

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

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена:

в ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» на кафедре «МиТОМД», г. Санкт-Петербург и в ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина» на кафедре «Техническая механика», г. Ульяновск

Научный руководитель:

Федотов Геннадий Дмитриевич  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П. А. Столыпина»,  
доцент кафедры «Техническая механика», г. Ульяновск.

Официальные оппоненты:

Кокорин Валерий Николаевич,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Ульяновский государственный  
технический университет», заведующий кафедрой  
«Материаловедение и обработка металлов  
давлением», г. Ульяновск;

Ульянов Эдуард Иванович,  
кандидат технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Балтийский государственный технический  
университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова», доцент  
кафедры «Высокоэнергетические устройства  
автоматических систем», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация:

ОАО «Ульяновский научно-исследовательский  
институт авиационной технологии и организации  
производства», г. Ульяновск.

Защита состоится «17» марта 2015 г., в 16.00 часов, на заседании диссертационного совета Д 212.229.19 при ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, лабораторно-аудиторный корпус, аудитория кафедры М и ТОМД.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «СПбПУ» и на сайте [www.spbstu.ru](http://www.spbstu.ru).

Ваш отзыв на автореферат (2 экз.), заверенный гербовой печатью, просим высылать по указанному адресу учёному секретарю диссертационного совета Д 212.229.19:  
E-mail: [AWA-adakin@yandex.ru](mailto:AWA-adakin@yandex.ru)

Автореферат диссертации разослан «10» февраля 2015 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, к.т.н., доцент



Кункин Сергей Николаевич

## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В машиностроении широко применяются шлицевые валы в системах передач.

Шлицевые профили обычно получают резанием на шлицефрезерных или зубофрезерных станках червячной фрезой методом обкатки. Этот метод довольно трудоёмок, для повышения качества шлицевых соединений требуется дополнительная чистовая и термическая обработка. 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. Поверхности при этом имеют повышенную твёрдость (увеличение на 40%), низкую шероховатость ( $R_a$  до 0,08 мкм), сжимающие остаточные напряжения и т. д. Однако высокие контактные напряжения и возникновение боковых усилий при многопроходном накатывании снижают стойкость инструмента, а так же увеличивают погрешности взаимного положения заготовки и инструмента определяющие точность шлицевых профилей по толщине, параллельности и высоте. Эти недостатки в большинстве случаев сдерживают широкое внедрение в массовое производство этой технологии в качестве окончательной.

На основании изложенного, тема работы: «Инструмент для многопроходного холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах» является актуальной.

Диссертационная работа выполнена на кафедрах «Техническая механика» Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии им. П. А. Столыпина (УГСХА им. П. А. Столыпина), в соответствии с планами научно-технических государственных работ в период с 2005 по 2014 г, и «Машины и технология обработки металлов давлением» Санкт-Петербургского государственного политехнического университета (СПбПУ) с 2014 г.

**Цель работы:** Увеличение долговечности деформирующего инструмента с одновременным повышением точности прямоугольных шлицевых профилей на валах из среднеуглеродистых сталей при холодном многопроходном накатывании.

**Достижение поставленной цели обеспечивается решением 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 без покрытий и с 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.

**Научная новизна:** 1. Разработана математическая модель расчёта площади контакта «инструмент-деталь».

2. Разработана математическая модель расчёта нормальных и касательных напряжений на контактных поверхностях накатных роликов при холодном деформировании шлицевых профилей.

3. Разработана математическая модель расчёта изгибающих моментов от действующих сил, влияющих на долговечность накатного инструмента и точность шлицевых профилей (параллельность и толщину шлиц).

**Практическая значимость и реализация работы:** 1. Разработана конструкция подвижного сферического упора накатного стана 1126 ПС для снижения влияния погрешностей предварительной обработки заготовок на точность накатываемых профилей.

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

3. 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 схемы ковки накатных роликов. Применение износостойких покрытий и совершенствование схемы ковки накатных роликов обеспечило повышение их долговечности в 1,9 раза.

4. Разработана и внедрена в производство оснастка для нанесения износостойких покрытий полученных методом КИБ на профилирующие поверхности накатных роликов в условиях ОАО «Автодеталь-Сервис» (г. Ульяновск) при производстве карданных валов для автомобилей УАЗ.

