что интенсивность изнашивания «колодок» с покрытиями TiN и TiCN максимальна при твёрдости «ролика» HB 179. При дальнейшем возрастании твёрдости «ролика» интенсивность изнашивания «колодок» снижается, а работоспособность накатных роликов возрастает. У «колодок» с покрытием TiZrN наблюдается линейное изменение интенсивности изнашивания с увеличением твёрдости «ролика» в диапазоне HB 163-187.

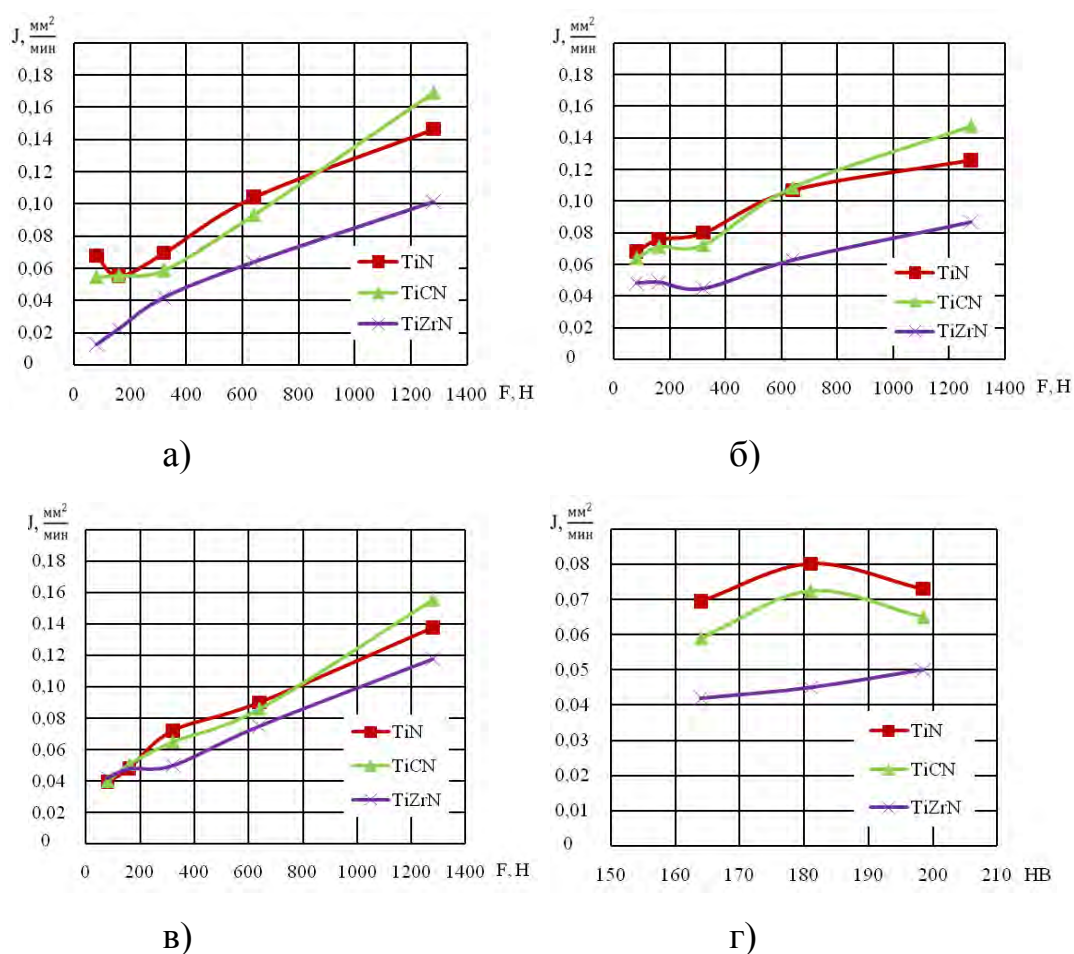


Рисунок 4.34 – Влияние усилия прижатия  $F$  и твёрдости «ролика» HB на интенсивность его изнашивания  $J$ :

- а) HB 152-172;  $V = 0,042$  м/с; б) HB 173-189;  $V = 0,042$  м/с;  
 в) HB 190-207;  $V = 0,042$  м/с; г)  $F = 320$  Н;  $V = 0,042$  м/с

В процессе исследования установлено, что интенсивность изнашивания образцов, как с покрытием, так и без, зависит от твёрдости обрабатываемого материала. При этом оптимальной твёрдостью обрабатываемого материала является твёрдость в диапазоне 170-183 НВ. Покрытие, показавшее наилучший результат по приросту площади пятна контакта, является TiZrN.

Таким образом, в результате проведения лабораторных испытаний выявлено, что интенсивность изнашивания износостойких покрытий из TiZrN в 1,2 и в 1,4 раза ниже по сравнению с покрытиями TiN, TiCN соответственно.

#### **4.4.2 Определение оптимальных параметров по моменту трения покрытий (P6M5, TiN, TiCN, TiZrN)**

В качестве параметра оптимизации  $Y$  был принят момент трения  $M_{тр}$  как объект исследования, а в качестве варьируемых факторов  $X_1$  – твёрдость заготовки, НВ,  $X_2$  – усилие прижатия образца, Н,  $X_3$  – скорость перемещения образца, м/с. Квадратичную модель уравнений регрессии и значения коэффициентов регрессии рассчитывали с помощью прикладных программ для ПЭВМ MathCAD 14, «Statistika-6» [166-169].

При исследовании прямолинейности шлиц использовали метод планирования полного факторного эксперимента (при  $k = 3$ ) [132, 133]. Значения варьируемых факторов и матрица планирования приведены в таблицах 4.3 и приложение В таблица В.1.

Исследование влияния твёрдости заготовки, усилия и скорости деформирования на момент трения  $M_{тр}$  инструмента о заготовку при нанесении на инструмент износостойких покрытий (P6M5, TiN, TiCN, TiZrN) показало, что с увеличением независимых факторов момент трения так же возрастает.

После обработки результатов проведённых опытных экспериментов по моменту трения при накатывании шлицевых валов, были получены следующие уравнения регрессии в натуральных значениях факторов (прил. В уравнения В.1-В.16).

Таблица 4.3 – Значения варьируемых факторов

| Твёрдость заготовки, HB             |                                     | Усилие F, Н                         |                                      | Скорость $v$ , м/с                  |   |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|
| Кодированное значение фактора $X_1$ | Действительное значение фактора, HB | Кодированное значение фактора $X_2$ | Действительное значение фактора F, Н | Кодированное значение фактора $X_3$ | Действительное значение фактора $v$ , м/с |
| -1                                  | 164                                 | -1                                  | 80                                   | -1                                  | 0,042                                     |
| -0,014                              | 181                                 | -0,867                              | 160                                  | -0,865                              | 0,085                                     |
| +1                                  | 198,5                               | -0,600                              | 320                                  | -0,598                              | 0,170                                     |
|                                     |                                     | -0,067                              | 640                                  | -0,068                              | 0,339                                     |
|                                     |                                     | +1                                  | 1280                                 | +1                                  | 0,679                                     |

Рассмотрим уравнение (В.1) приложение В для Р6М5 от взаимодействия твёрдости  $HB$ , усилия  $F$  и скорости  $v$ :

$$M_{тр} = 12,0053 - 0,1309 \cdot HB - 2,9080 \cdot 10^{-4} \cdot F - 0,4631 \cdot v + 9,5104 \cdot 10^{-7} \cdot HB \cdot F + \\ + 1,8953 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v + 6,7401 \cdot 10^{-4} \cdot F \cdot v - 3,8903 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F \cdot v + 3,6536 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 + \\ + 5,8129 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 + 0,3939 \cdot v^2$$

где  $M_{тр}$  – момент трения, Н·м;  $HB$  – твёрдость заготовки;  $F$  – усилие, Н;  $v$  – скорость, м/с.

Корреляционное отношение  $\eta = 0,989$  (см. приложение В таблица В.2).

Табличное значение критерия Стьюдента  $t$  при уровне значимости 0,01 и степени свободы  $\nu_t = N - 1 = 75 - 1 = 74$  равно  $t_T = 2,65$  [76],  $t_P = 57,41$  (см. приложение В таблица В.2). Неравенство  $t_P > t_T$  подтверждает достоверность вычисленного отношения.

Расчётное значение критерия Фишера  $F$  для уравнения (В.1) приложение В равно  $F_P = 288,9$ , что меньше табличного значения  $F_T = 2,70$  при уровне значимости 0,01, при степенях свободы:

$$\nu_l = k - 1 = 11 - 1 = 1;$$

$$\nu_2 = n - k = 75 - 11 = 84.$$

Это доказывает адекватность данной математической модели.

Табличное значение критерия Кохрена  $G_T$  при доверительной вероятности  $\gamma_D = 0,95$  и числе степеней свободы:

$$\nu_u = u - 1 = 3 - 1 = 2;$$

$$v_{3n} = n - 1 = 75 - 1 = 74,$$

где  $u$  – число повторений опыта в каждой точке плана эксперимента,  $u = 3$ ,  $G_T = 0,62$ . Расчётное значение критерия равно  $G_T = 0,4932$ . Неравенство  $G_T > G_p$  свидетельствует о воспроизводимости результатов измерений.

Графические изображения поверхностей отклика от взаимодействия твёрдости заготовки, усилия и скорости приведены на рисунках Г.1-Г.12 приложение Г. Рисунок Г.1 приложение Г показывает, что данная поверхность вогнутая и имеет оптимальное значение по моменту трения, расположенной в центре нижней области поверхности отклика.

Уравнение (В.1) приложение В в кодированных значениях факторов при среднем значении скорости  $v_{cp} = 0,263$  м/с имеет вид (формула В.17 приложение В):

$$y = 0,4883 + 0,0315 \cdot x_1 + 0,3984 \cdot x_2 + 0,1052 \cdot x_1^2 - 0,0005 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,2091 \cdot x_2^2.$$

Коэффициенты уравнения показывают, что в рассматриваемом случае из линейных членов наибольшее влияние на параметр оптимизации оказывает усилие  $x_1$ , а наименьшее взаимодействие факторов  $x_1 x_2$ . Из нелинейных членов уравнения значительное влияние на параметр оптимизации оказывает также возведённое в квадрат усилие, а наименьшее возведённая в квадрат твёрдость заготовки, причём при увеличении твёрдости заготовки и усилия параметр оптимизации увеличивается. Взаимодействие факторов оказывает незначительное влияние.

Для каждой из полученных математических моделей был проделан аналогичный анализ и расчёт коэффициент корреляции по приведённому выше алгоритму, проверка с помощью критериев Стьюдента, Фишера, Кохрена таблица В.2, приложение В.

Анализ полученных значений критериев и сравнение их с табличными значениями показали адекватность полученных математических моделей, точность расчётов и достоверность проведённых экспериментов.

#### 4.4.3 Анализ математических моделей момента трения с помощью двумерных сечений

Для двухмерного сечения поверхности отклика от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (Р6М5) на момент трения  $M_{тр}$ , определим центр поверхности дифференцируя уравнение (В.17) приложение В:

$$Y = 0,4883 + 0,0315 \cdot x_1 + 0,3984 \cdot x_2 + 0,1052 \cdot x_1^2 - 0,0005 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,2091 \cdot x_2^2,$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial x_1} = 0,0315 + 0,2104 \cdot x_1 - 0,0005 \cdot x_2 = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial x_2} = 0,3984 - 0,0005 \cdot x_1 + 0,4182 \cdot x_2 = 0 \end{cases}$$

$$x_{1S} = -0,1522; x_{2S} = -0,9528$$

После подстановки полученных значений  $x_{1S}$  и  $x_{2S}$  в уравнение (В.17) прил. В получаем значения минимального момента трения в центре поверхности  $Y_{Smin} = 0,296$  Н·м.

Проведём каноническое преобразование уравнения (В.17) приложение В, для чего решим характеристическое уравнение (3.20):

$$B^2 - B(0,1052 + 0,2091) + (0,1052 \cdot 0,2091 - 0,25 \cdot (-0,0005^2)) = 0,$$

окончательно имеем:

$$B^2 - 0,3143 \cdot B + 0,0220 = 0.$$

Корнями данного характеристического уравнения будут:

$B_{11} = 0,209$  и  $B_{22} = 0,105$ , а само уравнение (В.17) приложение В в канонической форме имеет вид:

$$Y_{12} - 0,2981 = 0,209 \cdot X_1^2 + 0,105 \cdot X_2^2.$$

Точность расчётов подтверждаем проверкой:

$$\sum_1^2 b_{ii} = 0,1052 + 0,2091 = 0,314;$$

$$\sum_1^2 B_{ii} = 0,209 + 0,105 = 0,314.$$

Определим угол поворота осей координат в точке  $S$  по формуле:

$$\tan 2\alpha = \frac{b_{ij}}{b_{ii} - b_{jj}} = \frac{-0,0005}{0,1052 - 0,2091} = 0,0048^\circ$$

$$\alpha = 0,138^\circ.$$

Так как угол  $\alpha$  отрицательный, то оси следует повернуть по часовой стрелке относительно центра двухмерного сечения поверхности отклика. Расчёты для остальных уравнений проводились аналогично.

Результаты расчётов по определению центров поверхностей, представлены в таблице В.3, В.4 приложение В.

По таблице В.4 на проекции поверхностей отклика на плоскость, были нанесены точка  $S$  центр поверхности отклика и координатные оси главных направлений канонического уравнения (рисунок Д.1 приложение Д)

Результаты анализа полученных математических моделей момента трения с помощью двухмерных сечений, проведённого по изложенной методике, представлены в приложении Д.

Графики изображение семейства кривых, построенных решением полученных канонических уравнений, представлены на рисунках Д.1-Д.12 приложения Д.

Рисунок Д.1 приложения Д свидетельствует о том, что оптимальный момент трения в рассматриваемом сечении поверхности равен  $0,296 \text{ Н}\cdot\text{м}$  и имеет место при усилии  $F = 108,2 \text{ Н}$  и твёрдости  $HB 178,6$ .

Аналогичный анализ проведён для остальных двухмерных сечений поверхностей отклика характеризующих моменты трения  $M_{\text{тр}}$  при различных взаимодействиях факторов для покрытий P6M5, TiN, TiCN, TiZrN.

#### **4.5 Результаты лабораторных исследований остаточных напряжений в накатных роликах и их анализ**

Остаточные напряжения возникают в большинстве технологических операциях и по величине могут превосходить напряжения от внешних нагрузок. Во многих случаях разрушение деталей при переменных нагрузках связано с действием растягивающих остаточных напряжений [170]. В ряде случаев остаточные напряжения являются полезными особенно для поверхностных слоёв.

Основным методом определения остаточных напряжений является рентгеновский. Этот метод даёт возможность непосредственно измерять деформацию



кристаллической решётки при воздействии напряжений. Изучение проводится в небольшой области в местах концентрации напряжений.

Остаточные напряжения оценивали на дифрактометре «ДРОН-3М» с использованием фильтрованного  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучения [170]. Исследованию подвергали новые образцы накатных роликов без покрытия, образцы разрушенного накатного ролика без покрытия, изношенного накатного ролика без покрытия, так же аналогичные образцы с покрытием TiZrN.

С помощью дифрактометра «ДРОН-3М» и ЭВМ IBM PC были получены и обработаны результаты исследованных параметров (таблица 4.4):

- период кристаллической решётки  $a$ ;
- показатель текстурированности – отношение интенсивностей рентгеновских линий  $J_{111} / J_{200}$ ;
- истинное физическое уширение рентгеновской линии  $\beta_{111}$ , характеризующее степень дефектности структуры покрытия;
- остаточные напряжения первого рода  $\sigma_0$ .

Образцы исследовались по рабочим коническим поверхностям накатного ролика с обеих сторон. В результате исследований получили диаграммы содержания карбидов в поверхностном слое накатного ролика (рисунок 4.35-4.40).

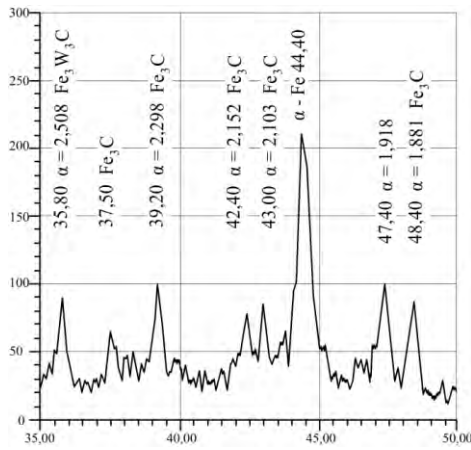
Как видно из графиков карбиды симметрично расположены как с левой стороны накатного ролика, так и справа. На всех образцах без покрытия виден всплеск  $\alpha\text{-Fe}$  (рисунок 4.35-4.37), и всплеск излучения TiZrN на образцах с покрытием (рисунок 4.38-4.40). Данные всплески так же расположены симметрично с обеих сторон. Данные всплески свидетельствуют о попадании материала заготовки в микротрещины рабочей части накатного ролика, что способствует ускорению процесса разрушения накатного ролика.

Наличие остаточных напряжений сжатия, способствуют увеличению прочности накатных роликов, увеличению его стойкости. Экспериментальные исследования в этой области показали, что с увеличением постоянных растягивающих напряжений предел выносливости уменьшается, постоянные сжимающие напряжения, наоборот, сказываются благоприятно.

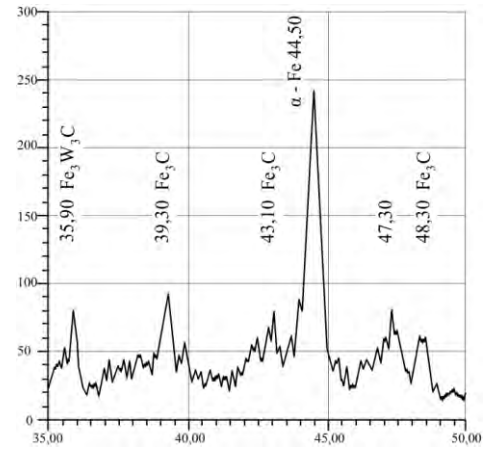
Таблица 4.4 – Структурные параметры и механические свойства образцов накатных роликов при исследовании на дифрактометре «ДРОН-3М»

| Номер образца | Род износа               | Структурные параметры                   |   |                                     | Остаточные напряжения $\sigma_0$ , кг/мм <sup>2</sup> |             |
|---------------|--------------------------|---|---|-------------------------------------|---|-------------|
|               |                          | Период кристаллической решётки $a$ , нм | Полуширина рентгеновской линии $\beta$ , град | Параметр текстуры $J_{111}/J_{200}$ | $\alpha - Fe$   | $TiZrN$     |
| •1            | Новый                    | –                                       | –   | –                                   | –96,3±15,7  | –           |
| 1             |                          | –                                       | –   | –                                   | –93,9±21,5  | –           |
| •2            | Без покрытия разрушенный | –                                       | –   | –                                   | –20,0±7,3   | –           |
| 2             |                          | –                                       | –   | –                                   | –22,4±6,4   | –           |
| •3            | Без покрытия изношенный  | –                                       | –   | –                                   | –1,1±8,1  |             |
| 3             |                          | –                                       | –   | –                                   | –3,4±6,6  |             |
| •4            | С покрытием новый        | 0,42484                                 | 0,43  | 8,2                                 | –63,0±0,3   | –100,3±4,7  |
| 4             |                          | 0,42484                                 | 0,57  | 3,7                                 | –64,4±1,8   | –101,5±19,4 |
| •5            | С покрытием разрушенный  | 0,42560                                 | 0,54  | 5,9                                 | –15,1±2,8   | –99,8±19,9  |
| 5             |                          | 0,42588                                 | 0,52  | 7,7                                 | –3,4±2,1  | –99,7±3,2   |
| •6            | С покрытием изношенный   | 0,42512                                 | 0,59  | 3,9                                 | +6,2±4,4  | –102,6±12,4 |
| 6             |                          | 0,42536                                 | 0,51  | 5,0                                 | +11,7±4,6   | –73,6±20,4  |

Примечания • – левая сторона конуса накатного ролика; без обозначения – правая сторона конуса накатного ролика.

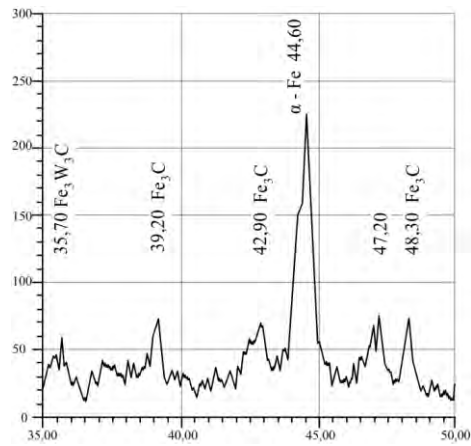


а)

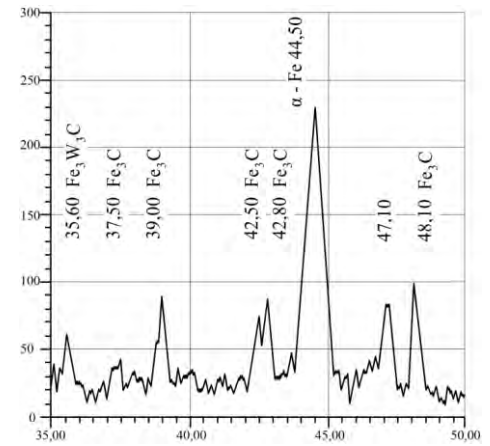


б)

Рисунок 4.35 – Диаграммы содержания карбидов на поверхности нового инструмента без покрытия (накатного ролика): а) левая сторона; б) правая сторона

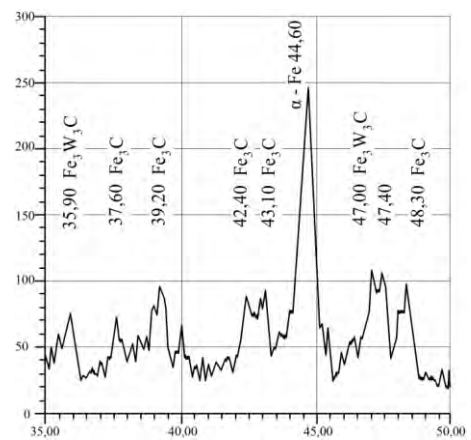


а)

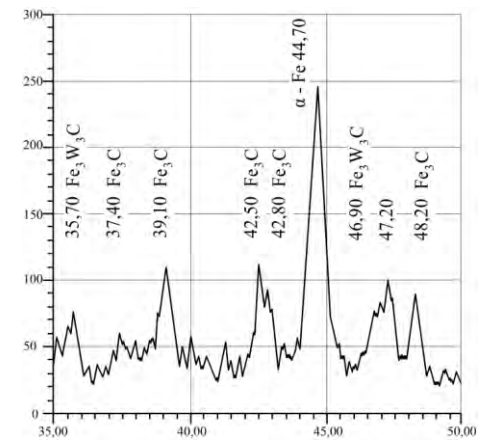


б)

Рисунок 4.36 – Диаграммы содержания карбидов на поверхности разрушенного инструмента без покрытия (накатного ролика): а) левая сторона; б) правая сторона

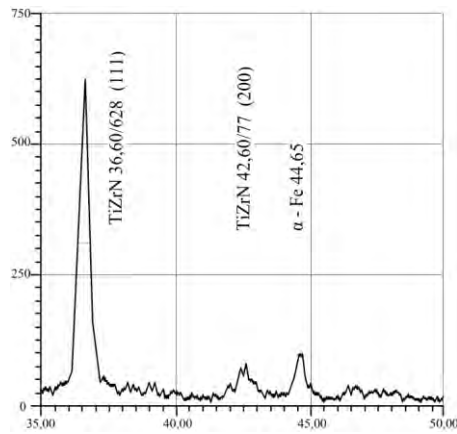


а)

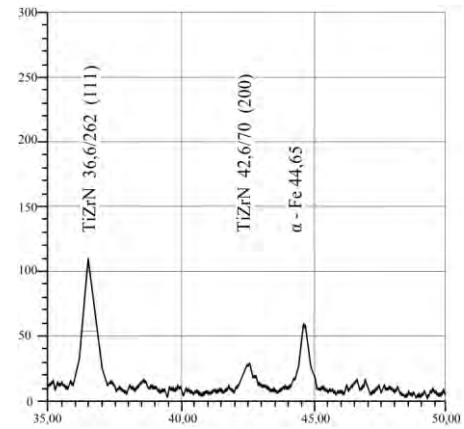


б)

Рисунок 4.37 – Диаграммы содержания карбидов на поверхности изношенного инструмента без покрытия (накатного ролика): а) левая сторона; б) правая сторона

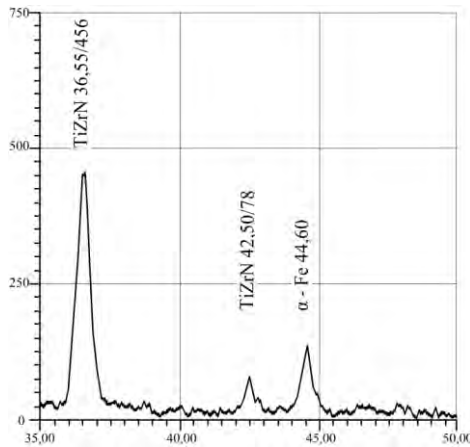


а)

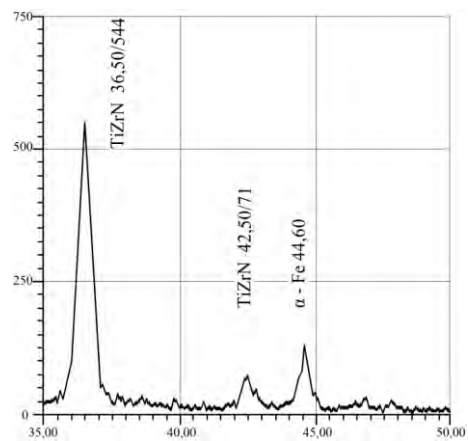


б)

Рисунок 4.38 – Диаграммы содержания карбидов на поверхности изношенного инструмента с покрытием (накатного ролика): а) левая сторона; б) правая сторона

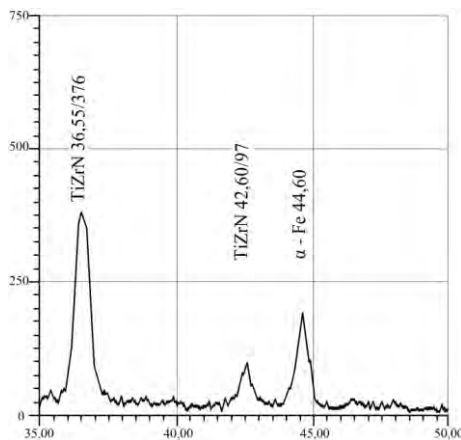


а)

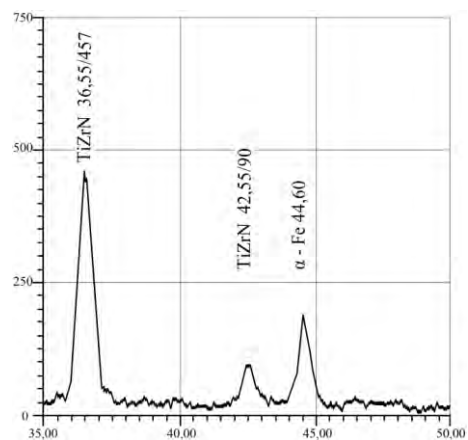


б)

Рисунок 4.39 – Диаграммы содержания карбидов на поверхности изношенного инструмента с покрытием (накатного ролика): а) левая сторона; б) правая сторона



а)



б)

Рисунок 4.40 – Диаграммы содержания карбидов на поверхности нового инструмента с покрытием (накатного ролика): а) левая сторона; б) правая сторона

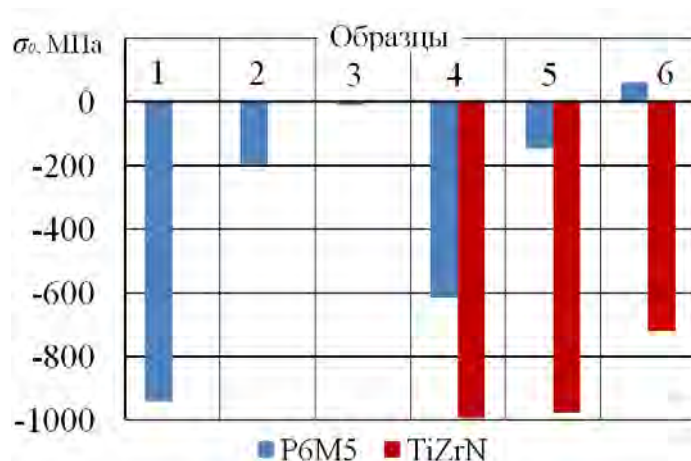


Рисунок 4.41 – Концентрация остаточных напряжений в инструменте (P6M5) и в покрытии (P6M5+TiZrN)

Результаты измерения остаточных напряжений приведены на рисунке 4.41 и таблице 4.4.

Разрушение представляет собой прогрессивное развитие трещин. Образование же трещины и её дальнейшее развитие, затрудняется при действии сжимающих напряжений.

В отличие от внешних напряжений остаточные напряжения сами изменяются под действием циклических нагрузок, что особенно важно для накатных роликов, которые испытывают циклические нагрузки во время своей работы.

Уменьшение остаточных напряжений при действии переменных напряжений было обнаружено рядом исследователей [170]. Уменьшение остаточных напряжений особенно интенсивно происходит при первых циклах нагружений.

Это подтверждается тем, что новый ролик имеет остаточные напряжения от -940 до -960 МПа, а изношенный от -10 до -35 МПа. При этом разрушенный накатной ролик, вышедший из рабочего состояния из-за излома, имеет не израсходованный потенциал остаточных напряжений от -200 до -225 МПа. На роликах с покрытием видно, что нанесённое износостойкое покрытие TiZrN имеет остаточное напряжения от -998 до -1026 МПа, что свидетельствует о повышении работоспособности накатных роликов. Хотя сам процесс нанесения износостойких покрытий усугубляет состояние материала подложки (накатного ролика). Остаточные напряжения здесь значительно снижаются, что отражается на поломке

накатного ролика без видимого износа его контактных поверхностей. Такое снижение остаточных напряжений связано с режимами нанесения износостойких покрытий и определяется технологией.

Так же следует отметить, что снижение остаточных напряжений в большей степени проявляются в поверхностных слоях, т. к. они являются более ослабленными. Но если суммарные напряжения не превосходят предел упругости материала, то остаточные напряжения мало изменяются при действии переменных напряжений.

На основании экспериментальных исследований выявлено, что сжимающие остаточные напряжения повышают усталостную прочность, тогда как растягивающие остаточные напряжения действуют неблагоприятно. Влияние остаточных напряжений на выносливость зависит от механических свойств материала и характера напряжённого состояния.

Необходимо так же отметить, что влияние остаточных напряжений на выносливость может не проявиться, если в процессе нагружения инструмента имелось хотя бы несколько циклов повышения напряжений, при которых возникает пластическая деформация.

#### **4.6 Выводы**

1. Установлено, что основной причиной выхода роликов из строя является его поломка (исключая аварийные поломки в результате неправильной эксплуатации) обусловленная как энергосиловой схемой процесса и напряженным состоянием ролика, так и качеством металла, из которого ролики изготовлены, его структурным состоянием и физико-механическими свойствами.

При анализе вышедших из строя роликов были установлены три основных вида разрушений, возникающих вследствие как отдельного, так и совокупного действия указанных выше причин: 1. Сквозные радиальные трещины; 2. Угловые поперечные трещины и выкрашивания по режущей кромке ролика; 3. Кольцевые отслоения по рабочему профилю ролика (усталостные разрушения).

2. Установлено, что повышения сопротивление материала ролика, образованию кольцевых отслоений, карбидная сетка должна располагаться перпендикулярно оси накатного ролика.

3. Для снижения поверхностных микротрещин, необходимо наносить на контактные поверхности накатного ролика, плёночные износостойкие покрытия с низким коэффициентом трения. Снижение контактного трения (с 0,7 до 0,12) снижает напряжённое состояние, как заготовки, так и инструмента на 10...20 %. Снижение коэффициента контактного трения так же снижает изгибные напряжения в накатном ролике путём уменьшения общего усилия деформирования и увеличивает точность шлицевых профилей.

## 5 Опытнo-промышленная проверка стандартных и исследовательских шлиценакатных роликов в условиях массового производства на стабильность процесса шлиценакатывания и точность шлицев на валах

### 5.1 Механизм разрушения шлиценакатных роликов с износостойкими покрытиями, полученными методом КИБ

Опытнo-промышленную проверку шлиценакатных роликов с разработанной технологиейковки и износостойкими покрытиями в условиях массового производства на стабильность процесса шлиценакатывания и точность шлицев на валах проводили в производственных условиях ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска. Накатывание шлицевого профиля осуществлялось накатными роликами из быстрорежущей стали P6M5 с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN (рисунок 5.1) на заготовках из стали 45 с исходной твёрдостью HB 156-207 (число шлицев  $z = 16$ ) при следующих режимах: средняя скорость деформирования –  $V_{cp} = 0,0387$  м/с, давление в гидросистеме стана –  $P_{cp}$ . от 1 до 10 МПа, первоначальная длина деформируемого участка –  $l_{деф.} = 0,0655$  м, время прохода –  $t_{деф.} = 66$  с, диаметр накатного ролика –  $D_{рол.} = 0,08$  м, диаметр заготовки –  $D_{заг.} = 0,0381$  м.



Рисунок 5.1 – Накатные ролики из быстрорежущей стали P6M5 с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN



Результаты испытаний и стойкости накатных роликов приведены в приложении Е.



Рисунок 5.2 – Частота выхода накатных роликов из строя

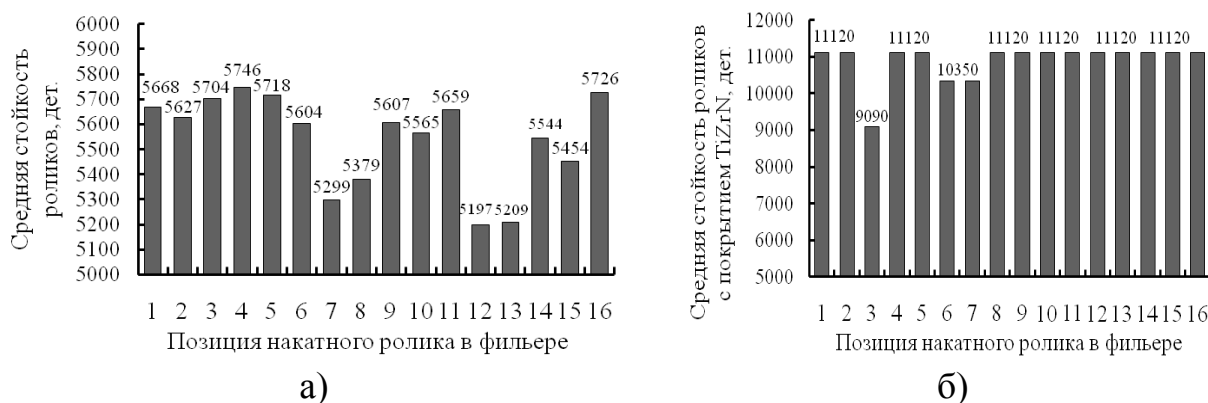


Рисунок 5.3 – Средняя стойкость накатных роликов:

а) без покрытия; б) с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

Как видно из приведённых данных (рисунок 5.2 и 5.3) в период с 24.09.07 по 18.11.09, средняя стойкость накатных роликов без покрытия составляла 5544 накатанных деталей. С применением однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN стойкость составила 10897 деталей, при этом коэффициент повышения стойкости накатных роликов  $K_T = 1,92$  (приложение И).

Исследование механизма изнашивания и период стойкости шлиценакатных роликов с покрытиями, полученными методом КИБ проводили по количеству накатанных валов.

Исследования показали, что основной причиной выхода роликов из строя, является его поломка. Для создания высокостойкого шлиценакатного инструмен-

та актуальной задачей, как говорилось выше, является отодвинуть момент возникновения усталостных трещин. Одним из путей для реализации этой задачи является использование в качестве барьера между инструментом и обрабатываемым материалом износостойкого покрытия, обладающего высокой твёрдостью, энергоёмкостью, мелкозернистой структурой с минимальным количеством дефектов.

Результаты исследований показали, что процесс разрушения накатного ролика с покрытием характеризуется образованием большого числа микротрещин. Микротрещины образуются по межзёренным границам [158, 159]. Так же как и на самом накатном ролике микротрещины возникают симметрично на боковых поверхностях рабочего профиля на расстоянии, примерно равном глубине поперечного внедрения накатного ролика в заготовку.

Согласно данным работ [105, 106, 120, 158, 159] разрушение покрытий начинается с поверхности инструмента либо на границе «покрытие – инструментальная основа» (рисунок 5.4). Трещины зарождаются на межзёренных границах и растут в подложку по границам раздела, что облегчает отрыв частиц покрытия. Образование трещин происходит и под покрытием вследствие деформации поверхностных слоёв инструментального материала (рисунок 5.5).

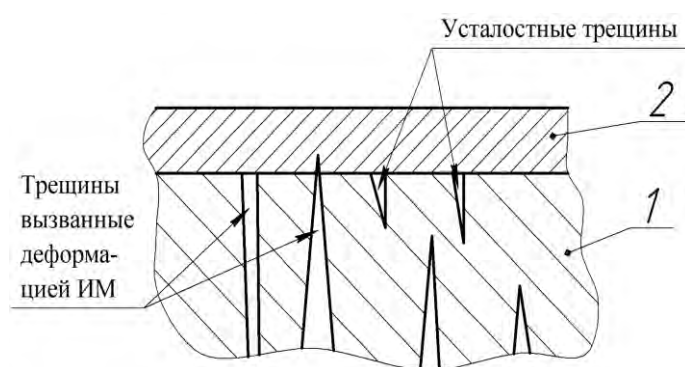


Рисунок 5.4 – Зарождение трещин в накатном ролике Р6М5 (1) с многокомпонентным покрытием TiZrN (2)

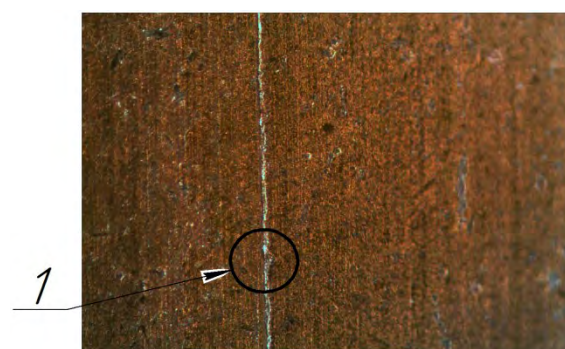


Рисунок 5.5 – Проявление кольцевой трещины (1) под плёночным покрытием TiZrN на конической поверхности накатного ролика ( $\times 130$ )

Установлено, что разрушение инструмента с покрытием начинается с образования радиальных трещин в материале ролика на расстоянии равном заглублению инструмента при накатывании. По мере накатывания шлицев радиальные микротрещины переходят в покрытие. Впоследствии, с увеличением времени работы, в ролике и покрытии образуются поперечные трещины, расположенные по кольцу, в результате возникает сетка трещин 3 (рисунок 5.6). Это приводит к разбиению конусной части ролика на отдельные фрагменты, которые работают по отдельности и не выдерживают прикладываемых напряжений на них со стороны обрабатываемого материала, что приводит к разрушению материала накатного ролика, сходу покрытия 1 и обнажению инструментальной основы 2 (рисунок 5.6).

Одновременно с образованием сетки трещин, в результате действия циклических нагрузок, на поверхности накатного ролика наблюдаются появление радиальных трещин, на расстоянии заглубления инструмента при накатывании. Трещины сливаются в единую кольцевую 4 (рисунок 5.6) и дальнейшее разрушение накатных роликов с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN происходит также, как и на накатных роликах без покрытий.

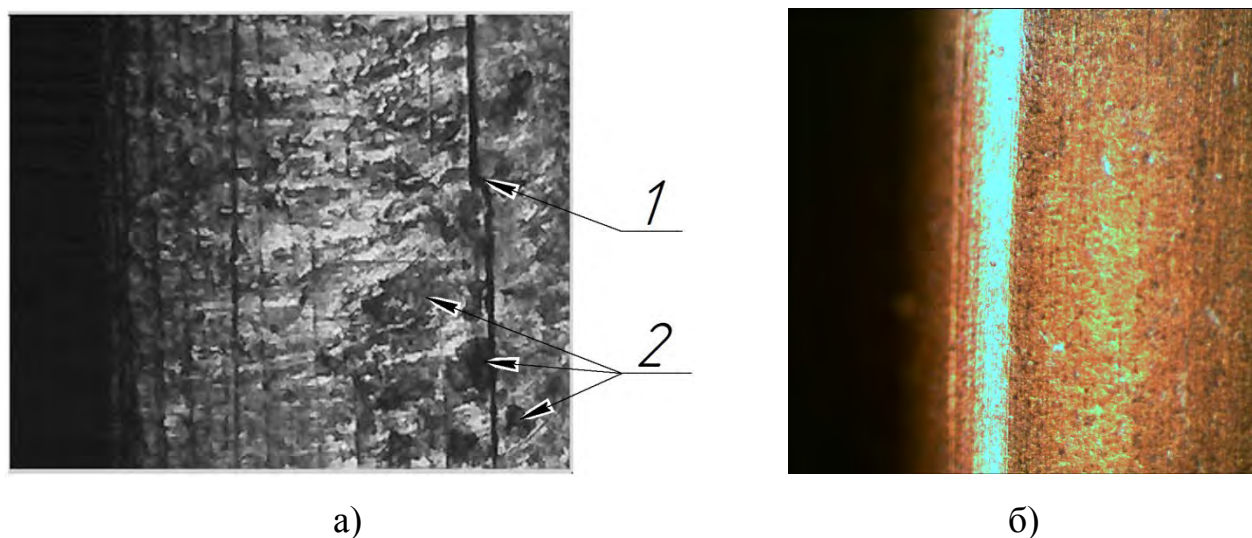


1 – плёночное покрытие TiZrN; 2 – инструментальный материал Р6М5;

3 – сетка трещин; 4 – кольцевая трещина

Рисунок 5.6 – Отслоение покрытий на конической части накатного ролика ( $\times 130$ )

Из рисунка 5.7 видно, что износ по конической части накатного ролика без покрытия, при накатывании около 6000 шлицевых валов, является катастрофическим (рисунок 5.7,а). Из рисунка видна образовавшаяся кольцевая трещина 1, ведущая к поломке накатного ролика, а так же видны элементы выкрашивания 2 по режущей кромке. На накатном ролике с покрытием (рисунок 5.7,б) этого не наблюдается, заметны только начало отслоение покрытия в некоторых областях боковой поверхности. По режущей кромке так же не наблюдается явных выкрашиваний, но заметно начало зарождения трещины под покрытием [171].



1 – кольцевая трещина; 2 – выкрашивание материала накатного ролика  
 Рисунок 5.7 – Износ конической поверхности накатного ролика после накатывания 6000 валов: а) без покрытия; б) с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

В результате проведённых экспериментов установлено, что работоспособность инструмента тем выше, чем больше энергоёмкость материала покрытия. Выявлено, что трещиностойкость зависит от энергоёмкости материала накатного ролика и циклических нагрузок со стороны заготовки. Установлено, что разрушение накатного ролика без покрытий, происходит при достижении циклических нагрузок в 240 циклов, а роликов с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN до 400 циклов.

Анализ результатов исследований разрушения накатных роликов с покрытием при накатывании шлицевых профилей на валах, позволят сделать вывод, что наибольшей эффективностью в данных условиях работы инструмента обладают многокомпонентные однослойные покрытия, имеющие высокую трещиностойкость и коэффициентом отслоения. Так же эти покрытия обладают высокой стойкостью к окислительному износу, объясняемой высокой термостабильностью нитридов и карбидов [162, 172-174].

Таким образом, в результате проведенных исследований установлен, что при использовании однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN, повышает работоспособность накатных роликов в 1,92 раза.

## **5.2 Промышленная проверка по влиянию шлиценакатных роликов с износостойкими покрытиями на точность шлицев на валах**

Для оценки влияния однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN на параллельности шлицевого профиля относительно оси детали и толщине, проводили обмеры шлицевых валов на прямолинейность и толщину (приложение Ж таблица Ж.1). По результатам обмеров были построены диаграммы (приложение Ж), где 1-16 – порядковый номер шлица; поле допуска отклонений по параллельности 0-0,04 мм, по толщине  $3,5_{-0,078}^{+0,03}$  ГОСТ 1139-80; ——— отклонение от параллельности на расстоянии 10 мм от торца заготовки; — — — отклонение от параллельности на расстоянии 15 мм от торца заготовки; — · — отклонение от параллельности на расстоянии 30 мм от торца заготовки; —○— отклонение от параллельности на расстоянии 50 мм от торца заготовки; ——— отклонение от параллельности на расстоянии 70 мм от торца заготовки.

Сравнивая полученные диаграммы шлицевого профиля полученного накатными роликами с покрытием и без покрытия (рисунок 5.8) можно сделать вывод, что выход показаний параллельности шлиц за пределы поля допуска у шлицевого профиля накатанного роликами без применения покрытий выше чем у накатных роликов с покрытиями (рисунок 5.8). Сравнивая диаграммы по толщине шлиц

(рисунок 5.9) видно, что толщина шлиц накатанных роликами без покрытий находится ниже поля допуска. Это связано с отклонениями накатного ролика во время деформирования от прямолинейного состояния. При накатывании шлицевого профиля роликами с покрытием TiZrN толщина шлиц находится в поле допуска (рисунок 5.9,б). Это связано со снижением трения в зоне контакта накатного ролика с материалом заготовки за счёт нанесения однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN с низким коэффициентом трения [98, 175].

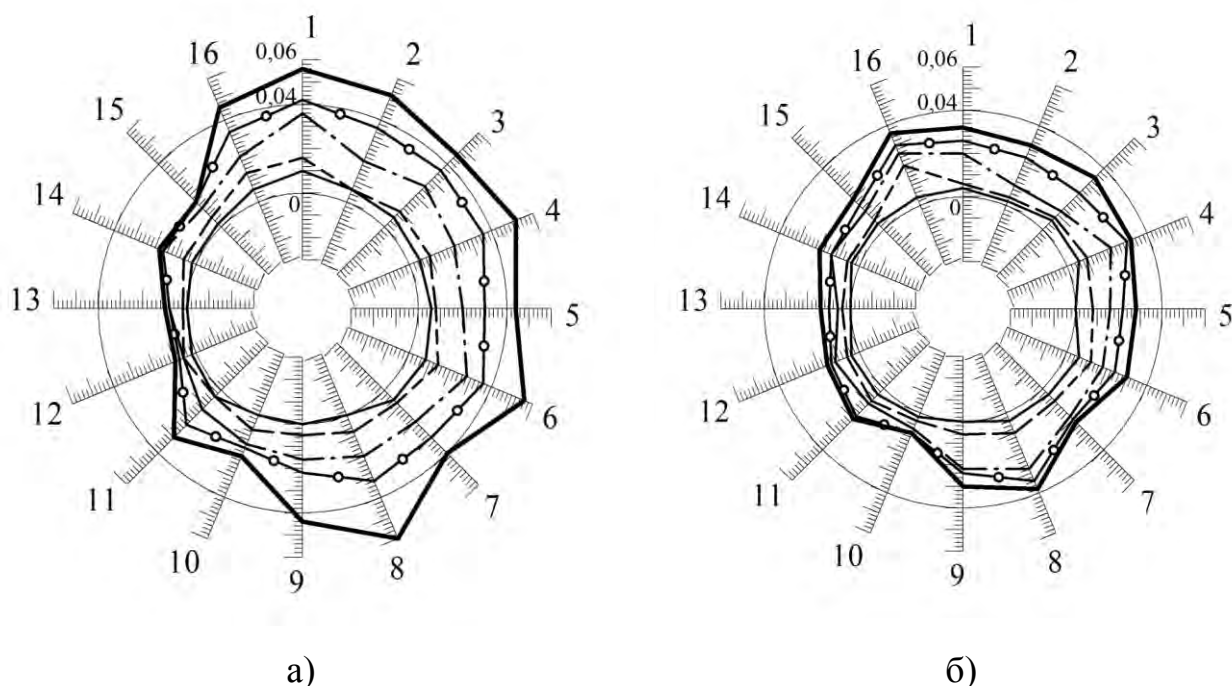
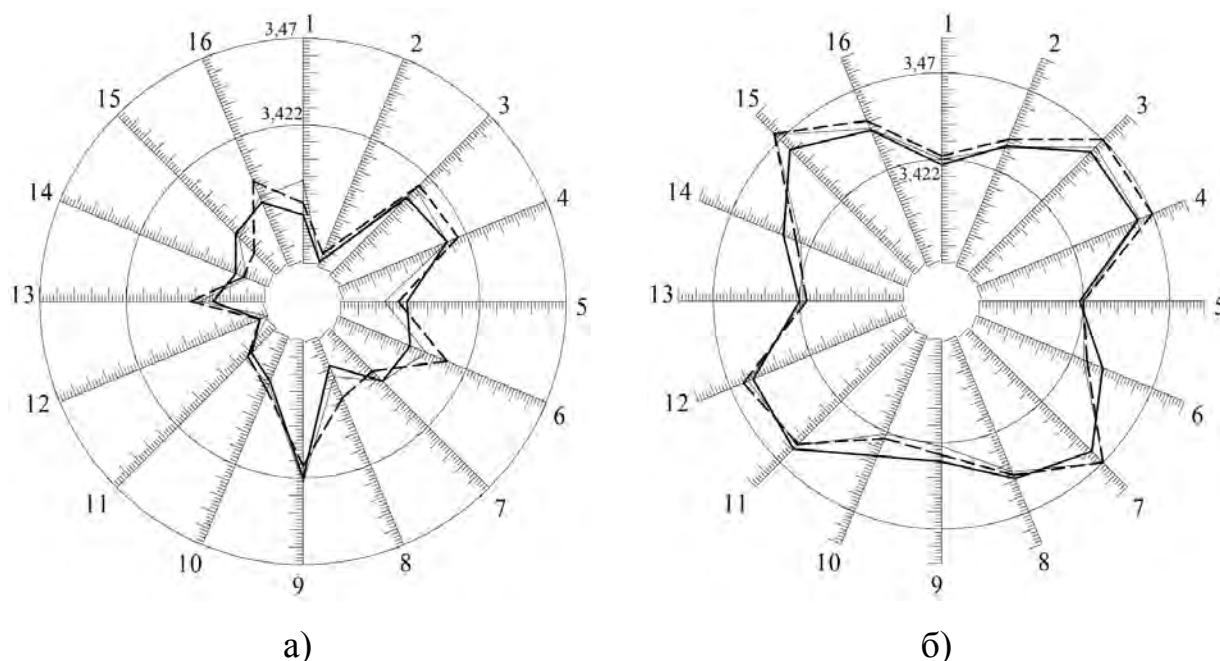


Рисунок 5.8 – Диаграмма параллельности шлиц при твёрдости вала HB 190-207  
а) Без покрытия; б) С однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

При снижении коэффициента трения в зоне контакта рабочих поверхностей накатного ролика и заготовки, снижается момент закручивания накатного ролика и усилие, приходящееся на деформирование. Это обеспечивает повышение точности шлиц, как по длине, так и по толщине зубьев, а так же позволяет перейти по точности шлицевых профилей на 8-ую степень точности.



— толщина шлиц на расстоянии 10 мм от торца заготовки;  
 — — — толщина шлиц на расстоянии 40 мм от торца заготовки;  
 - - - толщина шлиц на расстоянии 70 мм от торца заготовки.

Рисунок 5.9 – Диаграмма толщины шлиц при твёрдости вала HB 156-172:  
 а) Без покрытия; б) С однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

Таким образом, наносимое однослойное многокомпонентное покрытие TiZrN не только повышает работоспособность накатных роликов в 1,92 раза, но и повышает точность шлицевого профиля на валах, что ведёт к повышению качества шлицевых валов и возможность изготавливать шлицевый профиль по 8-ой степени точности.

### 5.3 Технико-экономическое обоснование применения накатных роликов с износостойкими покрытиями

Введение дополнительной операции нанесения износостойких покрытий в технологический процесс изготовления накатных роликов неизбежно приводит к его удорожанию. Поэтому расчёт должен проводиться с учётом затрат, связанных с подготовкой накатных роликов к нанесению износостойких покрытий, стоимо-



сти эксплуатации оборудования, заработной платы рабочих, затрат на амортизацию и ремонт оборудования и помещений.

Годовой экономический эффект при увеличении срока службы выпускаемой продукции рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_z = A(K \cdot C_{\bar{o}} - C_n), \quad (5.1)$$

где  $A$  – годовая программа изготовления накатных роликов на один стан, комплектов,  $A = 21$ ;  $K$  – коэффициент увеличения срока службы накатных роликов,  $K = 1,92$ ;  $C_{\bar{o}}$  и  $C_n$  – себестоимость единицы продукции по базовому и новому вариантам, руб.

$C_{\bar{o}} = 92158$  руб. – рассчитывалась на ОАО «Автодеталь-Сервис».

Себестоимость единицы продукции представим в виде:

$$C_n = C_{\bar{o}} + C_d, \quad (5.2)$$

где  $C_d$  – дополнительные затраты связанные с нанесением износостойкого покрытия, руб.

Дополнительные затраты связанные с нанесением износостойкого покрытия, можно определить по формуле:

$$C_d = N(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7), \quad (5.3)$$

где  $N$  – количество установов инструмента в камеру, шт.,  $N = 2$ ;  $C_1$  – затраты на оплату труда, руб.;  $C_2$  – начисление на оплату труда, руб.;  $C_3$  – накладные расходы, руб.;  $C_4$  – стоимость основных осаждаемых материалов, руб.,  $C_4 = 870$  руб.;  $C_5$  – расходы на коммунальные услуги и арендную плату, руб.,  $C_5 = 540$  руб.;  $C_6$  – прочие прямые расходы, руб.,  $C_6 = 182$  руб.;  $C_7$  – плановая прибыль от договорной цены, руб.

Затраты на оплату труда определяем из выражения:

$$C_1 = C_{осн} \cdot K_{дон} \cdot K_{соц}, \quad (5.4)$$

где  $C_{осн}$  – основная зарплата, руб.,  $C_{осн} = 665$  руб.;  $K_{дон}$  – коэффициент, учитывающий дополнительную зарплату производственных рабочих,  $K_{дон} = 1,03$ ;  $K_{соц}$  – коэффициент, учитывающий начисления по социальному страхованию,  $K_{соц} = 1,26$ .

$C_1 = 1,03 \cdot 1,26 \cdot 665 = 863,04$  руб.



$$C_2 = \frac{C_1 \cdot K_{OT}}{100}, \quad (5.5)$$

где  $K_{OT}$  – размер начислений на оплату труда, %,  $K_{OT} = 26$  %.

$$C_2 = \frac{863,04 \cdot 26}{100} = 224,39 \text{ руб.}$$

$$C_3 = \frac{C_1 \cdot K_{НР}}{100}, \quad (5.6)$$

где  $K_{НР}$  – размер накладных расходов на оплату труда, %,  $K_{НР} = 40$  %.

$$C_3 = \frac{863,04 \cdot 40}{100} = 345,22 \text{ руб.}$$

$$C_7 = \frac{(C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6) \cdot K_{ДЦ}}{100}, \quad (5.7)$$

где  $K_{ДЦ}$  – размер расходов от договорной цены, %,  $K_{ДЦ} = 5$  %.

$$C_7 = \frac{(863,04 + 224,39 + 345,22 + 870 + 540 + 182) \cdot 5}{100} = 151,23 \text{ руб.}$$

Дополнительные затраты связанные с нанесением износостойкого покрытия:

$$C_8 = 2(863,04 + 224,39 + 345,22 + 870 + 540 + 182 + 151,23) = 6351,76 \text{ руб.}$$

Себестоимость единицы продукции представим в виде:

$$C_n = 92158 + 6351,76 = 98509,76 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект при увеличении срока службы выпускаемой продукции равен:

$$\mathcal{E}_2 = 21(1,92 \cdot 92158 - 98509,76) = 1647105,6 \text{ руб.}$$

## 5.4 Выводы

1. Результатами исследований установлено, что процесс разрушения накатного ролика с покрытием характеризуется образованием большого числа микротрещин. Микротрещины образуются по межзёрненным границам. Так же как и на самом накатном ролике микротрещины возникают симметрично на боковых поверхностях рабочего профиля на расстоянии, примерно равном глубине поперечного внедрения накатного ролика в заготовку. Наибольшей эффективностью в

данных условиях работы инструмента обладают многокомпонентные однослойные покрытия, имеющие высокую трещиностойкость и коэффициент отслоения.

2. Выявлено, что наличие остаточных напряжений сжатия, способствуют увеличению прочности накатных роликов, увеличению его стойкости. Это подтверждается тем, что новый ролик имеет остаточные напряжения от -940 до -960 МПа, а изношенный от -10 до -35 МПа. При этом разрушенный накатной ролик, вышедший из рабочего состояния из-за излома, имеет не израсходованный потенциал остаточных напряжений от -200 до -225 МПа. На роликах с покрытием видно, что нанесённое износостойкое покрытие TiZrN имеет остаточные напряжения от -998 до -1026 МПа, что свидетельствует о повышении работоспособности накатных роликов.

3. Анализ лабораторных исследований влияния износостойких покрытий на работоспособность шлищенкатных роликов проведённый на машине трения 2070 СМТ-1 показал, что оптимальной твёрдостью обрабатываемого материала является твёрдость в диапазоне от 170 до 183 НВ. Покрытие, показавшее наилучший результат по приросту площади пятна контакта, является TiZrN.

4. Опытными-промышленными испытаниями шлищенкатных роликов с разработанной технологиейковки и износостойкими покрытиями, в условиях массового производства ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска, на стабильность процесса шлищенкатывания и точность шлицев на валах подтверждена эффективность наносимых однослойных многокомпонентных покрытий TiZrN. Таким образом, наносимое однослойное многокомпонентное покрытие TiZrN на накатной ролик не только повышает работоспособность накатных роликов в 1,9 раза, но и повышает точность шлицевого профиля на валах, что ведёт к повышению качества шлицевых валов. При этом годовой экономический эффект от внедрения покрытий в процесс накатывания шлицевых профилей на валах составит 1647105,6 руб.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В результате выполненных исследований получены следующие научные выводы и практические результаты:

1. Разработана математическая модель расчёта площади контакта «инструмент-заготовка», а также разработана и экспериментально подтверждена математическая модель расчёта нормальных и касательных напряжений на профилирующих поверхностях накатных роликов при накатывании профилей по фактическим осевым усилиям деформирования. По данным математическим моделям проведён расчёт площадей, усилий и напряжений на профилирующих поверхностях накатных роликов, позволившие определить крутящий момент от накатных роликов и спрогнозировать точность шлицевого профиля на валах.

2. Исследованием механизма изнашивания шлиценакатных роликов при многопроходном холодном пластическом деформировании профилей на валах установлено, что основной причиной выхода роликов из строя является его поломка (исключая аварийные поломки в результате неправильной эксплуатации), обусловленная наличием боковых усилий, приводящих к возникновению изгибающих моментов.

3. Результатами исследований установлено, что процесс разрушения накатного ролика без покрытий и с покрытием характеризуется образованием большого числа микротрещин. Микротрещины образуются по межзёрненным границам. Сквозные кольцевые трещины, приводящие к разрушению деформирующего накатного инструмента, образуются по концентрическим окружностям на боковых поверхностях рабочего профиля на расстоянии, примерно равном глубине поперечного внедрения накатного ролика в заготовку. Наибольшей эффективностью в данных условиях работы инструмента обладают многокомпонентные однослойные покрытия, характеризующиеся высокой трещиностойкостью и коэффициентом отслоения полученные методом КИБ.

4. Усовершенствование конструкции шлиценакатного стана 1126 ПС, путём замены заднего неподвижного упора сферическим с возможностью поворота, на

который устанавливается основание заготовки, позволяет совместить оптическую ось заготовки и накатной головки и накатывать одинаковый полный профиль шлицев на всей длине независимо от погрешностей предварительной обработки заготовки.

5. Опытными-промышленными испытаниями шлиценакатных роликов с усовершенствованной технологией ковки и износостойкими покрытиями, подтверждена их высокая эффективность в условиях массового производства ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска. Однослойное многокомпонентное покрытие TiZrN повышает долговечность накатных роликов в 1,9 раза и повышает точность шлицевого профиля на валах. При этом годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составит 1647105,6 руб.

### Список основных сокращений и условных обозначений

$d_n$  – наружному диаметру шлицев, м;

$d_3$  – диаметр заготовки, м;

$D$  – диаметр накатного ролика, м;

$d_{ocu}$  – диаметр оси накатного ролика, м;

$\Delta B_{ш}$  – погрешность направления, мм;

$\Delta t$  – погрешность шага, мм;

$\delta$  – биение вала, мм;

$\Delta b_{ш}$  – погрешность ширины шлица, мм;

$\alpha_n$  – отклонение угла профиля, град.;

$N$  – число циклов;

$F$  – площадь, м<sup>2</sup>;

$r_i$  – попоходная глубина внедрения ролика, м;

$\theta$  – угол наклона образующей основного конуса, град;

$r_i^I$  – попоходная глубина внедрения ролика на вспомогательном конусе, м;

$l_{AB}$  – длина дуги контакта, м;

$P$  – давление, МПа;

$T_{осев}$  – осевая сила, Н;

$\sigma_o$  – остаточные напряжения, МПа;

$\sigma_{1,2}$  – главные нормальные напряжения, МПа;

$\sigma_{экв}$  – эквивалентные напряжения, МПа;

$\tau$  – касательные контактные напряжения, МПа;

$v_{cp}$  – средняя скорость движения фильеры, м/с;

$V$  – окружная скорость, м/с;

$v_{мет}$  – линейная скорость перемещения металла, м/с;

$\gamma_n$  – угол нейтрального сечения заготовки, град;

$\gamma_p$  – угол отклонения ролика от оси симметрии, град;

$\gamma_b$  – угол закручивания вала, град;

$F_p$  – радиальная сила от накатного ролика, Н;

$F_{тр}$  – сила трения, Н;

$\mu$  – коэффициент внешнего трения;

$M_k$  – момент закручивания вала, кгс/см;

$M_\phi$  – момент закручивания роликовой фильеры, кгс/см;

$M_{тр}$  – момент трения, Н·м;

$J_{111} / J_{200}$  – параметр текстуры покрытия;

$\beta_{111}$  – величина полуширины рентгеновской линии, град;

$H_\mu$  – микротвёрдость, ГПа;

$HB$  – твёрдость по Брюнелю, МПа;

КИБ – метод конденсации покрытия из плазменной фазы в вакууме с ионной бомбардировкой поверхности инструмента;

ИМ – инструментальный материал;

ХОП – химическое осаждение покрытий;

ФОП – физическое осаждение покрытий.

**Библиографический список**

1. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2-х кн. / В. В. Алисин, А. Я. Алябьев, А. М. Архаров, В. А. Балакин и др.; под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. Кн. 1. – М.: Машиностроение, 1978. – 400 с.
2. Обработка деталей без снятия стружки / Ю. Г. Проскуряков, А. И. Осколков, А. С. Торхов, В. С. Стрельченко. – Барнаул, Алт. кн. Изд., 1972. – 176 с.
3. Козырев, Ю. Г. Исследование процесса продольного накатывания многороликовыми головками прямобочных шлицев на валах: дисс....канд. техн. наук / Ю. Г. Козырев. – Москва, 1970. – 200 с.
4. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1971. – 424 с.
5. Целиков, А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Г. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М.: Металлургия, 1980. – 320 с.
6. Поперечно-клиновая прокатка в машиностроении / А. И. Целиков, И. И. Казанская, А. С. Сафонов, А. В. Матвеев и др.; под ред. А. И. Целикова. – М.: Машиностроение, 1982. – 192 с.
7. Мишунин, В. А. Теория и практика процесса холодного выдавливания / В. А. Мишунин. – М.: Машиностроение, 1993. – 320 с.
8. Губкин, С. И. Пластическая деформация металлов: в 3 т. / С. И. Губкин. – М.: Металлургиздат, 1960. – 3 т.
9. Андреев, А. П. Разработка и исследование технологии интенсивной пластической деформации методом многократного выдавливания: дисс....канд. техн. наук: 05.02.09 / Андреев Антон Павлович. – Набережные Челны, 2010. – 247 с.
10. Мартыненко, О. В. Исследование влияния геометрических параметров деформирующих роликов на качество поверхностного слоя при обработке поверхностным пластическим деформированием: дисс....канд. техн. наук: 05.03.01 / Мартыненко Ольга Владимировна. – Волгоград, 2003. – 178 с.

- 11.Белый, В. И. Оценка качества обработки шлицевых соединений и зубчатых передач при применении антифрикционной добавки по вибрационным параметрам: дисс....канд. техн. наук: 05.20.03 / Белый Виктор Иванович. – Зеленоград, 2009. – 206 с.
- 12.Востров, В. Н. Формообразование зубчатых и шлицевых профилей внутреннего зацепления холодным накатыванием: дисс....д-ра техн. наук: 05.03.05 / Востров Владимир Николаевич. – Санкт-Петербург, 2000. – 421 с.
- 13.Востров, В. Н. Технология изготовления внутренних зубчатых профилей холодным накатыванием: дисс....канд. техн. наук: 05.01.05 / Востров Владимир Николаевич. – Ленинград, 1985. – 175 с.
- 14.Ли, В. А. Холодное накатывание внутренних профилей жёстких колёс волновых передач: автореф. Дис. ...канд. техн. наук: 05.03.05 / Ли Валерий Алексеевич. – СПбГТУ, 1999. – 16 с.
- 15.Бродский, А. З. Исследование процесса и разработка технологии получения зубчатых профилей холодным накатыванием с последующим холодным выдавливанием: дисс....канд. техн. наук: 05.01.05 / Бродский А. З. – Л.: ЛПИ, 1982. – 201 с.
- 16.Шекерджиев, Э. Р. Технология холодного накатывания внутренних эвольвентных профилей с модулем 1,0...3,5 мм: дисс....канд. техн. наук: 05.03.05 / Шекерджиев Эмил Русев. – С.-Петербург: СПбГТУ, 1993. – 214 с.
- 17.Пат. 4114415 США, МКИ В21В 17/00. Profile plano-type knurling machine. 1980.
- 18.Пат. 609261 Швейцария, МКИ В21Н 5/00. Verfahren zum Herstellen von gerade oder schrag verzahnten Maschinenelemente durch Kaltumform und Vorrichtung zur Durchfuehrung des Verfahrens. 1976.
- 19.Гун, Г. Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г. Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.
- 20.Писаревский, М. И. Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев / М. И. Писаревский. – Л.: Машиностроение, 1973. – 200 с.
- 21.Лындин, В. А. Инструмент для накатывания зубьев и шлицев повышенной точности / В. А. Лындин. – М.: Машиностроение, 1988. – 144 с.



- 22.Булавина, Е. А. Повышение долговечности шлицевых соединений карданных валов приводов вагонных генераторов: дисс....канд. техн. наук: 05.02.04 / Булавина Евгения Александровна. – Ростов-на-Дону, 2006. – 176 с.
- 23.Скундин, Г. И. Шлицевые соединения / Г. И. Скундин, В. Н. Никитин. – М.: Машиностроение, 1981. – 128 с.
- 24.Коноплянников, Ю. А. Изготовление зубчатых колёс и резьбовых соединений накаткой в холодном и горячем состоянии / Ю. А. Коноплянников, А. П. Сизов. – М.: ЦНИИПИ, 1964. – 40 с.
- 25.Брон, А. М. Определение области применения и эффективности процессов шлицеобразования / А. М. Брон // Руководящие материалы. – М.: ЭНИМС, 1966. – 46 с.
- 26.Grob, E. Kaltwalzen von Zahnrädern und Nutwellen / E. Grob // Technische Rundschau. – 1962. – № 25, 27, 45, 54.
- 27.Industrie – Anzeiger. Станок для накатки зубьев. – 1961. – № 68.
- 28.Новиков, В. Ю. Технология станкостроения / В. Ю. Новиков, А. Г. Схиртладзе – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.
- 29.Колмогоров, В. Л. Механика обработки металлов давлением / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1986. – 688 с.
- 30.Усиков, И. К. Исследование процесса холодного продольного накатывания шлицев методом копирования с многократным обжатием: дисс....канд. техн. наук / И. К. Усиков. – Барнаул, 1970. – 175 с.
- 31.Козырев, Ю. Г. Оборудование и инструмент для накатывания шлицев / Ю. Г. Козырев, М. А. Эстерзон. – М.: НИИМАШ, 1974.
- 32.Мазуренко, Ю. П. Холодное накатывание зубчатых венцов цилиндрических колёс / Ю. П. Мазуренко. – Львов, 1980. – 162 с.
- 33.Есипов, В. Д. Прокатка специальных профилей сложной формы / В. Д. Есипов, Б. М. Илюкович, Ю. С. Чернобривенко. – Киев: Техніка, 1985. – 192 с.
- 34.Сапрыгин, Х. М. Резервы производства сложных профилей проката / Х. М. Сапрыгин, Д. К. Нестеров, Б. В. Иванов. – М.: Металлургия, 1984. – 145 с.

35. Илюкович, Б. М. Прокатка и калибровка фасонных профилей: справочник / Б. М. Илюкович, В. Т. Жадан, И. П. Шулаев. – М.: Металлургия, 1989. – 309 с.
36. Кобелькова, С. Ф. Исследование стойкости роликов при продольном накатывании шлицев на валах многороликовыми головками: дисс....канд. техн. наук: 05.03.05 / Кобелькова Светлана Фёдоровна. – Минск, 1978. – 183 с.
37. Браславский, В. М. Технология обработки крупных деталей роликами / В. М. Браславский. – М.: Машиностроение, 1975. – 160 с.
38. Барбарич, М. В. Накатывание цилиндрических зубчатых колёс / М. В. Барбарич, М. В. Хоруженка. – М.: Машиностроение, 1970. – 220 с.
39. Фингер, М. Л. Цилиндрические зубчатые колёса / М. Л. Фингер. – М.: Научная книга, 2005. – 368 с.
40. Богатов, А. А. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением / А. А. Богатов, О. И. Мижирицкий, С. В. Смирнов. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
41. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1977. – 408 с.
42. Вагин, В. А. Методы исследования высокоскоростного деформирования металлов / В. А. Вагин, Г. Н. Здор, В. С. Мамутов. – Минск: Наука і тэхніка, 1990. – 206 с.
43. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебник для высших технических учебных заведений / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1990. – 528 с.
44. Арзамасов Б. Н. Конструкционные материалы: справочник / Б. Н. Арзамасов, В. А. Брострем, Н. А. Буше. – М.: Машиностроение, 1990. – 688 с.
45. Арзамасов, Б. Н. Материаловедение: учебник для вузов / Б. Н. Арзамасов, В. И. Макарова, Г. Г. Мухин. – 6-е изд., стереотип. – М.: МГТУ им. Баумана, 2004. – 648 с.
46. Стали и сплавы энергетического оборудования: справочник / С. Б. Рыжов, А. С. Зубченко, Ю. В. Каширский, Г. Ф. Банюк; под общ. ред. С. Б. Рыжова. – М.: Машиностроение, 2008. – 960 с.

47. Журавлёв, В. Н. Машиностроительные стали: справочник / В. Н. Журавлев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
48. Киричек, А. В. Резьбонакатывание / А. В. Киричек, А. Н. Афонин. – М.: Машиностроение, 2009. – 312 с.
49. Фрумин, Ю. Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / Ю. Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1963. – 164 с.
50. Афонин, А. Н. Перспективы производства резьбонакатного оборудования и инструмента Российской Федерации / А. Н. Афонин // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №7. – С. 50-53.
51. Степанян, Р. Л. Об износостойкости штамповых сталей X12M и У8А. / Р. Л. Степанян, М. А. Берсегян // Сборник научных трудов Ереванского политехнического института им. К. Маркса. – Ереван, Машиностроение, 1971. – Т. 33. – Вып. 5.
52. Терновой, Ю. Ф. Справочник по инструментальным сталям / Ю. Ф. Терновой. – Харьков: Металлика, 2008. – 224 с.
53. Зубцов, М. Е. Стойкость штампов / М. Е. Зубцов, В. Д. Корсаков. – Л.: Машиностроение, 1991. – 200 с.
54. Михайленко, Ф. П. Стойкость разделительных штампов / Ф. П. Михайленко. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
55. Хорольский, Д. Ю. Справочник по металлопрокату / Д. Ю. Хорольский. – Харьков: Металлика, 2008. – 818 с.
56. Вишневецкий, Ю. Т. Материаловедение для технических колледжей / Ю. Т. Вишневецкий. – Дашков и К., 2006. – 332 с.
57. Комаров, О. С. Материаловедение в машиностроении / О. С. Комаров. – Минск: Высшая школа, 2009. – 304 с.
58. ГОСТ 9539-72 Ролики резьбонакатные. – М.: Издательство стандартов, 1972.
59. Одинцов, Л. Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.

- 60.Артингер, И. Инструментальные стали и их термическая обработка: справочник / И. Артингер. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
- 61.Мороз, Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов / Л. С. Мороз. – Л.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
- 62.Раскатов, В.М. Машиностроительные материалы: краткий справочник / В. М. Раскатов, В. С. Чуенков, Н. Ф. Бессонова, Д. А. Вейс. – М.: Машиностроение, 1980. – 511 с.
- 63.Справочник инструментальщика: справочник / И. А. Ординарцев, Г. В. Филиппов, А. Н. Шевченко, А. В. Онишко, А. К. Сергеев; под общ. ред. И. А. Ординарцева. – М.: Машиностроение, 1987. – 846 с.
- 64.Боровский, Г. В. Справочник инструментальщика / Г. В. Боровский, С. Н. Григорьев, А. Р. Маслов. – М.: Машиностроение, 2007. – 464 с.
- 65.ГОСТ 5950-2000 Прутки, полосы и мотки из инструментальной легированной стали. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2000.
- 66.Федотов, Г. Д. Инструментальные материалы для холодного пластического деформирования шлицевых профилей на валах из среднеуглеродистых сталей / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Тезисы докладов 43-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск: ГТУ, 2009. – С. 16-17.
- 67.Цвияк, А. П. Краткий справочник машиностроителя-международника / А. П. Цвияк. – С.-Петербург: Питер, 2011. – 384 с.
- 68.Ишлинский, А. Ю. Математическая теория пластичности / А. Ю. Ишлинский, Д. Д. Ивлев. – М.: Физматлит, 2003. – 704 с.
- 69.Трощенко, В. Т. Сопротивление усталости металлов и сплавов: справочник / В. Т. Трощенко, Л. А. Сосновский. – Киев: Наукова думка, 1987. – Ч. 1. – 346 с.
- 70.Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев / В. В. Лапин, М. И. Писаревский, В. В. Самсонов, Ю. И. Сизов. – Л.: Машиностроение, 1986. – 228 с.

71. Каргин, В. Р. Эксплуатация и износ деформирующего инструмента / В. Р. Каргин, Г. В. Черепок, Ю. С. Горшков. – Куйбышев, 1991. – 88 с.
72. Яловский, Н. И. Тепловые процессы при обработке металлов давлением / Н. И. Яловский, М. А. Тылкин. – М.: Высшая школа, 1973. – 631 с.
73. Тененбаум, М. М. Сопротивление абразивного изнашивания / М. М. Тененбаум. – М.: Машиностроение, 1976. – 271 с.
74. Довнар, С. А. Термомеханика упрочнения штампов объёмной штамповки / С. А. Довнар. – М.: Машиностроение, 1975. – 255 с.
75. Куликов, Д. В. Физическая природа разрушения: учебное пособие / Д. В. Куликов, Н. В. Мекалова, М. М. Закирничная. – Уфа, 1999. – 240 с.
76. Трение, изнашивание и смазка: справочник: в 2-х кн. / В. В. Алисин, Б. М. Асташкевич, Э. Д. Браун, М. А. Галахов и др.; под ред. И. В. Крагельского, В. В. Алисина. Кн. 2. – М.: Машиностроение, 1979. – 358 с.
77. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов, В. Л. Колмогоров, С. П. Буркин, Б. Р. Картак. – М.: Металлургия, 1975. – 352 с.
78. Аксёнов, Л. Б. Системное проектирование процессов штамповки. / Л. Б. Аксёнов. – Л.: Машиностроение, 1990. – 210 с.
79. Овчинников, А. Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах / А. Г. Овчинников. – М.: Машиностроение, 1983. – 200 с.
80. Развитие усталостных трещин в материалах и конструкциях / М. Э. Гарф, О. Ю. Крамаренко, М. Я. Филатов, Э. Я. Филатов. – Киев: Наук. Думка, 1980. – 151 с.
81. Школьник, Л. М. Методика усталостных испытаний: справочник / Л. М. Школьник. – М.: Металлургия, 1978. – 304 с.
82. Циркин, А. В. Методика оценки трещиностойкости износостойких покрытий / А. В. Циркин, А. С. Дмитриев // Вузовская наука в современных условиях: тезисы докладов XXXVII НТК УлГТУ. – Ульяновск, 2003. – Ч. 1. – С. 34-35.
83. Гжиров, Р. И. Краткий справочник конструктора: справочник / Р. И. Гжиров. – Л.: Машиностроение, 1983. – 464 с.

84. Богатов, А. А. Механические свойства и модели разрушения металлов / А. А. Богатов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2002. – 329 с.
85. Физико-механические свойства. Испытания металлических материалов / Л. В. Агамиров, М. А. Алимов, Л. П. Бабичев, М. Б. Бакиров; под общ. ред. Е. И. Мамаевой. Том II-1. – М.: Машиностроение, 2010. – 856 с.
86. Владимиров, В. И. Физика прочности и пластичности / В. И. Владимиров, В. Н. Иванов, Н. Д. Приемский. – Л: Наука, 1986 – 269 с.
87. Сопротивление деформации и пластичность металлов при обработке давлением / Ю. Г. Калпин, В. И. Перфилов, П. А. Петров В. А. Рябов и др. – М.: Машиностроение, 2011. – 242 с.
88. Килов, А. С. Обработка материалов давлением в промышленности: учебное пособие / А. С. Килов. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2003. – 266 с.
89. Берин, И. Ш. Волоочильный инструмент / И. Ш. Берин, Н. В. Днестровский. – М.: Металлургия, 1971. – 172 с.
90. Полухин, В. П. Надёжность и долговечность валков холодной прокатки / В. П. Полухин, В. А. Николаев, М. А. Тылкин. – М.: Металлургия, 1976. – 448 с.
91. Морозов, Н. П. Производство и эксплуатация крупных опорных валков / Н. П. Морозов, В. А. Николаев. – М.: Металлургия, 1977. – 208 с.
92. Романовский, В. П. Справочник по холодной штамповке / В. П. Романовский. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, 1979. – 520 с.
93. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / под ред. Е. И. Семёнова // Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка. Том 1. – М.: Машиностроение, 1985 – 586.
94. Ковка и штамповка: справочник: в 4 т. / под ред. Г. А. Навроцкого // Холодная объёмная штамповка. Том 3. – М.: Машиностроение, 1987 – 384 с.
95. Сидоренко, М. И. Формирование шлицев на валах методом накатки / М. И. Сидоренко // Наука и техника. – 2012. – №4. – С. 7-12.
96. Фаворский, В. Е. Холодная штамповка выдавливанием / В. Е. Фаворский. – Л.: Машиностроение, 1966. – 160 с.

97. Теория пластических деформаций / Е. П. Унксов, У. Джонсон, В. Л. Колмогоров, С. А. Попов и др.; под ред. Е. П. Унксова, А. Г. Овчинникова. – М.: Машиностроение, 1983. – 598 с.
98. Кроха, В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации: справочник / В. А. Кроха. – М.: Машиностроение, 1980. – 158 с.
99. Азотирование и карбонитрирование / Р. Чаттерджи-Фишер, Ф.-В. Эйзелл, Р. Хоффманн, Д. Лидтке, Х. Малленер и др. пер. с нем. / Под ред. Супова А. В. – М.: Металлургия, 1990. – 280 с.
100. Мацевитый, В. М. Покрытия для режущих инструментов / В. М. Мацевитый. – Харьков: Вища школа, 1987. – 128 с.
101. Верещака, А. С. Физические основы процесса резания и изнашивания режущего инструмента с износостойкими покрытиями: учебное пособие / А. С. Верещака, В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 144 с.
102. Грудев, А. П. Трение и смазки при обработке металлов давлением: справочник / А. П. Грудев, Ю. В. Зильберг, В. Т. Тилик. – М.: Металлургия, 1982. – 312 с.
103. Заднепровский, Р. П. Теория трения скольжения / Р. П. Заднепровский. – Волгоград: Офсет, 2005. – 52 с.
104. Леванов, А. Н. Общие закономерности и полезные эффекты контактного трения в процессах обработки металлов давлением / А. Н. Леванов // Заготовительные производства в машиностроении. – М.: Машиностроение, 2007. – №10. – С. 31-35.
105. Табаков, В. П. Расчёт контактных поверхностей при многопроходном накатывании прямобочных шлицев на валах в холодном состоянии / В. П. Табаков, Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Материалы Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы аграрной науки и образования», посвящённой 65-летию Ульяновской ГСХА. – Ульяновск: ГСХА, 2008. – С. 152-157.
106. Федотов, Г. Д. Контактные напряжения в зоне инструмент-деталь при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах в холодном

- состоянии / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Материалы IV-ой Международной научно-практической конференции «Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения». – Ульяновск: ГСХА им. П. А. Столыпина, 2012. – Т. II. – С. 13-18.
107. Федотов, Г. Д. Напряженное состояние инструмента при многопроходном холодном накатывании шлицев на валах / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Тезисы докладов 42-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск: ГТУ, 2008 г. – С. 53
108. Федотов, Г. Д. Геометрическая точность прямобочных шлицев на валах при многопроходном холодном пластическом деформировании накатной головкой / Г. Д. Федотов, В. П. Табаков, В. А. Адакин // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2011. – №4. – С. 3-6.
109. Упрочнение прямобочных шлицев на валах при многопроходном холодном пластическом деформировании накатной головкой / Г. Д. Федотов, В. П. Табаков, В. А. Адакин, М. М. Бадыков // Упрочняющие технологии и покрытия. – М.: Машиностроение, 2011. – №7. – С. 18-19.
110. Автомат шлиценакатный: паспорт 1126 ПС. – Барнаул, 1991.
111. ГОСТ 1139-80 Соединения шлицевые прямобочные. Размеры и допуски. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1980. – 12 с.
112. Пат. № 2468879 Российская Федерация, МПК В21Н 5/00. Устройство для повышения точности шлицевых профилей на валах при холодном пластическом деформировании / Федотов Г. Д., Адакин В. А., Бадыков М. М.; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Ульян. госуд. с/х ак-я». – № 2011117896/02; заявл. 04.05.2011; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34. – 6 с.
113. Зайков, М. А. Процесс прокатки / М. А. Зайков, В. П. Полухин. – М.: МИСиС, 2004. – 640 с.
114. Адакин, В. А. Обеспечение точности прямоугольных шлицевых профилей на валах при многопроходном холодном пластическом формообразовании / В. А. Адакин // Сборка в машиностроении, приборостроении. – М.: Машиностроение, 2014. – №5. – С. 18-25.



115. Федотов, Г. Д. Определение нейтрального угла на поверхности накатного ролика и условий движения металла при накатывании шлицевых профилей на валах в холодном состоянии / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Материалы Международной научно-практической конференции «Молодёжь и наука XXI века». – Ульяновск: ГСХА, 2010. – Т. IV. – С. 7-15.
116. Лясникова, А. В. Сопротивление материалов пластическому деформированию в приложениях к процессам обработки давлением / А. В. Лясникова. – Санкт-Петербург: Внешторгиздат-Петербург, 1995. – 527 с.
117. Коцаньда, С. Усталостное разрушение металлов / С. Коцаньда // Пер. Г. Н. Мехеда; под. ред. В. С. Ивановой. – М.: Металлургия, 1976. – 456 с.
118. Смирнов-Аляев, Г. А. Сопротивление материалов пластическому деформированию / Г. А. Смирнов-Аляев. – Л.: Машиностроение, 1978. – 368 с.
119. Третьяков, А. В. Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А. В. Третьяков, В. И. Зюзин. – 2-е изд. – М.: Металлургия, 1973. – 224 с.
120. Табаков, В. П. Повышение эффективности режущего инструмента путём направленного изменения параметров структуры и свойств материала износостойкого покрытия: дисс....д-ра техн. наук: 05.03.01 / Табаков Владимир Петрович. – Ульяновск, 1992. – 641 с.
121. Пат. на полезную модель № 109608 Российская Федерация, МПК H01L 21/68. Оправка для закрепления деформирующего инструмента (ролика) при нанесении покрытий / Адакин В. А., Федотов Г. Д.; заявитель и патентообладатель Адакин В. А. – № 2011112890/28; заявл. 04.04.2011; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29. – 2 с.
122. Уманский, Я. С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
123. Верещака, А. С. Повышение работоспособности режущих инструментов нанесением износостойких покрытий: дисс....д-ра техн. наук: 05.03.01 / Верещака Анатолий Степанович. – 1986. – 601 с.

124. Колмаков, А. Г. Методы измерения твёрдости / А. Г. Колмаков, В. Ф. Терентьев, М. Б. Бакиров. – М.: Металлургия, 1987. – 128 с.
125. Воеводин, А. А. Определение микротвёрдости тонких покрытий с учётом их толщины и твёрдости подложки / А. А. Воеводин, С. Е. Спасский, А. А. Ерохин // Заводская лаборатория. – 1991. – №10. – С. 45-46.
126. Новиков, В. Н. Определение коэффициента Пуассона и модуля сдвига металлических стёкол методом индентации / В. Н. Новиков, Г. М. Коваль // Заводская лаборатория. – 1988. – №11. – С. 96-99.
127. Маслов, В. П. Определение характеристик упругости и пластичности переходных металлов методом вдавливания индентора / В. П. Маслов, В. Н. Новиков, А. Д. Цицилиано // Заводская лаборатория. – 1988. – №8. – С. 90-92.
128. Новиков, В. Н. Методы микроиспытаний на трещиностойкость / В. Н. Новиков, С. Н. Дуб, С. И. Булычев // Заводская лаборатория. – 1987. – №7. – С. 60-67.
129. Табаков, В. П. Методика комплексной оценки свойств износостойких покрытий для режущего инструмента / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин // Молодёжь Поволжья – науке будущего (ЗМНКТ – 2003): труды заочной молодёжной НКТ. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – С. 76-78.
130. Руководство по эксплуатации. Микротвердомер ПМТ-3 – 16 с.
131. Профилометр модели 130. Паспорт 130.0.01-ПС. – М.: «Завод ПРОТОН-МИЭТ», 2007. – 25 с.
132. Кацев, П. Г. Статические методы исследования режущего инструмента / П. Г. Кацев. – М.: Машиностроение, 1968. – 241 с.
133. Налимов, В. В. Статические методы планирования экспериментальных экспериментов / В. В. Налимов, Н. А. Чернова. – М.: Наука, 1965. – 340 с.
134. Математико-статистические методы в экономическом анализе и планировании / Отв. ред. Б.Б. Розин. – Новосибирск: Наука, 1983. – 256 с.
135. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. С. М. Ермакова. – М.: Наука, 1983. – 392 с.

136. Бобылёв, А. В. Механические и технологические свойства металлов: справочник / А. В. Бобылёв. – М.: Металлургия, 1987. – 208 с.
137. Федотов, Г. Д. Характер разрушения инструмента при холодном пластическом деформировании / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Аграрная наука и образование в реализации национального проекта «Развитие АПК»». – Ульяновск: ГСХА, 2006. – Ч. I. – С. 150-154.
138. Самуль, В. И. Основы теории упругости и пластичности / В. И. Самуль. – М.: Высш. школа, 1982. – 264 с.
139. Афанасьев, В. И. Нелинейная механика разрушения / В. И. Афанасьев, Ю. Н. Радаев, Л. В. Степанова. – Самара: Самарский университет, 2001. – 562 с.
140. Терентьев, В. Ф. Циклическая прочность металлических материалов / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев. – Новосибирск: НГТУ, 2001. – 61 с.
141. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии: справочник / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский. – Киев: Издательский дом «Ин Юре», 2003. – 540 с.
142. Федотов, Г. Д. Совершенствование технологииковки шлиценакатных роликов для холодного пластического деформирования шлицевых профилей на валах / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Материалы II-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы аграрной науки и образования». – Ульяновск: ГСХА, 2010. – Т. V. – С. 158-163.
143. Федотов, Г. Д. Формирование структуры и механических свойств инструмента из Р6М5 для холодного пластического деформирования шлицев на валах / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Тезисы докладов 42-й научно-технической конференции «Вузовская наука в современных условиях». – Ульяновск: ГТУ, 2008 г. – С. 52.
144. Wiesner, L. Genanschmieden von Kettenradern fur Rollen Kettenantriebe / L. Wiesner, K. Weber // Fertigungstechnik und Betrieb. – 1980. – №16. – S. 362.

145. Северденко, В. П. Теория обработки металлов давлением / В. П. Северденко. – Минск: Высшая школа, 1966. – 218 с.
146. Хоникомб, Р. Пластическая деформация металлов / Р. Хоникомб. – М.: Мир, 1972. – 408 с.
147. Колбасников, И. Г. Теория обработки металлов давлением. Физические основы прочности и пластичности металлов / И. Г. Колбасников. – С.-Петербург: СПбГПУ, 2004. – 268 с.
148. Воронцов, А. Л. Технологические задачи теории пластичности: в 3 т. / А. Л. Воронцов. – М.: Машиностроение, 2006. – 474 с.
149. ГОСТ 1133-71 Сталь кованая круглая и квадратная. Сортамент. – М.: Издательство стандартов, 1971.
150. Колмогоров, В. Л. Напряжения, деформации, разрушение / В. Л. Колмогоров. – М.: Металлургия, 1970. – 231 с.
151. ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна. – М.: Издательство стандартов, 1982.
152. [www.delta-grup.ru](http://www.delta-grup.ru)
153. [www.technologysmash.ru](http://www.technologysmash.ru)
154. Голенков, В. А. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением на персональном компьютере / В. А. Голенков, З. П. Зыкова, В. И. Кондрашов. – М.: Машиностроение, 1994. – 272 с.
155. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие / В. С. Паршин, А. П. Карамышев И. И. Некрасов, А. И. Пугин и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.
156. Shima, S. The finite element analysis of elastic-plastic deformation of porous metals / S. Shima, J. Inamoto, K. Osahada. – J. JSTP, 1975. – № 16-175. – P. 660-667.
157. Кроха, В. А. Кривые упрочнения металлов для холодной деформации / В. А. Кроха. – Машиностроение, 1968. – 131 с.
158. Табаков, В. П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента / В. П. Табаков. – М.: Машиностроение, 2008. – 311 с.

159. Кабалдин, Ю. Г. Современные методы конструирования, контроля качества и прогнозирования работоспособности режущего инструмента / Ю. Г. Кабалдин, Б. Я. Мокрицкий, Н. А. Семашко. – Владивосток: ДГУ, 1990. – 124 с.
160. Табаков, В. П. Работоспособность торцевых фрез с многослойными износостойкими покрытиями / В. П. Табаков, М. Ю. Смирнов, А. В. Циркин. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 151 с.
161. Кабалдин, Ю. Г. Структура, прочность и износостойкость композиционных инструментальных материалов / Ю. Г. Кабалдин. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.
162. Табаков, В. П. Износостойкие покрытия режущего инструмента, работающего в условиях непрерывного резания / В. П. Табаков, А. В. Чихранов. – Ульяновск: УлГТУ, 2007. – 255 с.
163. Гб 2.779.013 ТО. Машина для испытания материалов на трение и износ 2070 СМТ-1 // Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – СКБ ИМИТ ПО «Точприбор», 1980.
164. Адакин, В. А. Повышение долговечности деформирующего инструмента применением износостойких покрытий / В. А. Адакин // Вестник УлГТУ. – Ульяновск: ГТУ, 2012. – №4. – С. 32-36.
165. Исаченков, Е. И. Контактное трение и смазки при обработке металлов давлением / Е. И. Исаченков. – М.: Машиностроение, 1978. – 208 с.
166. РДМУ 109-77. Методика выбора и оптимизации контролируемых параметров технологических процессов. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 49 с.
167. Общая теория статистики / Г. С. Кильдишев, В. Е. Овсиенко, П. М. Рабинович, Т. В. Рябушкин. – М.: Статистика, 1980. – 423 с.
168. Венецкий И. Г. Основные математико-статистические понятия и формулы в экономическом анализе: справочник / И. Г. Венецкий, В. И. Венецкая. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1979. – 447 с.

169. Востров, В. Н. Статистические методы исследования процессов обработки металлов давлением / В. Н. Востров, В. С. Макутов, Э. Е. Юргенсон. – С.-Петербург: СПбГТУ, 1997. – 95 с.
170. Биргер, И. А. Остаточные напряжения / И. А. Биргер // Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – Москва, 1963. – 226 с.
171. Федотов, Г. Д. Влияние геометрических параметров шлицев на эксплуатационную надёжность / Г. Д. Федотов, В. А. Адакин // Современные технологии металлообработки. – УлГТУ, 2009 г. – С. 16-17.
172. Болгар, А. С. Термодинамические свойства нитридов / А. С. Болгар, В. Ф. Литвиненко. – Киев: Наукова думка, 1980. – 284 с.
173. Самсонов, Г. В. Тугоплавкие покрытия / Г. В. Самсонов, А. П. Эпик. – М.: Металлургия, 1973. – 399 с.
174. Табаков, В. П. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана / В. П. Табаков. – Ульяновск: УлГТУ, 1998. – 123 с.
175. Макушок, Е. М. Механика трения. – Минск: Наука и техника, 1944. – 256 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ



Приложение А  
(справочное)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 109608

**ОПРАВКА ДЛЯ ЗАКРЕПЛЕНИЯ ДЕФОРМИРУЮЩЕГО  
ИНСТРУМЕНТА (РОЛИКА) ПРИ НАНЕСЕНИИ  
ПОКРЫТИЙ**

Патентообладатель(ли): *Адакин Вячеслав Александрович (RU)*

Автор(ы): *Федотов Геннадий Дмитриевич (RU), Адакин  
Вячеслав Александрович (RU)*

Заявка № 2011112890

Приоритет полезной модели 04 апреля 2011 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре полезных  
моделей Российской Федерации 20 октября 2011 г.

Срок действия патента истекает 04 апреля 2021 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной  
собственности, патентам и товарным знакам



Б.П. Симонов



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 468 879** (13) **C1**(51) МПК  
**B21H 5/00** (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2011117896/02, 04.05.2011

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
04.05.2011

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 04.05.2011

(45) Опубликовано: 10.12.2012 Бюл. № 34

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: ПРОСКУРЯКОВ Ю.Г. и др. Обработка  
деталей без снятия стружки. - Барнаул:  
Алтайское книжное изд-во, 1972, с.49-60. RU  
2234997 C1, 27.08.2004. SU 1237288 A1,  
15.06.1986. DE 3619631 A1, 17.12.1987. DE  
1287549 B, 23.01.1969.

Адрес для переписки:

432063, г.Ульяновск, б-р Новый Венец, 1,  
ФГОУ ВПО "Ульяновская ГСХА",  
патентоведу

(72) Автор(ы):

Федотов Геннадий Дмитриевич (RU),  
Адакин Вячеслав Александрович (RU),  
Бадыхов Масхут Магсумович (RU)

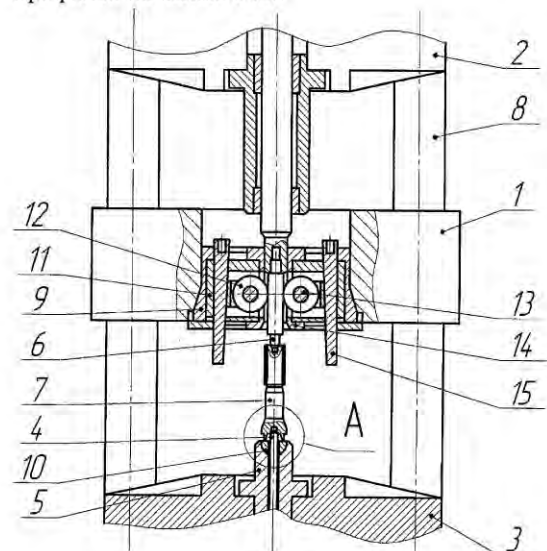
(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования  
"Ульяновская государственная  
сельскохозяйственная академия" (RU)(54) УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ШЛИЦЕВЫХ ПРОФИЛЕЙ НА ВАЛАХ  
ПРИ ХОЛОДНОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к области обработки металлов давлением и может быть использовано для накатывания шлицевых и зубчатых профилей на валах. Устройство содержит верхнюю и нижнюю траверсы, одна из которых несет жесткий центр с базовым торцом, а другая - подвижный центр для зажима заготовки. Траверсы между собой стянуты тремя симметрично расположенными направляющими штоками, несущими накатную роликовую головку. Базовый торец жесткого центра содержит подвижный упор, обратная сторона которого выполнена сферической, с возможностью поворота относительно оси центров в любом направлении при каждом рабочем ходе накатной роликовой головки. Использование предложенного устройства позволит повысить геометрическую точность

профилей на валах. 3 ил.



Фиг. 1

Приложение Б  
(справочное)

**Ковка накатных роликов**

Таблица Б.1 – Твёрдость и величина карбидной неоднородности накатных роликов послековки

|  | Структура<br>после<br>отжига   | Твёрдость<br>после<br>отжига | Величина карбидной неоднородности<br>после отжига                                    | Величина карбидной неоднородности<br>после закалки и отпуска |
|--|--------------------------------|------------------------------|--|--|
| 1-ая<br>партия<br>(метка 1)<br>10 шт.      | Перлит<br>сорбитооб-<br>разный | 241 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 2,8 мм,<br>далее – 2 балл                         | 1 балла – по всему сечению шлифа                             |
|  |                                | 235 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 2,24<br>мм, далее – 1...2 балл                    | 1...2 балла – по всему сечению шлифа                         |
|  |                                | 241 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 2,8 мм,<br>далее – 4...5 балл                     | 4...5 балла – по всему сечению шлифа                         |
|  |                                | 241 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 2,4 мм,<br>далее – 3...4 балл                     | 1 балла - по всему сечению шлифа                             |
|  |                                | 235 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 3,2 мм,<br>далее – 3...4 балл, единичн. – 5 балла | 4...5 балла – по всему сечению шлифа                         |
| 2-ая<br>партия<br>(без<br>метки)<br>10 шт. |                                | 241 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 6,6 мм,<br>далее – 2...3 балл                     | 2...3 балла – по всему сечению шлифа                         |
|  |                                | 249 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 8,1 мм,<br>далее – 3...4 балл                     | 1...2 балла – по всему сечению шлифа                         |
|  |                                | 241 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 6,3 мм,<br>далее – 2...3 балл                     | 3 балла – по всему сечению шлифа                             |
|  |                                | 235 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 6,7 мм,<br>далее – 3...4 балл                     | 2...3 балла – по всему сечению шлифа                         |
|  |                                | 249 НВ                       | 1 балл – в рабочей зоне на глубину 7,7 мм,<br>далее – 3...4 балл                     | 3...4 балла – по всему сечению шлифа                         |

Таблица Б.2 – Определение оптимальной схемыковки, дающей необходимые результаты по величине карбидной неоднородности

| Размер заготовки | Карбидная неоднородность в исходном прокате | Схемаковки  | Величина карбидной неоднородности послековки и  | Примечание  |
|------------------|---|---|---|-------------|
| Ø43×51           | С поверхности 1...2 балл, далее 4 балл      | Близкая к схеме 1, но с 4...5 протяжками на диаметр | 1...3 балл – с поверхности, в сердцевине 4...5 балл                                       | 1-ая партия |
| Ø43×51           | С поверхности 1...2 балл, далее 4 балл      | Схема 5   | 2...3 балл – с поверхности, к сердцевине 4...5 балл                                       | 1-ая партия |
| Ø43×51           | 3 балл                                      | Схема 3   | В основном 1...3 балл (один результат: с поверхности 1...2 балл, в сердцевине 3...4 балл) | 2-ая партия |
| Ø43×51           | 3 балл                                      | Схема 4   | 1-3 балл  | 2-ая партия |
| Ø45×47           | 2...3 балл                                  | Схема 7   | 2 балл  | 2-ая партия |
| Ø50×40           | 3...4 балл                                  | Близкая к схеме 2                                   | 2...3 балл – с поверхности, к сердцевине 4...5 балл                                       | 1-ая партия |
| Ø50×40           | 3...4 балл                                  | Схема 6   | 2...3 балл  | 2-ая партия |
| Ø50×40           | 3...4 балл                                  | Схема 8   | 1...2 балл – с поверхности, к сердцевине 2...3 балл                                       | 2-ая партия |

Примечание – Наилучшими схемамиковки для получения требуемой по чертежу величины карбидной неоднородности заготовок из проката Ø43, 45, 50 мм следует считать схемы 3, 4, 6, 7, 8.

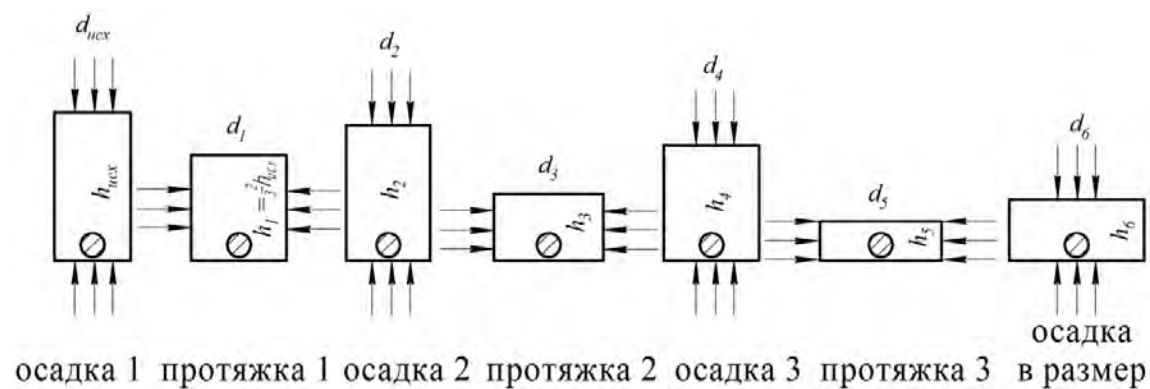


Рисунок Б.1 – Схемаковки 1

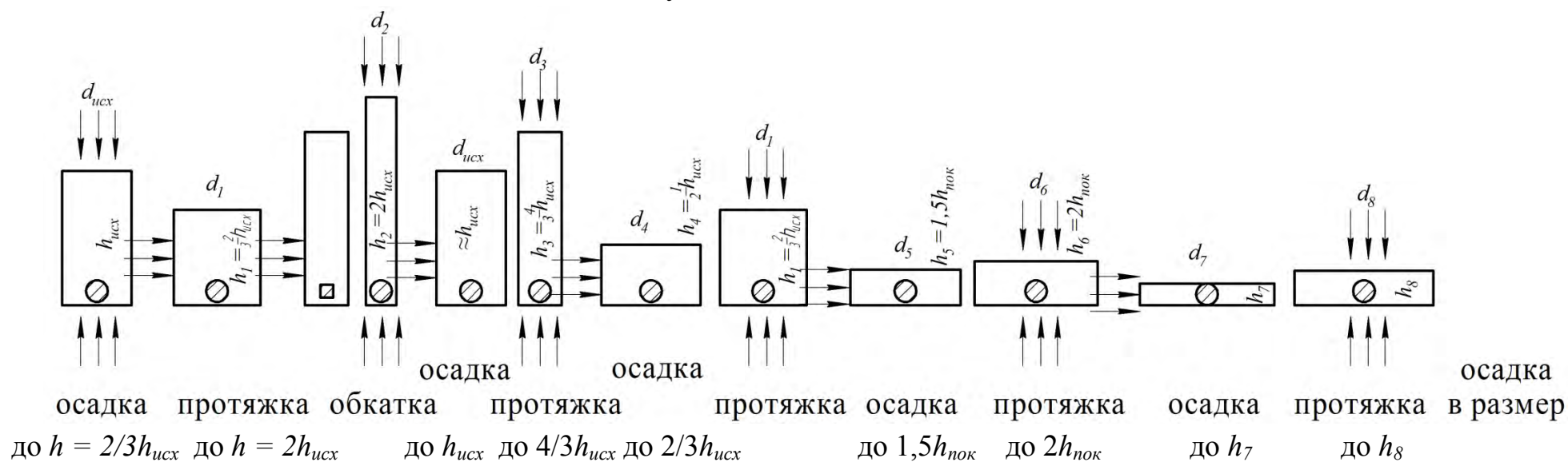


Рисунок Б.2 – Схемаковки 2

#### Примечания

1. Протяжка производится на квадрат

2. Протяжка производится на диаметр

□  $h_{\text{пок}} < h_7 < h_8$

○

## Схемаковки 3

Схемаковки 3 аналогична схемековки 2, но выделенный цветом цикл операций повторяется дважды.

## Схемаковки 4

Схемаковки 4 аналогична схемековки 2, но выделенный цветом цикл операций повторяется трижды.

## Схемаковки 5 (примерная)

1. Осадка до  $2/3$  исходной высоты.
2. Протяжка до исходной высоты.
3. Осадка выполняется таким образом:

заготовка ставится на боек не всей площадью торца, а примерно половиной и осаживается, далее заготовка помещается на боек неосаженной площадью и осаживается вровень с уже осаженной площадью (возможен промежуточный удар по центральной части торца).

4. Таким образом, выполняются 2...3 перехода: осадка – протяжка до получения высоты поковки, равной примерно  $2/3$  от исходной высоты заготовки.

5. Осуществляется промежуточный подогрев поковки.

6. Аналогично выполняются еще 3...4 перехода: осадка – протяжка, но до получения высоты поковки, равной уже  $1/3$  от исходной высоты заготовки.

7. Еще один подогрев поковки.

8. Осадка поковки последовательными ударами бойка по площади торца.

9. Протяжка.

10. Осадка в размер поковки.

## Схемаковки 6

Схемаковки 6 близка к схемековки 4, но после трехразовой протяжки на квадрат обкатка и осадка осуществляется в размер поковки

## Схемаковки 7

Схемаковки 7 близка к схемековки 3, но после двухразовой протяжки на квадрат обкатка и осадка осуществляется в размер поковки

## Схемаковки 8

Схемаковки 8 близка к схемековки 3, но после двухразовой протяжки на квадрат осуществляется дважды осадка и протяжка по диаметру, сначала до высоты примерно до  $1/2h_{исх}$ , далее до высоты  $h_7$ , чуть меньшей высоты поковки, далее осуществляется обкатка и осадка в размер поковки.

## Распределение величины карбидной неоднородности

Исходный прокат  $\varnothing 50$  мм (ан. ЦЗЛ №669 от 5.03.02 г., карбидная неоднородность 3...4 балла)

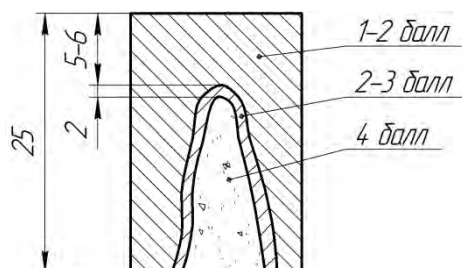


Рисунок Б.3 – Поковки после отжига  $\varnothing 88 \times 11$  мм (ан. ЦЗЛ №253 от 6.09.02 г. и №287 от 16.09.02 г.)

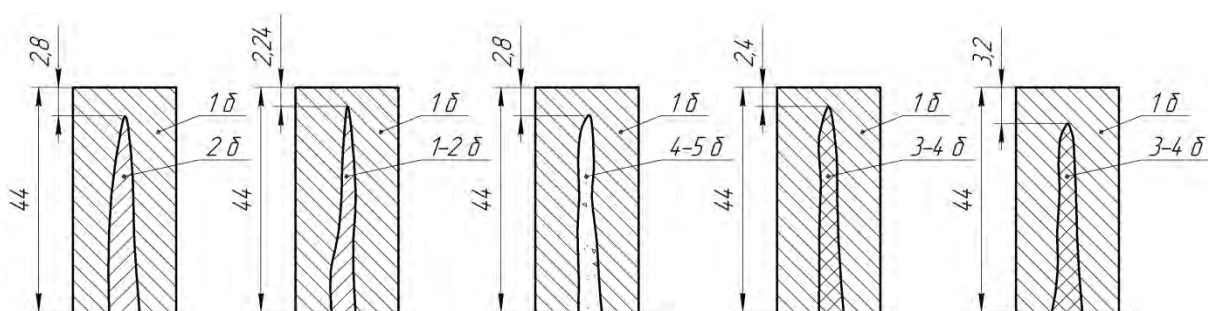


Рисунок Б.4 – Поковки, откованные по 1-ой схеме

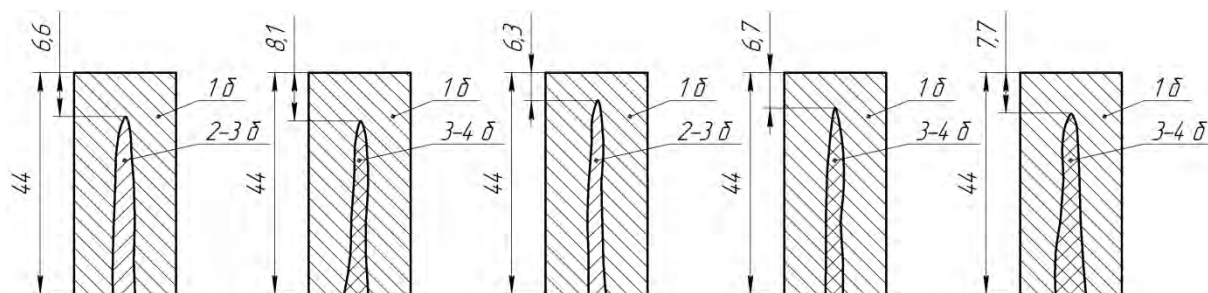


Рисунок Б.5 – Поковки, откованные по 2-ой схеме

Ролики после термообработки  $\varnothing 80 \times 7$  мм (ан. ЦЗЛ №288 от 16.09.02г.)

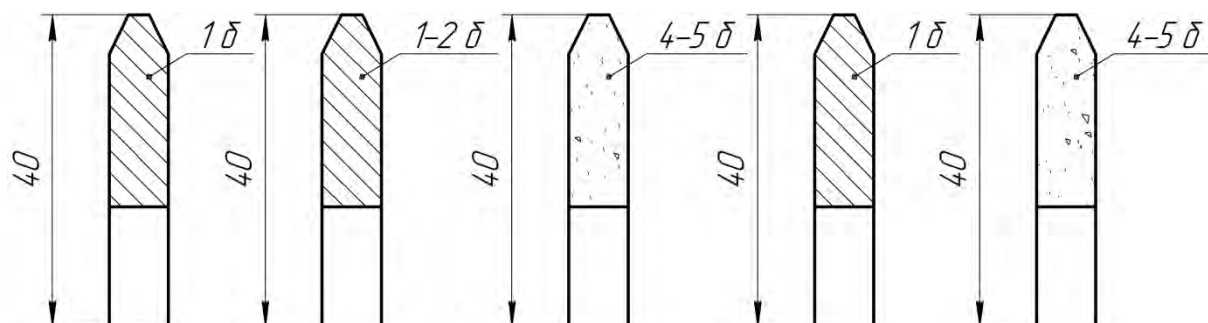


Рисунок Б.6 – Ролики, откованные по 1-ой схеме

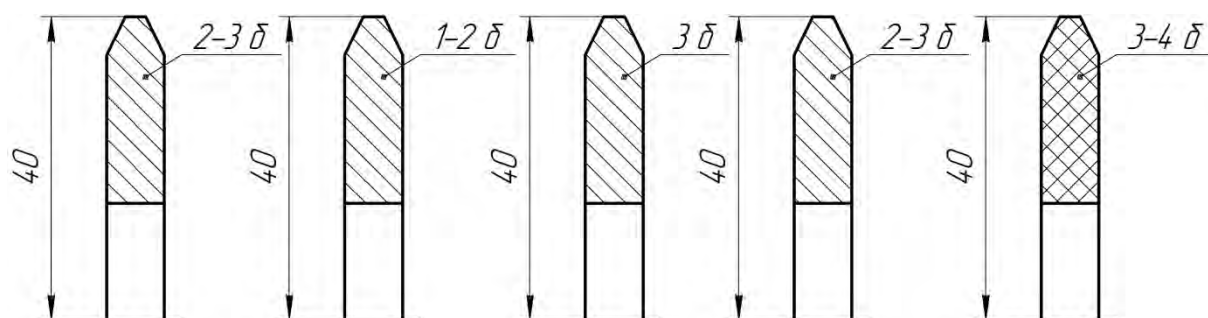


Рисунок Б.7 – Ролики, откованные по 2-ой схеме

Приложение В  
(справочное)

**Планирование эксперимента**

Таблица В.1 – Матрица планирования эксперимента по моменту трения

| Но-<br>мер<br>опы-<br>та | $X_1$  | $X_2$  | $X_3$  | $X_1^2$ | $X_2^2$ | $X_3^2$ | $X_1X_2$ | $X_1X_3$ | $X_2X_3$ | $X_1X_2X_3$ |
|--------------------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|-------------|
| 1                        | 2      | 3      | 4      | 5       | 6       | 7       | 8        | 9        | 10       | 11          |
| 1                        | -1     | -1     | -1     | 1       | 1       | 1       | 1        | 1        | 1        | -1          |
| 2                        | -1     | -1     | -0,865 | 1       | 1       | 0,748   | 1        | 0,865    | 0,865    | -0,865      |
| 3                        | -1     | -1     | -0,598 | 1       | 1       | 0,358   | 1        | 0,598    | 0,598    | -0,598      |
| 4                        | -1     | -1     | -0,068 | 1       | 1       | 0,005   | 1        | 0,068    | 0,068    | -0,068      |
| 5                        | -1     | -1     | 1      | 1       | 1       | 1       | 1        | -1       | -1       | 1           |
| 6                        | -1     | -0,867 | -1     | 1       | 0,752   | 1       | 0,867    | 1        | 0,867    | -0,867      |
| 7                        | -1     | -0,867 | -0,865 | 1       | 0,752   | 0,748   | 0,867    | 0,865    | 0,750    | -0,750      |
| 8                        | -1     | -0,867 | -0,598 | 1       | 0,752   | 0,358   | 0,867    | 0,598    | 0,518    | -0,518      |
| 9                        | -1     | -0,867 | -0,068 | 1       | 0,752   | 0,005   | 0,867    | 0,068    | 0,059    | -0,059      |
| 10                       | -1     | -0,867 | 1      | 1       | 0,752   | 1       | 0,867    | -1       | -0,867   | 0,867       |
| 11                       | -1     | -0,600 | -1     | 1       | 0,360   | 1       | 0,600    | 1        | 0,600    | -0,600      |
| 12                       | -1     | -0,600 | -0,865 | 1       | 0,360   | 0,748   | 0,600    | 0,865    | 0,519    | -0,519      |
| 13                       | -1     | -0,600 | -0,598 | 1       | 0,360   | 0,358   | 0,600    | 0,598    | 0,359    | -0,359      |
| 14                       | -1     | -0,600 | -0,068 | 1       | 0,360   | 0,005   | 0,600    | 0,068    | 0,041    | -0,041      |
| 15                       | -1     | -0,600 | 1      | 1       | 0,360   | 1       | 0,600    | -1       | -0,600   | 0,600       |
| 16                       | -1     | -0,067 | -1     | 1       | 0,004   | 1       | 0,067    | 1        | 0,067    | -0,067      |
| 17                       | -1     | -0,067 | -0,865 | 1       | 0,004   | 0,748   | 0,067    | 0,865    | 0,058    | -0,058      |
| 18                       | -1     | -0,067 | -0,598 | 1       | 0,004   | 0,358   | 0,067    | 0,598    | 0,040    | -0,040      |
| 19                       | -1     | -0,067 | -0,068 | 1       | 0,004   | 0,005   | 0,067    | 0,068    | 0,005    | -0,005      |
| 20                       | -1     | -0,067 | 1      | 1       | 0,004   | 1       | 0,067    | -1,000   | -0,067   | 0,067       |
| 21                       | -1     | 1      | -1     | 1       | 1       | 1       | -1       | 1        | -1       | 1           |
| 22                       | -1     | 1      | -0,865 | 1       | 1       | 0,748   | -1       | 0,865    | -0,865   | 0,865       |
| 23                       | -1     | 1      | -0,598 | 1       | 1       | 0,358   | -1       | 0,598    | -0,598   | 0,598       |
| 24                       | -1     | 1      | -0,068 | 1       | 1       | 0,005   | -1       | 0,068    | -0,068   | 0,068       |
| 25                       | -1     | 1      | 1      | 1       | 1       | 1       | -1       | -1       | 1        | -1          |
| 26                       | -0,014 | -1     | -1     | 0,0002  | 1       | 1       | 0,014    | 0,014    | 1        | -0,014      |
| 27                       | -0,014 | -1     | -0,865 | 0,0002  | 1       | 0,748   | 0,014    | 0,012    | 0,865    | -0,012      |
| 28                       | -0,014 | -1     | -0,598 | 0,0002  | 1       | 0,358   | 0,014    | 0,008    | 0,598    | -0,008      |
| 29                       | -0,014 | -1     | -0,068 | 0,0002  | 1       | 0,005   | 0,014    | 0,001    | 0,068    | -0,001      |
| 30                       | -0,014 | -1     | 1      | 0,0002  | 1       | 1       | 0,014    | -0,014   | -1       | 0,014       |
| 31                       | -0,014 | -0,867 | -1     | 0,0002  | 0,752   | 1       | 0,012    | 0,014    | 0,867    | -0,012      |
| 32                       | -0,014 | -0,867 | -0,865 | 0,0002  | 0,752   | 0,748   | 0,012    | 0,012    | 0,750    | -0,010      |
| 33                       | -0,014 | -0,867 | -0,598 | 0,0002  | 0,752   | 0,358   | 0,012    | 0,008    | 0,518    | -0,007      |
| 34                       | -0,014 | -0,867 | -0,068 | 0,0002  | 0,752   | 0,005   | 0,012    | 0,001    | 0,059    | -0,001      |
| 35                       | -0,014 | -0,867 | 1      | 0,0002  | 0,752   | 1       | 0,012    | -0,014   | -0,867   | 0,012       |
| 36                       | -0,014 | -0,600 | -1     | 0,0002  | 0,360   | 1       | 0,008    | 0,014    | 0,600    | -0,008      |
| 37                       | -0,014 | -0,600 | -0,865 | 0,0002  | 0,360   | 0,748   | 0,008    | 0,012    | 0,519    | -0,007      |
| 38                       | -0,014 | -0,600 | -0,598 | 0,0002  | 0,360   | 0,358   | 0,008    | 0,008    | 0,359    | -0,005      |
| 39                       | -0,014 | -0,600 | -0,068 | 0,0002  | 0,360   | 0,005   | 0,008    | 0,001    | 0,041    | -0,001      |
| 40                       | -0,014 | -0,600 | 1      | 0,0002  | 0,360   | 1       | 0,008    | -0,014   | -0,600   | 0,008       |
| 41                       | -0,014 | -0,067 | -1     | 0,0002  | 0,004   | 1       | 0,001    | 0,014    | 0,067    | -0,001      |
| 42                       | -0,014 | -0,067 | -0,865 | 0,0002  | 0,004   | 0,748   | 0,001    | 0,012    | 0,058    | -0,001      |
| 43                       | -0,014 | -0,067 | -0,598 | 0,0002  | 0,004   | 0,358   | 0,001    | 0,008    | 0,040    | -0,001      |



Продолжение таблицы В.1

| 1  | 2      | 3      | 4      | 5      | 6     | 7     | 8      | 9      | 10     | 11     |
|----|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| 44 | -0,014 | -0,067 | -0,068 | 0,0002 | 0,004 | 0,005 | 0,001  | 0,001  | 0,005  | 0,000  |
| 45 | -0,014 | -0,067 | 1      | 0,0002 | 0,004 | 1     | 0,001  | -0,014 | -0,067 | 0,001  |
| 46 | -0,014 | 1      | -1     | 0,0002 | 1     | 1     | -0,014 | 0,014  | -1     | 0,014  |
| 47 | -0,014 | 1      | -0,865 | 0,0002 | 1     | 0,748 | -0,014 | 0,012  | -0,865 | 0,012  |
| 48 | -0,014 | 1      | -0,598 | 0,0002 | 1     | 0,358 | -0,014 | 0,008  | -0,598 | 0,008  |
| 49 | -0,014 | 1      | -0,068 | 0,0002 | 1     | 0,005 | -0,014 | 0,001  | -0,068 | 0,001  |
| 50 | -0,014 | 1      | 1      | 0,0002 | 1     | 1     | -0,014 | -0,014 | 1,000  | -0,014 |
| 51 | 1      | -1     | -1     | 1      | 1     | 1     | -1     | -1     | 1      | 1      |
| 52 | 1      | -1     | -0,865 | 1      | 1     | 0,748 | -1     | -0,865 | 0,865  | 0,865  |
| 53 | 1      | -1     | -0,598 | 1      | 1     | 0,358 | -1     | -0,598 | 0,598  | 0,598  |
| 54 | 1      | -1     | -0,068 | 1      | 1     | 0,005 | -1     | -0,068 | 0,068  | 0,068  |
| 55 | 1      | -1     | 1      | 1      | 1     | 1     | -1     | 1      | -1     | -1     |
| 56 | 1      | -0,867 | -1     | 1      | 0,752 | 1     | -0,867 | -1     | 0,867  | 0,867  |
| 57 | 1      | -0,867 | -0,865 | 1      | 0,752 | 0,748 | -0,867 | -0,865 | 0,750  | 0,750  |
| 58 | 1      | -0,867 | -0,598 | 1      | 0,752 | 0,358 | -0,867 | -0,598 | 0,518  | 0,518  |
| 59 | 1      | -0,867 | -0,068 | 1      | 0,752 | 0,005 | -0,867 | -0,068 | 0,059  | 0,059  |
| 60 | 1      | -0,867 | 1      | 1      | 0,752 | 1     | -0,867 | 1,000  | -0,867 | -0,867 |
| 61 | 1      | -0,600 | -1     | 1      | 0,360 | 1     | -0,600 | -1     | 0,600  | 0,600  |
| 62 | 1      | -0,600 | -0,865 | 1      | 0,360 | 0,748 | -0,600 | -0,865 | 0,519  | 0,519  |
| 63 | 1      | -0,600 | -0,598 | 1      | 0,360 | 0,358 | -0,600 | -0,598 | 0,359  | 0,359  |
| 64 | 1      | -0,600 | -0,068 | 1      | 0,360 | 0,005 | -0,600 | -0,068 | 0,041  | 0,041  |
| 65 | 1      | -0,600 | 1      | 1      | 0,360 | 1     | -0,600 | 1      | -0,600 | -0,600 |
| 66 | 1      | -0,067 | -1     | 1      | 0,004 | 1     | -0,067 | -1     | 0,067  | 0,067  |
| 67 | 1      | -0,067 | -0,865 | 1      | 0,004 | 0,748 | -0,067 | -0,865 | 0,058  | 0,058  |
| 68 | 1      | -0,067 | -0,598 | 1      | 0,004 | 0,358 | -0,067 | -0,598 | 0,040  | 0,040  |
| 69 | 1      | -0,067 | -0,068 | 1      | 0,004 | 0,005 | -0,067 | -0,068 | 0,005  | 0,005  |
| 70 | 1      | -0,067 | 1      | 1      | 0,004 | 1     | -0,067 | 1      | -0,067 | -0,067 |
| 71 | 1      | 1      | -1     | 1      | 1     | 1     | 1      | -1     | -1     | -1     |
| 72 | 1      | 1      | -0,865 | 1      | 1     | 0,748 | 1      | -0,865 | -0,865 | -0,865 |
| 73 | 1      | 1      | -0,598 | 1      | 1     | 0,358 | 1      | -0,598 | -0,598 | -0,598 |
| 74 | 1      | 1      | -0,068 | 1      | 1     | 0,005 | 1      | -0,068 | -0,068 | -0,068 |
| 75 | 1      | 1      | 1      | 1      | 1     | 1     | 1      | 1      | 1      | 1      |

Уравнения регрессии в натуральных значениях факторов для разных покрытий:

Р6М5 от взаимодействия твёрдости  $HB$ , усилия  $F$  и скорости  $v$ :

$$\begin{aligned}
 M_{\text{тр}} = & 12,0053 - 0,1309 \cdot HB - 2,9080 \cdot 10^{-4} \cdot F - 0,4631 \cdot v + 9,5104 \cdot 10^{-7} \cdot HB \cdot F + \\
 & + 1,8953 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v + 6,7401 \cdot 10^{-4} \cdot F \cdot v - 3,8903 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F \cdot v + 3,6536 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 + \\
 & + 5,8129 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 + 0,3939 \cdot v^2
 \end{aligned} \quad (B.1)$$

Р6М5 от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$\begin{aligned}
 M_{\text{тр}} = & 11,9107 - 0,1304 \cdot HB - 1,1353 \cdot 10^{-4} \cdot F + 3,6536 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 - \\
 & - 7,2094 \cdot 10^{-8} \cdot HB \cdot F + 5,8129 \cdot 10^{-7} \cdot F^2
 \end{aligned} \quad (B.2)$$

Р6М5 от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$M_{\text{тр}} = 12,0041 - 0,1304 \cdot HB - 0,1288 \cdot v + 3,6536 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 - 3,4275 \cdot 10^{-5} \cdot HB \cdot v + 0,3939 \cdot v^2 \quad (\text{B.3})$$

Р6М5 от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$M_{\text{тр}} = 0,2883 - 1,1866 \cdot 10^{-4} \cdot F - 0,1200 \cdot v + 5,8129 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 - 3,0124 \cdot 10^{-5} \cdot F \cdot v + 0,3939 \cdot v^2 \quad (\text{B.4})$$

TiN от взаимодействия твёрдости  $HB$ , усилия  $F$  и скорости  $v$ :

$$M_{\text{тр}} = 0,7590 - 4,3887 \cdot 10^{-3} \cdot HB - 4,8081 \cdot 10^{-4} \cdot F + 0,4617 \cdot v + 3,0119 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F - 3,3826 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v - 3,2201 \cdot 10^{-3} \cdot F \cdot v + 1,7558 \cdot 10^{-5} \cdot HB \cdot F \cdot v + 1,1764 \cdot 10^{-5} \cdot HB^2 + 4,3601 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 + 0,3523 \cdot v^2 \quad (\text{B.5})$$

TiN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$M_{\text{тр}} = 0,9048 - 5,2783 \cdot 10^{-3} \cdot HB - 1,3277 \cdot 10^{-3} \cdot F + 1,1764 \cdot 10^{-5} \cdot HB^2 + 7,6297 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F + 4,3601 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 \quad (\text{B.6})$$

TiN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$M_{\text{тр}} = 0,6277 - 2,8948 \cdot 10^{-3} \cdot HB - 1,1355 \cdot v + 1,1764 \cdot 10^{-5} \cdot HB^2 + 5,3263 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v + 0,3523 \cdot v^2 \quad (\text{B.7})$$

TiN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$M_{\text{тр}} = 0,3500 + 6,4334 \cdot 10^{-5} \cdot F - 0,1501 \cdot v + 4,3601 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 - 4,2054 \cdot 10^{-5} \cdot F \cdot v + 0,3523 \cdot v^2 \quad (\text{B.8})$$

TiCN от взаимодействия твёрдости  $HB$ , усилия  $F$  и скорости  $v$ :

$$M_{\text{тр}} = -3,0835 + 3,7101 \cdot 10^{-2} \cdot HB - 1,260 \cdot 10^{-3} \cdot F + 0,1462 \cdot v + 6,7702 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F - 2,2183 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v - 2,3802 \cdot 10^{-3} \cdot F \cdot v + 1,3023 \cdot 10^{-5} \cdot HB \cdot F \cdot v - 9,8954 \cdot 10^{-5} \cdot HB^2 + 5,5796 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 + 0,4225 \cdot v^2 \quad (\text{B.9})$$

TiCN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$M_{\text{тр}} = -3,0158 + 3,6517 \cdot 10^{-2} \cdot HB - 1,8860 \cdot 10^{-3} \cdot F - 9,8954 \cdot 10^{-5} \cdot HB^2 + 1,0195 \cdot 10^{-5} \cdot HB \cdot F + 5,5796 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 \quad (\text{B.10})$$

TiCN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$M_{\text{тр}} = -3,5712 + 4,0459 \cdot 10^{-2} \cdot HB - 1,0344 \cdot v - 9,8954 \cdot 10^{-5} \cdot HB^2 + 4,2412 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v + 0,4225 \cdot v^2 \quad (\text{B.11})$$

TiCN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$M_{тр} = 0,3899 - 3,4630 \cdot 10^{-5} \cdot F - 0,2553 \cdot v + 5,5796 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 - 2,2990 \cdot 10^{-5} \cdot F \cdot v + 0,4225 \cdot v^2 \quad (B.12)$$

TiZrN от взаимодействия твёрдости  $HB$ , усилия  $F$  и скорости  $v$ :

$$M_{тр} = -5,8765 + 6,6043 \cdot 10^{-2} \cdot HB - 9,2614 \cdot 10^{-6} \cdot F - 3,7099 \cdot 10^{-2} \cdot v + 1,4409 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F - 1,0084 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v - 5,6744 \cdot 10^{-4} \cdot F \cdot v + 2,1946 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F \cdot v - 1,7576 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 + 2,5179 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 + 0,4962 \cdot v^2 \quad (B.13)$$

TiZrN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$M_{тр} = -5,8519 + 6,5778 \cdot 10^{-2} \cdot HB - 1,5850 \cdot 10^{-4} \cdot F - 1,7576 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 + 2,0181 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F + 2,5179 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 \quad (B.14)$$

TiZrN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$M_{тр} = -5,8191 + 6,6758 \cdot 10^{-2} \cdot HB - 0,3186 \cdot v - 1,7576 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 + 8,0144 \cdot 10^{-5} \cdot HB \cdot v + 0,4962 \cdot v^2 \quad (B.15)$$

TiZrN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$M_{тр} = 0,3192 + 2,5155 \cdot 10^{-4} \cdot F - 0,2196 \cdot v + 2,5179 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 - 1,7022 \cdot 10^{-4} \cdot F \cdot v + 0,4962 \cdot v^2 \quad (B.16)$$

Уравнения регрессии в кодированных значениях:

P6M5 от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$y = 0,4883 + 0,0315 \cdot x_1 + 0,3984 \cdot x_2 + 0,1052 \cdot x_1^2 - 0,0005 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,2091 \cdot x_2^2 \quad (B.17)$$

P6M5 от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$y = 0,4861 + 0,0315 \cdot x_1 + 0,0475 \cdot x_3 + 0,1052 \cdot x_1^2 - 0,0003 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0399 \cdot x_3^2 \quad (B.18)$$

P6M5 от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$y = 0,5474 + 0,3966 \cdot x_2 + 0,0457 \cdot x_3 + 0,2091 \cdot x_2^2 - 0,0058 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0399 \cdot x_3^2 \quad (B.19)$$

TiN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$y = 0,5924 + 0,0711 \cdot x_1 + 0,3881 \cdot x_2 + 0,0027 \cdot x_1^2 + 0,0784 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,1569 \cdot x_2^2 \quad (B.20)$$

TiN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$y = 0,5569 + 0,0558 \cdot x_1 + 0,0264 \cdot x_3 + 0,0027 \cdot x_1^2 + 0,0289 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0357 \cdot x_3^2 \quad (B.21)$$

TiN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$y = 0,5789 + 0,3853 \cdot x_2 + 0,0238 \cdot x_3 + 0,1569 \cdot x_2^2 - 0,0080 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0357 \cdot x_3^2 \quad (B.22)$$

TiCN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$y = 0,6066 + 0,1299 \cdot x_1 + 0,4314 \cdot x_2 - 0,0300 \cdot x_1^2 + 0,1047 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,2007 \cdot x_2^2 \quad (B.23)$$

TiCN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$y = 0,5764 + 0,1049 \cdot x_1 + 0,0122 \cdot x_3 - 0,0300 \cdot x_1^2 + 0,0230 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0429 \cdot x_3^2 \quad (B.24)$$

TiCN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$y = 0,5626 + 0,4296 \cdot x_2 + 0,0107 \cdot x_3 + 0,2007 \cdot x_2^2 - 0,0044 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0429 \cdot x_3^2 \quad (B.25)$$

TiZrN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$y = 0,5802 + 0,0598 \cdot x_1 + 0,3296 \cdot x_2 - 0,0516 \cdot x_1^2 + 0,0203 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0906 \cdot x_2^2 \quad (B.26)$$

TiZrN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$y = 0,5095 + 0,0538 \cdot x_1 + 0,0171 \cdot x_3 - 0,0516 \cdot x_1^2 + 0,0005 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,0503 \cdot x_3^2 \quad (B.27)$$

TiZrN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181:

$$y = 0,5165 + 0,3196 \cdot x_2 + 0,0071 \cdot x_3 + 0,0906 \cdot x_2^2 - 0,0325 \cdot x_2 \cdot x_3 + 0,0503 \cdot x_3^2 \quad (B.28)$$

Таблица В.2 – Криволинейная корреляция и регрессия

| Параметр      | $\eta$ | $\eta^2$ | $S_\eta$ | $t$    | $F$     | $G_p$  |
|---------------|--------|----------|----------|--------|---------|--------|
| P6M5 HB-F- v  | 0,989  | 0,978    | 0,017    | 57,41  | 288,92  | 0,4932 |
| P6M5 HB-F     | 0,984  | 0,967    | 0,021    | 46,58  | 410,02  | –      |
| P6M5 HB-v     | 0,642  | 0,413    | 0,090    | 7,16   | 9,70    | –      |
| P6M5 F-v      | 0,998  | 0,996    | 0,007    | 136,29 | 1628,55 | –      |
| TiN HB-F- v   | 0,973  | 0,947    | 0,027    | 36,07  | 114,03  | 0,4883 |
| TiN HB-F      | 0,967  | 0,935    | 0,030    | 32,35  | 197,86  | –      |
| TiN HB-v      | 0,709  | 0,503    | 0,082    | 8,60   | 13,98   | –      |
| TiN F-v       | 0,949  | 0,900    | 0,037    | 25,59  | 123,83  | –      |
| TiCN HB-F- v  | 0,973  | 0,947    | 0,027    | 36,25  | 115,21  | 0,4913 |
| TiCN HB-F     | 0,972  | 0,944    | 0,028    | 35,18  | 233,97  | –      |
| TiCN HB-v     | 0,636  | 0,404    | 0,090    | 7,04   | 9,37    | –      |
| TiCN F-v      | 0,929  | 0,863    | 0,043    | 21,47  | 87,14   | –      |
| TiZrN HB-F- v | 0,969  | 0,939    | 0,029    | 33,64  | 99,20   | 0,4892 |
| TiZrN HB-F    | 0,968  | 0,937    | 0,029    | 32,93  | 205,04  | –      |
| TiZrN HB-v    | 0,845  | 0,714    | 0,063    | 13,51  | 34,52   | –      |
| TiZrN F-v     | 0,958  | 0,917    | 0,034    | 28,42  | 152,67  | –      |

Примечание – Здесь  $\eta$  – корреляционное отношение;  $\eta^2$  – коэффициент детерминации;  $S_\eta$  – ошибка критерия существенности корреляционного отношения;  $t$  – критерий Стьюдента;  $F$  – критерий Фишера;  $G_p$  – расчётное значение критерия Кохрена.

Уравнения в канонической форме:

P6M5 от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$Y_{12} - 0,296 = 0,209 \cdot X_1^2 + 0,105 \cdot X_2^2 \quad (B.29)$$

P6M5 от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$Y_{12} - 0,470 = 0,040 \cdot X_1^2 + 0,105 \cdot X_3^2 \quad (B.30)$$

P6M5 от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp} 181$ :

$$Y_{12} - 0,343 = 0,040 \cdot X_2^2 + 0,209 \cdot X_3^2 \quad (B.31)$$

TiN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$Y_{12} - 0,376 = 0,166 \cdot X_1^2 - 0,007 \cdot X_2^2 \quad (B.32)$$

TiN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$Y_{12} - 0,714 = 0,041 \cdot X_1^2 - 0,003 \cdot X_3^2 \quad (B.33)$$

TiN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp} 181$ :

$$Y_{12} - 0,334 = 0,036 \cdot X_2^2 + 0,157 \cdot X_3^2 \quad (B.34)$$

TiCN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$Y_{12} - 0,377 = -0,041 \cdot X_1^2 + 0,212 \cdot X_2^2 \quad (B.35)$$

TiCN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$Y_{12} - 0,654 = -0,032 \cdot X_1^2 + 0,045 \cdot X_3^2 \quad (B.36)$$

TiCN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp} 181$ :

$$Y_{12} - 0,331 = 0,043 \cdot X_2^2 + 0,201 \cdot X_3^2 \quad (B.37)$$

TiZrN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с:

$$Y_{12} - 0,283 = 0,091 \cdot X_1^2 - 0,052 \cdot X_2^2 \quad (B.38)$$

TiZrN от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н:

$$Y_{12} - 0,522 = 0,050 \cdot X_1^2 - 0,052 \cdot X_3^2 \quad (B.39)$$

TiZrN от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp} 181$ :

$$Y_{12} - 0,213 = 0,045 \cdot X_2^2 + 0,096 \cdot X_3^2 \quad (B.40)$$

Таблица В.3 – Данные расчёта координат центра поверхности отклика и чисел характеристического уравнения при построении двухмерного сечения в кодированной форме

| Параметр   | $Y_S$ | $x_{1S}$ | $x_{2S}$ | $x_{3S}$ | $B_{11}$ | $B_{22}$ | $B_{33}$ | $\alpha$ , град |
|------------|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| P6M5 HB-F  | 0,296 | -0,152   | -0,953   | —        | 0,209    | 0,105    | —        | 0,14            |
| P6M5 HB-v  | 0,470 | -0,151   | —        | -0,596   | 0,040    | —        | 0,105    | -0,13           |
| P6M5 F-v   | 0,343 | —        | -0,957   | -0,642   | —        | 0,040    | 0,209    | -0,98           |
| TiN HB-F   | 0,376 | -1,823   | -0,781   | —        | 0,166    | -0,007   | —        | 13,48           |
| TiN HB-v   | 0,714 | 7,164    | —        | -3,269   | 0,041    | —        | -0,003   | -20,61          |
| TiN F-v    | 0,334 | —        | -1,240   | -0,472   | —        | 0,036    | 0,157    | -1,89           |
| TiCN HB-F  | 0,377 | 0,199    | -1,127   | —        | -0,041   | 0,212    | —        | 12,21           |
| TiCN HB-v  | 0,654 | 1,536    | —        | -0,554   | -0,032   | —        | 0,045    | 8,755           |
| TiCN F-v   | 0,331 | —        | -1,072   | -0,180   | —        | 0,043    | 0,201    | -0,80           |
| TiZrN HB-F | 0,283 | 0,217    | -1,843   | —        | 0,091    | -0,052   | —        | 4,06            |
| TiZrN HB-v | 0,522 | 0,520    | —        | -0,173   | 0,050    | —        | -0,052   | -0,14           |
| TiZrN F-v  | 0,213 | —        | -1,886   | -0,680   | —        | 0,045    | 0,096    | 19,44           |

Таблица В.4 – Данные расчёта координат центра поверхности отклика и координатных осей главных направлений канонического уравнения при построении двухмерного сечения

| Параметр      | Момент трения,<br>Н·м ( $Y$ ) | Твёрдость,<br>$HB$ ( $x_1$ ) | Усилие $F$ ,<br>Н ( $x_2$ ) | Скорость $v$ ,<br>м/с ( $x_3$ ) | Угол<br>наклона<br>осей $\alpha$ ,<br><i>град</i> |
|---------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---|
| P6M5 HB-F     | 0,296                         | 178,6                        | 108,2                       | –                               | 0,14  |
| P6M5 HB- $v$  | 0,470                         | 178,6                        | –                           | 0,171                           | – 0,13  |
| P6M5 F- $v$   | 0,343                         | –                            | 105,8                       | 0,156                           | – 0,98  |
| TiN HB-F      | 0,376                         | 149,8                        | 211,4                       | –                               | 13,48   |
| TiN HB- $v$   | 0,714                         | 304,8                        | –                           | – 0,681                         | – 20,61   |
| TiN F- $v$    | 0,334                         | –                            | 64                          | 0,210                           | – 1,89  |
| TiCN HB-F     | 0,377                         | 184,7                        | 3,8                         | –                               | 12,21   |
| TiCN HB- $v$  | 0,654                         | 207,7                        | –                           | 0,184                           | 8,755   |
| TiCN F- $v$   | 0,331                         | –                            | 36,8                        | 0,303                           | – 0,80  |
| TiZrN HB-F    | 0,283                         | 185,0                        | – 425,8                     | –                               | 4,06  |
| TiZrN HB- $v$ | 0,522                         | 190,2                        | –                           | 0,305                           | – 0,14  |
| TiZrN F- $v$  | 0,213                         | –                            | – 451,6                     | 0,144                           | 19,44   |

Приложение Г  
(справочное)

Поверхности отклика

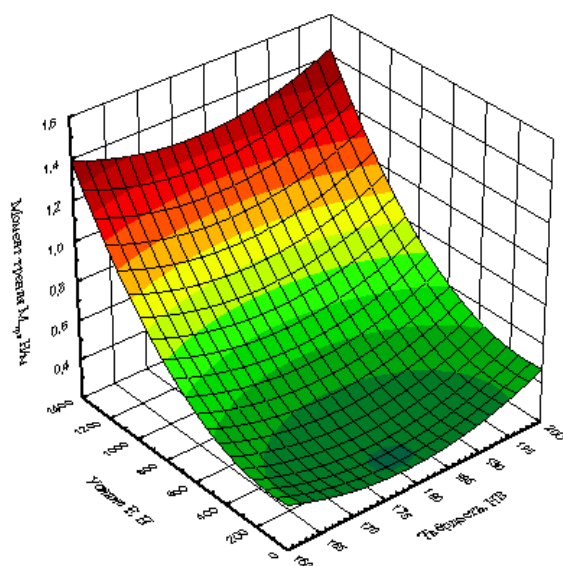


Рисунок Г.1 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твердости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (P6M5)

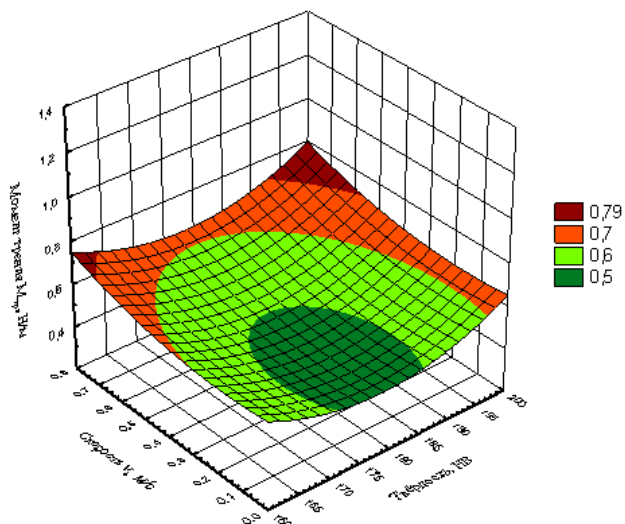


Рисунок Г.2 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н (P6M5)

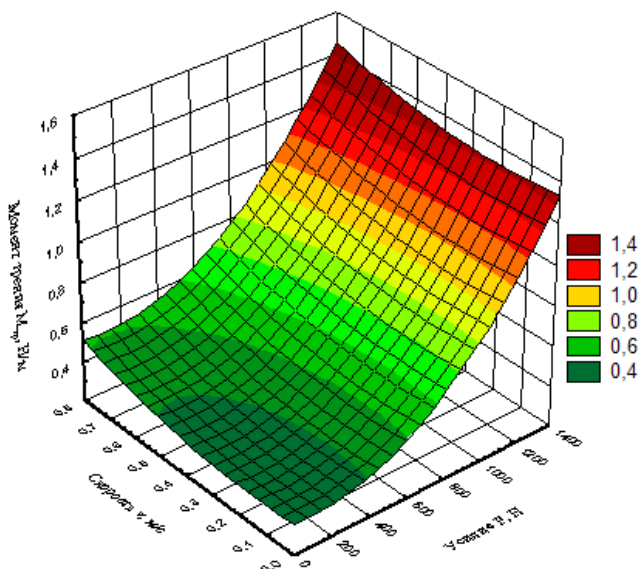


Рисунок Г.3 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp} 181$  (P6M5)

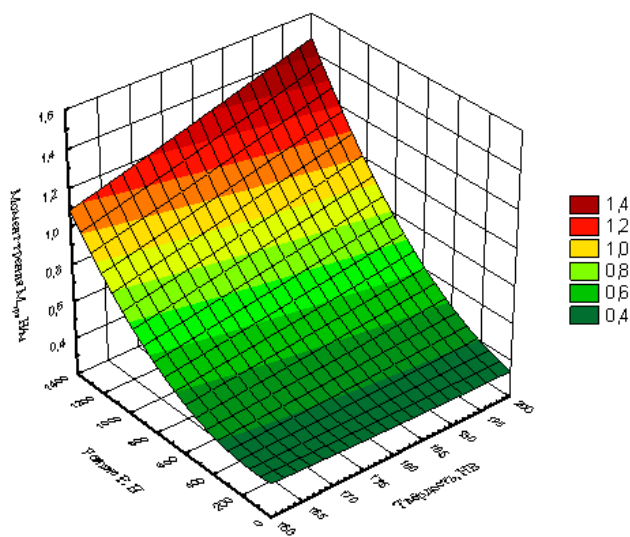


Рисунок Г.4 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твердости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (TiN)



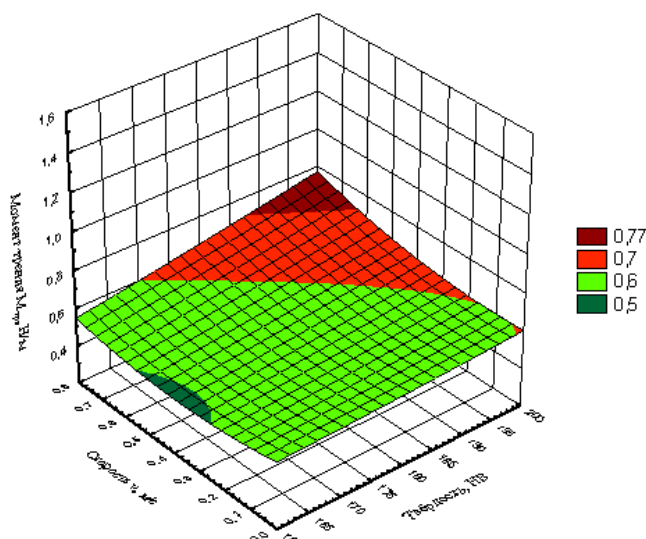


Рисунок Г.5 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н (TiN)

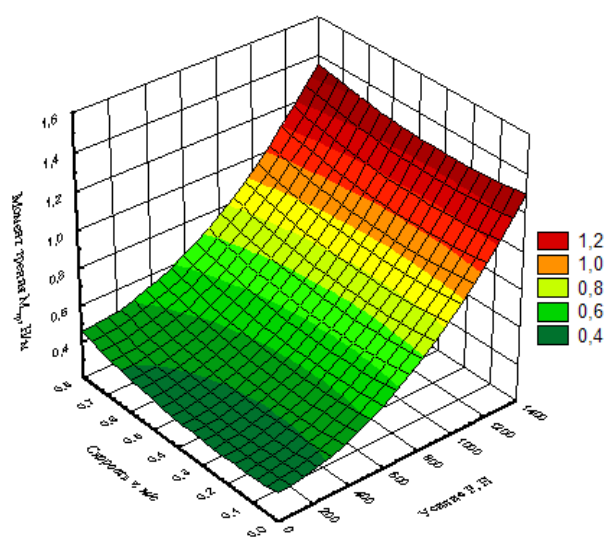


Рисунок Г.6 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp} 181$  (TiN)

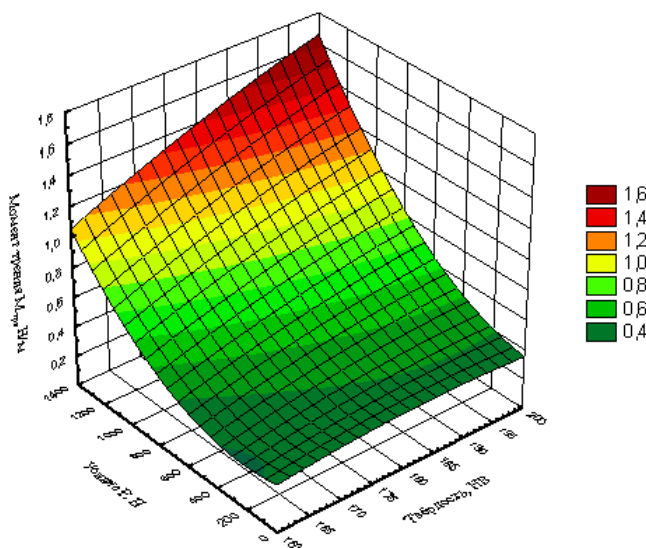


Рисунок Г.7 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (TiCN)

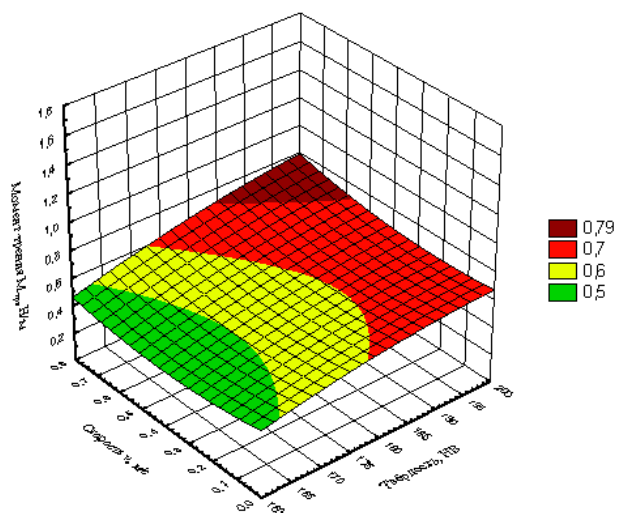


Рисунок Г.8 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н (TiCN)

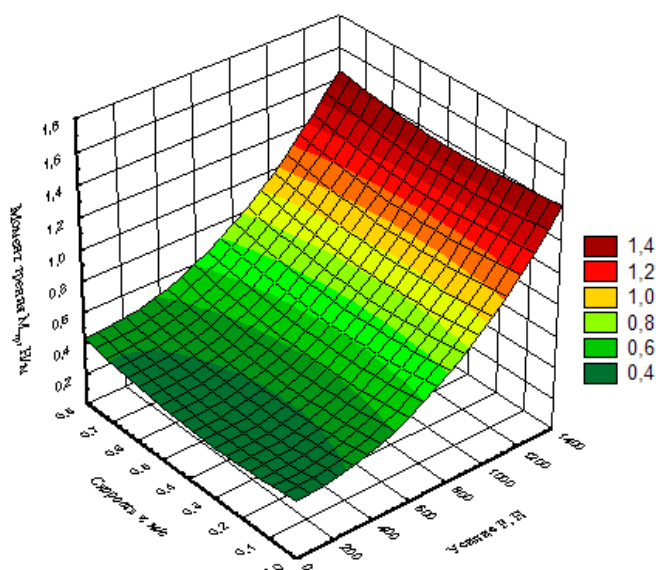


Рисунок Г.9 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181 (TiCN)

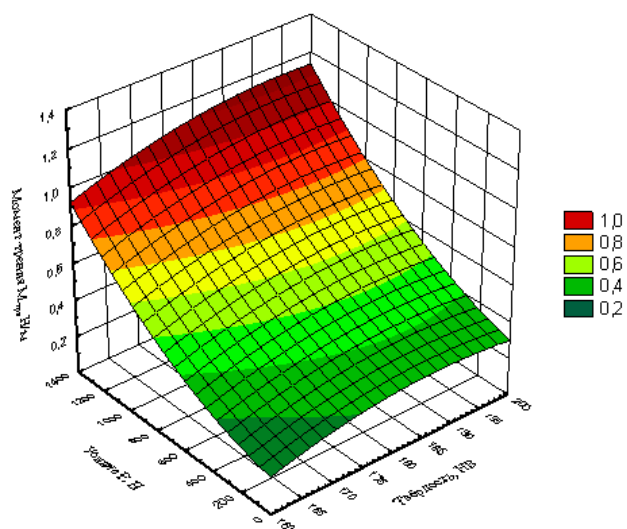


Рисунок Г.10 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твердости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp}$  0,263 м/с (TiZrN)

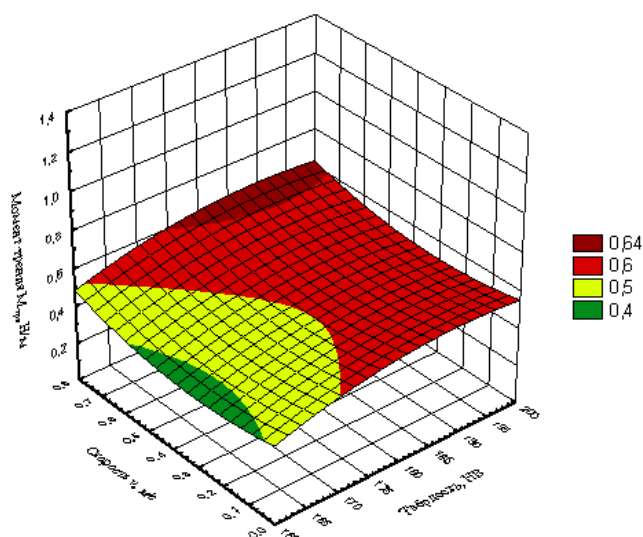


Рисунок Г.11 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твердости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp}$  496 Н (TiZrN)

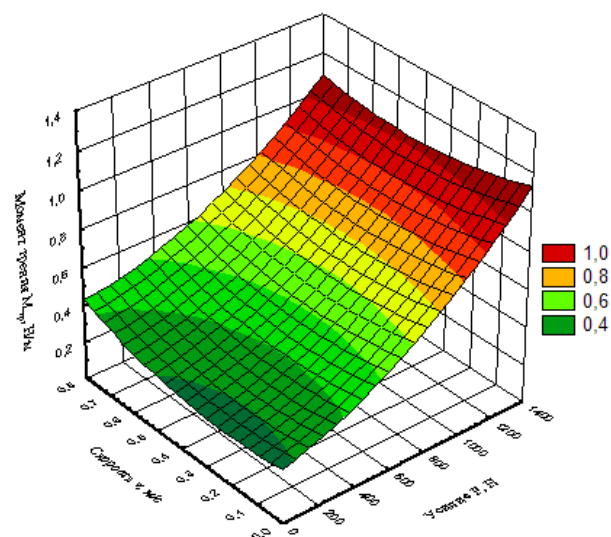


Рисунок Г.12 – Поверхность отклика момента трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181 (TiZrN)

Приложение Д  
(справочное)

Двухмерное сечение поверхности отклика

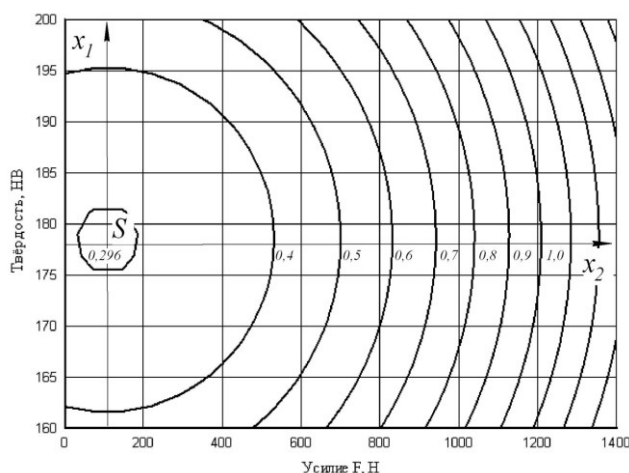


Рисунок Д.1 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (Р6М5)

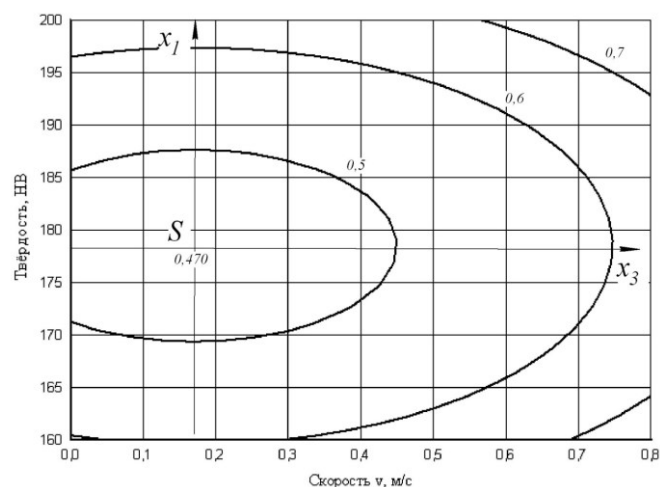


Рисунок Д.2 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н (Р6М5)

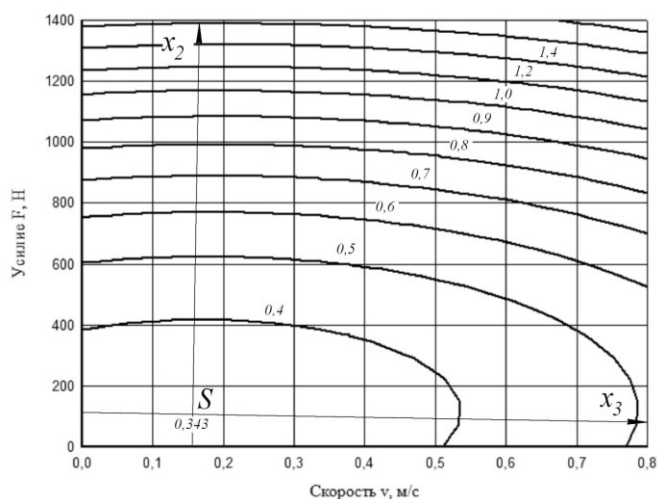


Рисунок Д.3 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp} = 181$  (Р6М5)

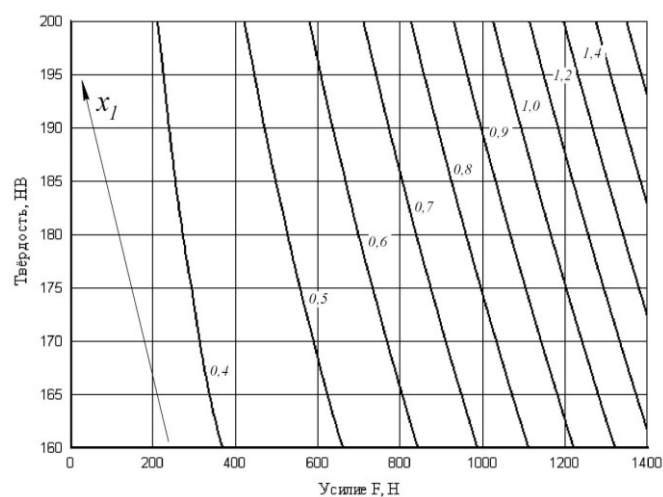


Рисунок Д.4 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (TiN)

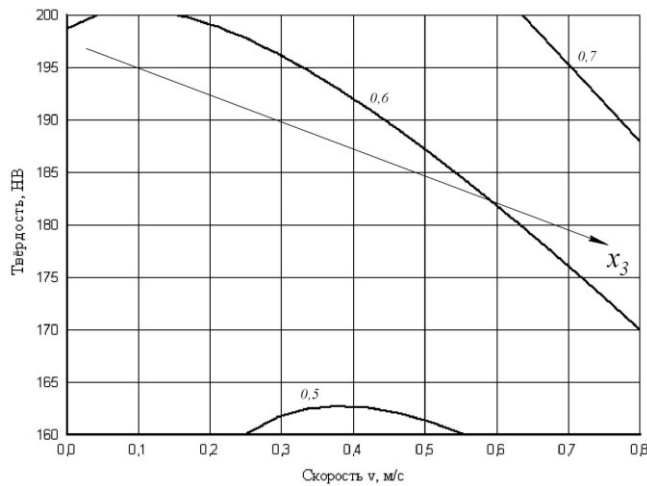


Рисунок Д.5 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HV$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н (TiN)

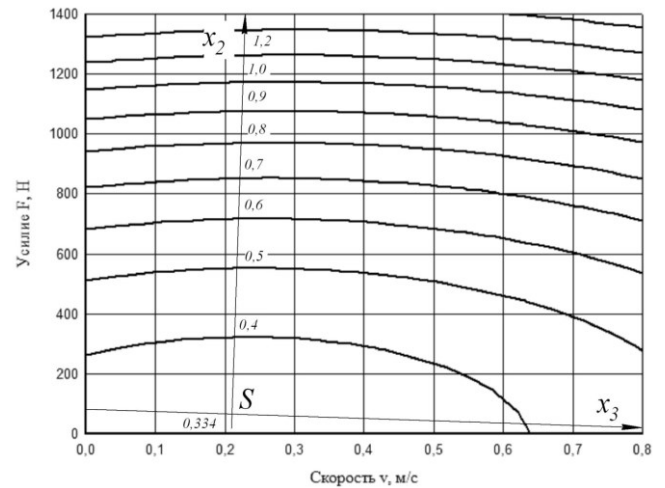


Рисунок Д.6 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HV_{cp} 181$  (TiN)

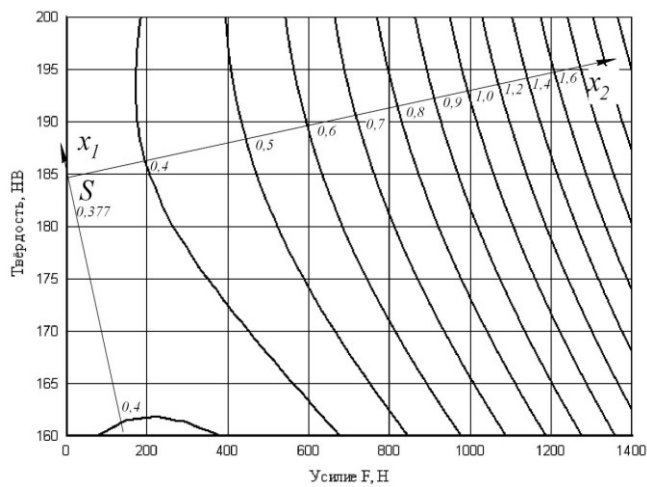


Рисунок Д.7 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HV$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (TiCN)

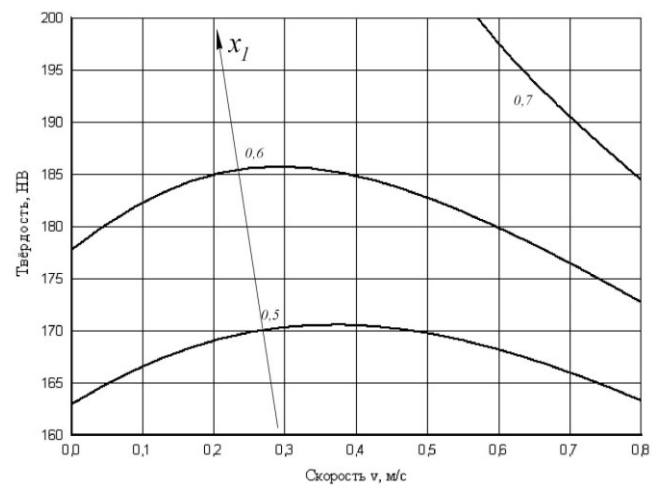


Рисунок Д.8 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HV$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н (TiCN)

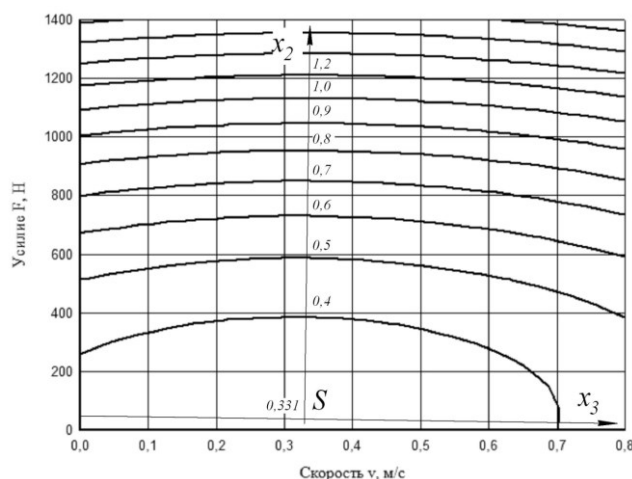


Рисунок Д.9 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181 (TiCN)

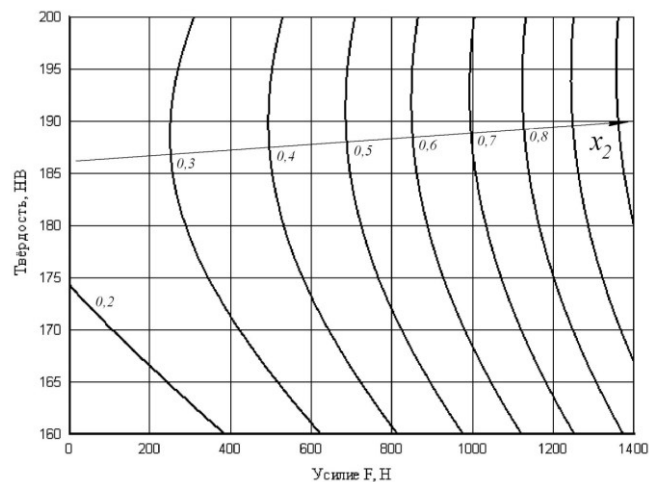


Рисунок Д.10 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и усилия  $F$  при  $v_{cp} = 0,263$  м/с (TiZrN)

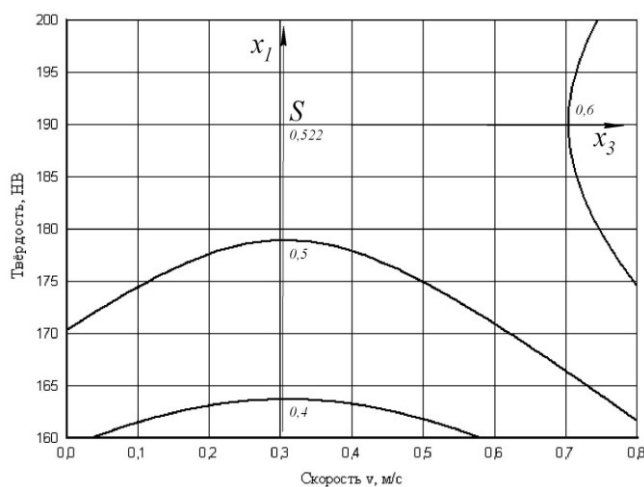


Рисунок Д.11 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия твёрдости  $HB$  и скорости  $v$  при  $F_{cp} = 496$  Н (TiZrN)

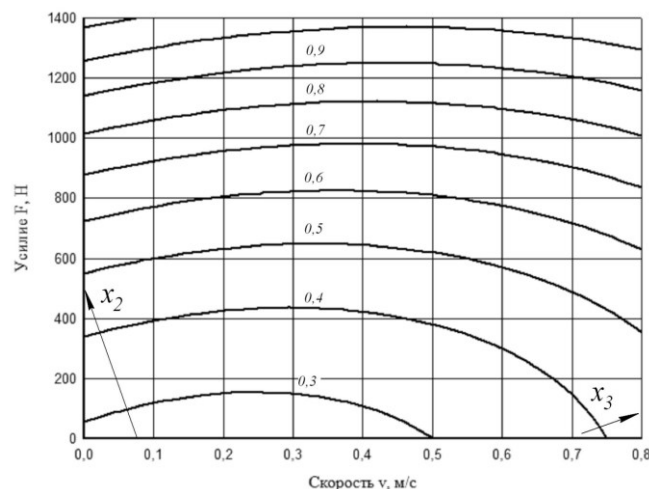


Рисунок Д.12 – Двухмерное сечение поверхности отклика, характеризующей момент трения  $M_{тр}$  от взаимодействия усилия  $F$  и скорости  $v$  при  $HB_{cp}$  181 (TiZrN)

Таблица Е.1 – Ведомость замены накатных роликов 1126.03.009 из Р6М5, стан №4

[illegible]

Продолжение таблицы Е.1

| 1        | 2                             | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18    |
|----------|-------------------------------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|
| 29.04.08 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 15.05.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | X  |    |    |    | 2320  |
| 19.05.08 |                               |   |   |   | X |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 4712  |
| 20.05.08 |                               |   |   | X |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 6100  |
| 05.08.08 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 18.08.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | X  |    | 4800  |
| 25.08.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    | X  |    |    |    |    |    |    | 5850  |
| 05.09.08 |                               |   |   | X | X |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 6970  |
| 13.09.08 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 28.09.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | X  |    |    |    | 4000  |
| 31.10.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | X  |    |    |    |    | 5450  |
| 06.10.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    | X  |    | 6850  |
| 08.10.08 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 22.10.08 |                               |   |   |   |   |   |   | X |    |    |    |    |    |    |    |    | 3880  |
| 27.10.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    | X  |    |    |    |    | 4800  |
| 28.10.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | X  | 5141  |
| 29.10.08 |                               |   |   |   |   |   |   |   | X  |    |    |    |    |    |    |    | 5450  |
| 29.10.08 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 18.11.08 |                               |   |   |   |   |   | X |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 3045  |
| 04.12.08 | X                             |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    | X  |    |    |    | 7200  |
| 05.12.08 |                               |   |   |   |   |   |   | X |    |    |    |    |    |    |    |    | 7420  |
| 05.12.08 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 22.12.08 |                               |   |   |   |   |   |   | X |    |    |    |    |    |    |    |    | 3360  |
| 25.12.08 |                               | X |   |   |   | X |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 4260  |
| 17.02.09 |                               |   |   |   |   |   |   |   | X  |    |    |    |    |    |    |    | 4780  |
| 24.02.09 |                               |   |   |   | X |   | X |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 5500  |
| 27.02.09 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 21.05.09 |                               |   |   | X |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 6300  |
| 22.05.09 |                               |   |   |   |   | X | X |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 6500  |
| 25.05.09 |                               |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | X  |    |    | 6870  |
| 09.07.09 | Замена комплекта роликов      |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 06.08.09 |                               |   |   |   |   | X |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 4900  |
| 12.08.09 |                               |   | X | X |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 5550  |
| 12.08.09 | Установка роликов с покрытием |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |       |
| 29.09.09 |                               |   | X |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 9090  |
| 14.10.09 |                               |   |   |   |   | X | X |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 10350 |
| 18.11.09 |                               |   |   | X |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 11120 |

Примечание – Средняя стойкость роликов, в период с 24.09.07 по 18.11.09, без покрытия составила 5544 накатанных детали, с покрытием 10897 деталей, коэффициент повышения стойкости накатных роликов составил  $K_T = 1,9$ .

Приложение Ж  
(справочное)

**Параллельность и толщина шлиц при накатывании шлицевого профиля на валах**

Накатные ролики Р6М5 без покрытия и с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

Стан накатной № 4      Заготовка – 1020      Материал – Сталь 45

Скорость деформирования  $v_{def} = 0,0266$  м/с

Таблица Ж.1 – Параллельность шлиц получаемая накатными роликами без покрытий

| НВ               | Коорд.<br>Сеч.,мм | № шлиц п/п |       |              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |              |       |
|------------------|-------------------|------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------|-------|
|                  |                   | 1          | 2     | 3            | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15           | 16    |
| 156...<br>...172 | 10                | 0,004      | 0,004 | 0,008        | 0,008 | 0,006 | 0,008 | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,004 | 0,002 | 0,014 | 0,004 | 0,004 | 0,002        | 0,002 |
|                  | 15                | 0,010      | 0,008 | 0,012        | 0,012 | 0,014 | 0,016 | 0,008 | 0,014 | 0,010 | 0,006 | 0,008 | 0,022 | 0,008 | 0,008 | 0,004        | 0,010 |
|                  | 30                | 0,022      | 0,024 | 0,018        | 0,027 | 0,034 | 0,030 | 0,017 | 0,022 | 0,022 | 0,016 | 0,012 | 0,024 | 0,008 | 0,012 | 0,008        | 0,020 |
|                  | 50                | 0,036      | 0,040 | 0,030        | 0,038 | 0,048 | 0,038 | 0,024 | 0,024 | 0,030 | 0,024 | 0,012 | 0,024 | 0,010 | 0,016 | 0,010        | 0,034 |
|                  | 70                | 0,046      | 0,046 | 0,042        | 0,050 | 0,056 | 0,050 | 0,038 | 0,030 | 0,040 | 0,030 | 0,014 | 0,030 | 0,012 | 0,016 | 0,010        | 0,046 |
| 173...<br>...189 | 10                | 0,004      | 0,002 | 0,001        | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0,005 | 0,007 | 0,004 | 0,006 | 0,005 | 0,007 | 0,009 | 0,006        | 0,005 |
|                  | 15                | 0,007      | 0,003 | 0,002        | 0,007 | 0,010 | 0,010 | 0,009 | 0,014 | 0,010 | 0,010 | 0,012 | 0,004 | 0,012 | 0,013 | 0,006        | 0,005 |
|                  | 30                | 0,015      | 0,003 | 0,002        | 0,011 | 0,014 | 0,018 | 0,020 | 0,030 | 0,034 | 0,032 | 0,022 | 0,016 | 0,022 | 0,020 | 0,004        | 0,010 |
|                  | 50                | 0,015      | 0,003 | 0,001        | 0,015 | 0,021 | 0,040 | 0,038 | 0,050 | 0,062 | 0,048 | 0,034 | 0,020 | 0,022 | 0,024 | <b>0,005</b> | 0,010 |
|                  | 70                | 0,013      | 0     | <b>0,003</b> | 0,021 | 0,040 | 0,058 | 0,055 | 0,070 | 0,070 | 0,056 | 0,040 | 0,030 | 0,038 | 0,024 | <b>0,008</b> | 0,020 |
| 190...<br>...207 | 10                | 0,010      | 0,006 | 0,006        | 0,005 | 0,006 | 0,008 | 0,006 | 0     | 0     | 0     | 0,004 | 0,002 | 0     | 0,002 | 0,002        | 0,006 |
|                  | 15                | 0,016      | 0,006 | 0,010        | 0,010 | 0,008 | 0,014 | 0,008 | 0,008 | 0,005 | 0,007 | 0,004 | 0,006 | 0,002 | 0,006 | 0,006        | 0,014 |
|                  | 30                | 0,036      | 0,020 | 0,026        | 0,022 | 0,020 | 0,028 | 0,020 | 0,020 | 0,016 | 0,014 | 0,012 | 0,006 | 0,008 | 0,016 | 0,012        | 0,022 |
|                  | 50                | 0,042      | 0,036 | 0,036        | 0,036 | 0,030 | 0,036 | 0,030 | 0,032 | 0,022 | 0,016 | 0,022 | 0,008 | 0,008 | 0,016 | 0,016        | 0,034 |
|                  | 70                | 0,056      | 0,052 | 0,046        | 0,052 | 0,044 | 0,056 | 0,040 | 0,060 | 0,044 | 0,020 | 0,030 | 0,010 | 0,010 | 0,018 | 0,016        | 0,046 |



Таблица Ж.2 – Параллельность шлиц получаемая накатными роликами с однослойными многокомпонентными покрытиями TiZrN

| НВ               | Коорд.<br>сеч.,мм | № шлиц п/п |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |                   | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| 156...<br>...172 | 10                | 0,002      | 0,004 | 0,002 | 0,002 | 0,004 | 0     | 0     | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0     | 0,004 | 0     | 0,002 | 0,002 | 0     |
|                  | 15                | 0,008      | 0,006 | 0,006 | 0,006 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,008 | 0,012 | 0,014 | 0,008 | 0,008 | 0,004 | 0,080 | 0,006 | 0,006 |
|                  | 30                | 0,018      | 0,008 | 0,008 | 0,010 | 0,012 | 0,012 | 0,008 | 0,022 | 0,018 | 0,024 | 0,014 | 0,022 | 0,020 | 0,016 | 0,012 | 0,018 |
|                  | 50                | 0,024      | 0,012 | 0,008 | 0,016 | 0,016 | 0,018 | 0,010 | 0,026 | 0,022 | 0,032 | 0,024 | 0,034 | 0,032 | 0,024 | 0,020 | 0,024 |
|                  | 70                | 0,026      | 0,014 | 0,010 | 0,018 | 0,016 | 0,018 | 0,014 | 0,032 | 0,028 | 0,036 | 0,030 | 0,036 | 0,036 | 0,034 | 0,024 | 0,028 |
| 173...<br>...189 | 10                | 0,005      | 0,004 | 0,005 | 0,005 | 0,005 | 0,006 | 0,005 | 0,004 | 0,004 | 0,003 | 0,004 | 0,006 | 0,002 | 0,004 | 0,003 | 0,003 |
|                  | 15                | 0,009      | 0,008 | 0,008 | 0,009 | 0,011 | 0,012 | 0,008 | 0,011 | 0,009 | 0,009 | 0,008 | 0,009 | 0,005 | 0,008 | 0,005 | 0,016 |
|                  | 30                | 0,023      | 0,018 | 0,025 | 0,018 | 0,021 | 0,021 | 0,017 | 0,026 | 0,022 | 0,019 | 0,014 | 0,016 | 0,013 | 0,015 | 0,011 | 0,020 |
|                  | 50                | 0,031      | 0,024 | 0,023 | 0,027 | 0,027 | 0,032 | 0,024 | 0,035 | 0,033 | 0,025 | 0,019 | 0,020 | 0,016 | 0,018 | 0,011 | 0,028 |
|                  | 70                | 0,036      | 0,028 | 0,027 | 0,033 | 0,037 | 0,040 | 0,030 | 0,041 | 0,039 | 0,026 | 0,020 | 0,019 | 0,018 | 0,020 | 0,012 | 0,034 |
| 190...<br>...207 | 10                | 0,004      | 0,002 | 0,006 | 0,006 | 0     | 0,006 | 0,004 | 0,004 | 0     | 0,002 | 0,004 | 0,004 | 0     | 0,004 | 0,004 | 0,004 |
|                  | 15                | 0,006      | 0,004 | 0,008 | 0,010 | 0,008 | 0,012 | 0,008 | 0,010 | 0,006 | 0,004 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,006 | 0,006 | 0,020 |
|                  | 30                | 0,020      | 0,010 | 0,012 | 0,022 | 0,016 | 0,018 | 0,018 | 0,028 | 0,022 | 0,008 | 0,010 | 0,012 | 0,006 | 0,014 | 0,014 | 0,026 |
|                  | 50                | 0,026      | 0,024 | 0,024 | 0,030 | 0,022 | 0,024 | 0,020 | 0,034 | 0,024 | 0,010 | 0,018 | 0,014 | 0,010 | 0,014 | 0,016 | 0,030 |
|                  | 70                | 0,032      | 0,030 | 0,034 | 0,032 | 0,028 | 0,030 | 0,022 | 0,038 | 0,030 | 0,010 | 0,020 | 0,016 | 0,014 | 0,020 | 0,020 | 0,036 |

#### Примечания

1. Отрицательные отклонения выделены *жирным курсивом* (  $-0,008 \Rightarrow \textbf{0,008}$  )

2. По техническим условиям:

– допускаемая параллельность шлиц по ГОСТ 1139 – 0,04 мм

– твёрдость заготовки – НВ 156...207

Таблица Ж.3 – Толщина шлиц получаемая накатными роликами без покрытий

| НВ               | Коорд.<br>сеч.,мм | № шлиц п/п |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |                   | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| 156...<br>...172 | 10                | 3,368      | 3,343 | 3,403 | 3,408 | 3,378 | 3,385 | 3,383 | 3,358 | 3,42  | 3,368 | 3,36  | 3,345 | 3,37  | 3,36  | 3,373 | 3,38  |
|                  | 40                | 3,388      | 3,343 | 3,41  | 3,408 | 3,365 | 3,395 | 3,383 | 3,365 | 3,423 | 3,37  | 3,365 | 3,34  | 3,378 | 3,353 | 3,37  | 3,383 |
|                  | 70                | 3,375      | 3,348 | 3,413 | 3,415 | 3,373 | 3,408 | 3,375 | 3,378 | 3,413 | 3,373 | 3,363 | 3,345 | 3,383 | 3,355 | 3,358 | 3,393 |
| 173...<br>...189 | 10                | 3,352      | 3,346 | 3,408 | 3,382 | 3,376 | 3,376 | 3,392 | 3,356 | 3,402 | 3,372 | 3,378 | 3,342 | 3,364 | 3,358 | 3,366 | 3,362 |
|                  | 40                | 3,356      | 3,344 | 3,398 | 3,388 | 3,386 | 3,376 | 3,384 | 3,35  | 3,404 | 3,378 | 3,386 | 3,342 | 3,358 | 3,364 | 3,366 | 3,358 |
|                  | 70                | 3,350      | 3,344 | 3,414 | 3,394 | 3,398 | 3,37  | 3,384 | 3,356 | 3,394 | 3,382 | 3,398 | 3,342 | 3,356 | 3,354 | 3,368 | 3,346 |
| 190...<br>...207 | 10                | 3,37       | 3,34  | 3,405 | 3,38  | 3,34  | 3,39  | 3,405 | 3,345 | 3,395 | 3,365 | 3,385 | 3,345 | 3,365 | 3,35  | 3,365 | 3,39  |
|                  | 40                | 3,345      | 3,345 | 3,41  | 3,385 | 3,35  | 3,392 | 3,39  | 3,345 | 3,395 | 3,37  | 3,4   | 3,34  | 3,355 | 3,34  | 3,36  | 3,385 |
|                  | 70                | 3,35       | 3,34  | 3,43  | 3,405 | 3,345 | 3,395 | 3,395 | 3,355 | 3,37  | 3,365 | 3,41  | 3,345 | 3,345 | 3,35  | 3,355 | 3,365 |

Таблица Ж.4 – Толщина шлиц получаемая накатными роликами с однослойными многокомпонентными покрытиями

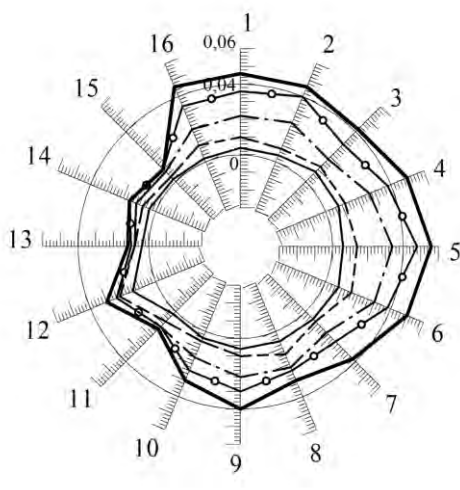
TiZrN

| НВ               | Коорд.<br>сеч.,мм | № шлиц п/п |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------------|-------------------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                  |                   | 1          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| 156...<br>...172 | 10                | 3,417      | 3,435 | 3,46  | 3,461 | 3,418 | 3,439 | 3,461 | 3,449 | 3,431 | 3,435 | 3,459 | 3,456 | 3,42  | 3,437 | 3,462 | 3,445 |
|                  | 40                | 3,42       | 3,434 | 3,464 | 3,462 | 3,42  | 3,427 | 3,47  | 3,445 | 3,422 | 3,421 | 3,456 | 3,459 | 3,418 | 3,426 | 3,474 | 3,446 |
|                  | 70                | 3,422      | 3,439 | 3,47  | 3,47  | 3,42  | 3,429 | 3,47  | 3,447 | 3,427 | 3,424 | 3,455 | 3,462 | 3,416 | 3,429 | 3,475 | 3,451 |
| 173...<br>...189 | 10                | 3,422      | 3,42  | 3,43  | 3,46  | 3,417 | 3,42  | 3,466 | 3,427 | 3,422 | 3,452 | 3,47  | 3,46  | 3,42  | 3,45  | 3,47  | 3,447 |
|                  | 40                | 3,419      | 3,42  | 3,432 | 3,46  | 3,422 | 3,424 | 3,468 | 3,43  | 3,419 | 3,445 | 3,47  | 3,46  | 3,425 | 3,445 | 3,467 | 3,462 |
|                  | 70                | 3,427      | 3,415 | 3,445 | 3,462 | 3,435 | 3,42  | 3,47  | 3,43  | 3,42  | 3,45  | 3,465 | 3,467 | 3,422 | 3,44  | 3,468 | 3,47  |
| 190...<br>...207 | 10                | 3,42       | 3,445 | 3,456 | 3,452 | 3,42  | 3,449 | 3,455 | 3,446 | 3,428 | 3,432 | 3,441 | 3,459 | 3,425 | 3,43  | 3,465 | 3,43  |
|                  | 40                | 3,42       | 3,45  | 3,461 | 3,451 | 3,423 | 3,449 | 3,467 | 3,445 | 3,42  | 3,431 | 3,439 | 3,46  | 3,424 | 3,427 | 3,468 | 3,427 |
|                  | 70                | 3,425      | 3,451 | 3,467 | 3,459 | 3,43  | 3,455 | 3,471 | 3,452 | 3,424 | 3,432 | 3,446 | 3,462 | 3,428 | 3,43  | 3,47  | 3,435 |

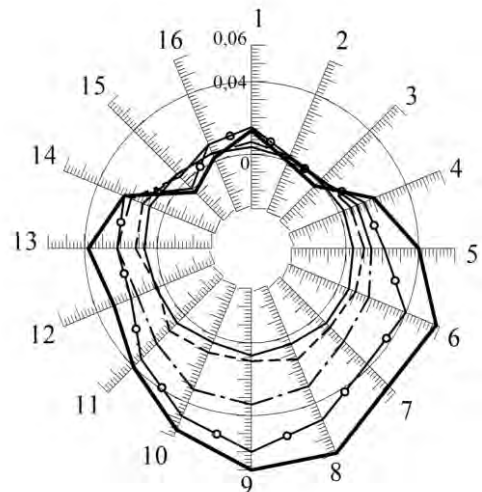
Примечание – По техническим условиям: толщина шлиц –  $3,5_{-0,078}^{-0,03}$  мм; твёрдость заготовки – НВ 156...207.

Диаграммы параллельности шлиц при накатывании шлицевого профиля на заготовках сталь 45 накатными роликами Р6М5 без покрытий и с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

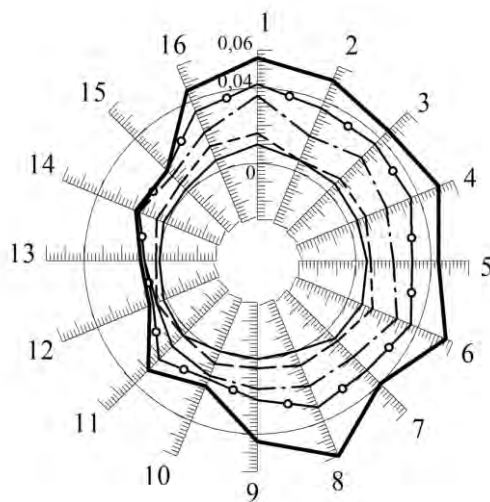
1...16 – порядковый номер шлица; поле допуска отклонений 0...0,04 мм по ГОСТ 1139-80; ——— отклонение от параллельности на расстоянии 10 мм от торца заготовки; - - - отклонение от параллельности на расстоянии 15 мм от торца заготовки; — · — отклонение от параллельности на расстоянии 30 мм от торца заготовки; —○— отклонение от параллельности на расстоянии 50 мм от торца заготовки; ——— отклонение от параллельности на расстоянии 70 мм от торца заготовки.



а)



б)



в)

Рисунок Ж.1 – Диаграммы параллельности шлиц полученных без использования покрытий: а) HB 156-172; б) HB 173-189; в) HB 190-207

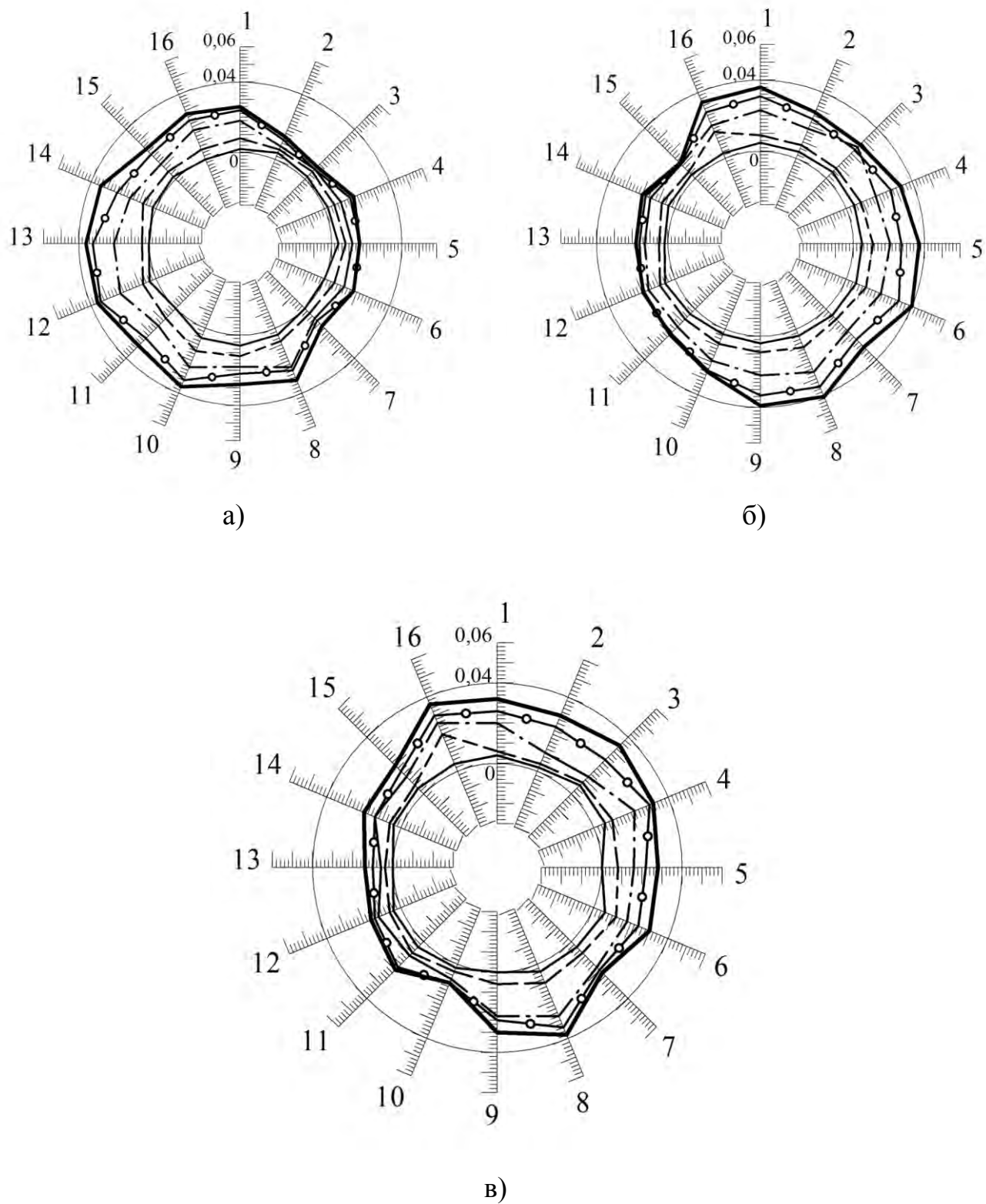


Рисунок Ж.2 – Диаграммы параллельности шлиц полученных с использованием покрытиями TiZrN: а) HB 156-172; б) HB 173-189; в) HB 190-207

Диаграммы толщины шлиц при накатывании шлицевого профиля на заготовках  
сталь 45 накатными роликами Р6М5 без покрытий и с однослойным  
многокомпонентным покрытием TiZrN

Поле допуска  $3,5 \begin{smallmatrix} -0,03 \\ -0,078 \end{smallmatrix}$  мм по ГОСТ 1139-80; — толщина шлиц на расстоянии  
10 мм от торца заготовки; ——— толщина шлиц на расстоянии 40 мм от торца  
заготовки; - - - толщина шлиц на расстоянии 70 мм от торца заготовки.

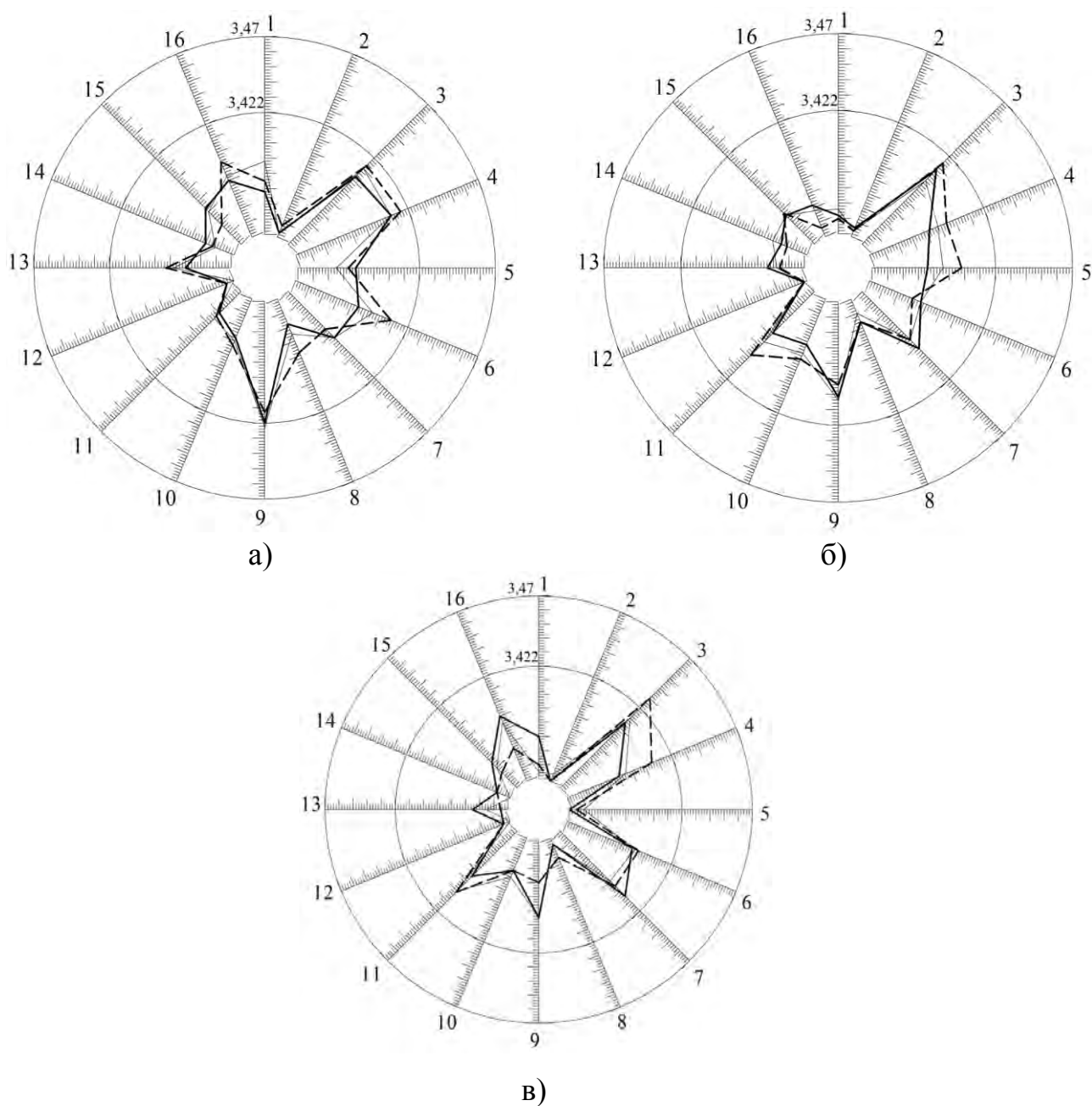


Рисунок Ж.3 – Диаграммы толщины шлиц полученных без использования  
покрытий: а) HB 156-172; б) HB 173-189; в) HB 190-207

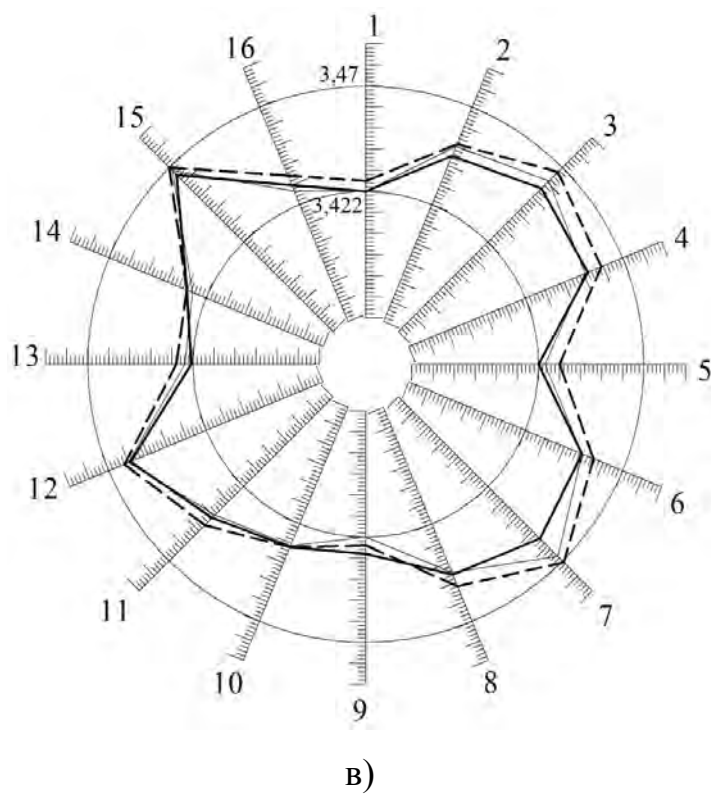
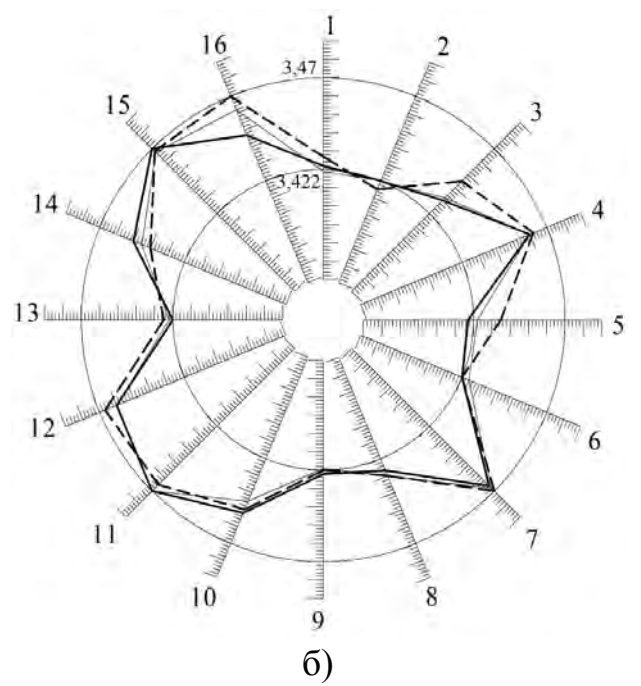
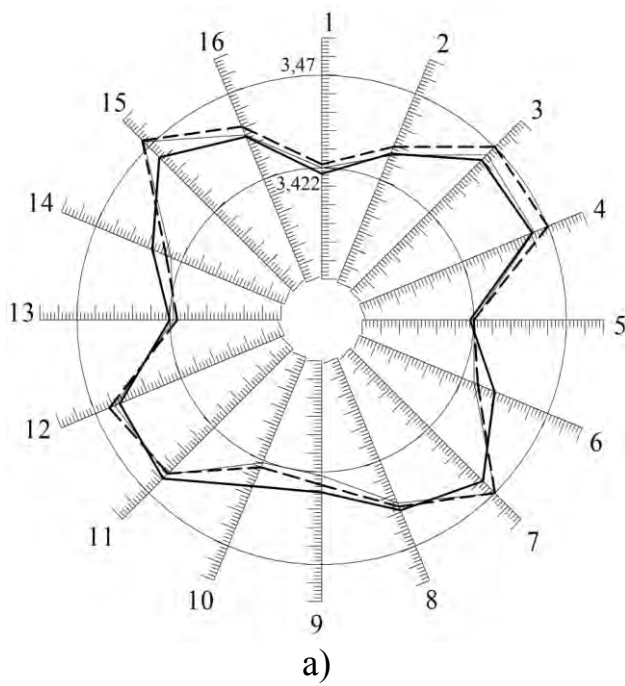


Рисунок Ж.4 – Диаграммы толщины шлиц полученных с использованием покрытий: а) НВ 156-172; б) НВ 173-189; в) НВ 190-207

Приложение И  
(справочное)

УТВЕРЖДАЮ

Технический директор

ОАО «Автодеталь-Сервис»

г. Ульяновск, ул. Пушкарёва, 25

В. А. Пономарёв

09

2009 г.



АКТ №1

производственных испытаний накатных роликов 1126.03.009 из Р6М5 с износостойким покрытием (Ti, Zr)N

Настоящим подтверждается, что в ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска в период с августа по ноябрь 2009 г. проведены производственные испытания накатных роликов 1126.03.009 из Р6М5 с износостойким покрытием (Ti, Zr)N при деформировании шлицевых профилей на валах в холодном состоянии из стали 45 ГОСТ 1050-88. Стан №4 мод. 1126СБ. СОТС И-20А ГОСТ 20799-88.

Таблица проведения испытаний

| № п/п | Материал инструмента | Покрытие     | Режимы деформирования   | Коэффициент повышения стойкости $K_T$ |
|-------|----------------------|--------------|---|---------------------------------------|
| 1     | Р6М5                 | Без покрытия | Шесть проходов, количество шлиц 16,<br>$V_{cp} = 0,0387$ м/с,<br>$P_{cp} = 1 \dots 10$ МПа,<br>$l_{def.} = 0,0655$ м,<br>$t_{def.} = 66$ с,<br>$D_{рол.} = 0,08$ м,<br>$D_{заг.} = 0,0381$ м. | 1                                     |
| 2     | Р6М5                 | (Ti, Zr)N    | То же   | 1,92                                  |

Примечание: обработка заготовок производилась в состоянии поставки.

Вывод: средний коэффициент повышения стойкости деформирующего инструмента с износостойким покрытием по отношению к деформирующему инструменту без покрытия равен  $K_T = 1,92$ , что, принимая во внимание тяжёлые условия деформирования ( $\sigma_{max} = 2389$  МПа,  $\tau_{max} = 456$  МПа), можно считать хорошим результатом.

Испытания проводили:

от УГСХА:

Г. Д. Федотов

В. А. Адакин

от ОАО «Автодеталь-Сервис»

Начальник ОИХ

Кошинский Д. П.