Опытно-промышленные испытания, выполненные в производственных условиях ОАО «Автодеталь-Сервис», на операции накатывания шлицевых профилей на карданных валах 3741-2201020, подтвердили высокую работоспособность накатных роликов 1126.03.009 с многокомпонентным износостойким покрытием TiZrN.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования базируются на основных положениях механики сплошной среды, теории пластического деформирования металлов в холодном состоянии, теории холодной формообразующей прокатки с использованием математического моделирования, математических и графических редакторов. Лабораторные исследования выполнялись в условиях кафедры «Техническая механика» УГСХА им. П. А. Столыпина, экспериментальные исследования проводились в условиях ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска. Обработка экспериментальных данных осуществлялась с использованием методов математической статистики.

**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 шлиценакатных роликов при холодном пластическом деформировании профилей на валах.

4. Рекомендации повышения стойкости шлиценакатных роликов при холодном пластическом деформировании среднеуглеродистых сталей путём совершенствования схемы ковки 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.

**Степень достоверности результатов работы подтверждается:**

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

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

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

**Апробация результатов работы.** Основные результаты работы были доложены на научно-технических (НТК) УлГТУ в 2008, 2009 гг.; международных НТК «Актуальные вопросы аграрной науки и образования», г. Ульяновск, 2008, 2010, 2012 гг., «Молодёжь и наука XXI века», г. Ульяновск, 2010 г., всероссийских конференциях НТК «Развитие АПК», г. Ульяновск, 2006 г., на расширенном заседании кафедры «Техническая механика» Ульяновской ГСХА им. П. А. Столыпина в 2014 г, на заседании научно-технического семинара кафедры «Машины и технология обработки металлов давлением» СПбГТУ в 2013, 2014 г., на заседании научно-технического семинара кафедры «Материаловедение и обработка металлов давлением» машиностроительного факультета УлГТУ в 2013 г.

**Публикации.** 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.

**Структура и объём диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов, библиографического списка из 175 наименования и приложений на 32 страницах, включает 186 страниц машинописного текста, 92 рисунка и 9 таблиц.

## 2. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулирована практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен анализ состояния и область применения пластического деформирования прямоугольных шлицевых профилей на валах, недостатки холодного накатывания. Проведён анализ инструментальных материалов, применяемых при холодном накатывании, анализ механизма изнашивания деформируемого инструмента, а также методы повышения долговечности деформирующего инструмента и внешнее трение в пятне контакта «инструмент – заготовка».

Вопросу исследований инструмента при различных видах обработки давлением: ковке, штамповке, прокатке – посвящено немало работ. Что касается исследований инструмента при накатывании шлицев, то этот вопрос почти не освещен в литературе, – имеющиеся работы ограничиваются констатацией процессов разрушения (Проскураков Ю. Г., Козырев Ю. Г., Усиков И. К., Кобелькова С. Ф., Лындин В. А., Писаревский М. И., Востров В. Н., Федотов Г. Д., Андреев А. П., Мазуренко Ю. П.). В то же время, внедрение прогрессивного метода продольного накатывания шлицев многороликовой головкой в значительной степени определяется стойкостью накатного инструмента и точность получаемых шлицевых профилей.

На точность накатываемых шлицев оказывает существенное влияние способ накатывания, конструкция и точность исполнения элементов оборудования и инструмента, наладка операции накатывания; форма и точность заготовки и т. п. Оценка точности шлицев осуществляется анализом погрешностей: по ширине шлица ( $\Delta b_{ш}$ ), по направлению боковой стороны шлица ( $\Delta B_{ш}$ ), по шагу ( $\Delta t$ ) и по длине ( $\delta l$ ).

В заключении сформулированы цель и задачи работы, приведённые выше.

**Во второй главе** представлено напряженное состояние накатного ролика при формировании шлицевых профилей на валах холодным пластическим деформированием. Здесь представлены результаты теоретических исследований, расчёт усилий деформирования по полям линий скольжения ведущих к закручиванию шлицевых профилей, математическая модель расчёта контактных площадей «инструмент-заготовка» и контактных напряжений, классификация погрешностей при холодном пластическом деформировании, расчёт момента на накатных роликах, приводящего к закручиванию свободного конца шлицевого вала и отклонению от прямолинейности, представлен сравнительный расчёт окружных скоростей и скоростей перемещения металла, расчёт угла нейтрального сечения на ролике, влияние размеров накатного ролика и заготовки на долговечность инструмента.

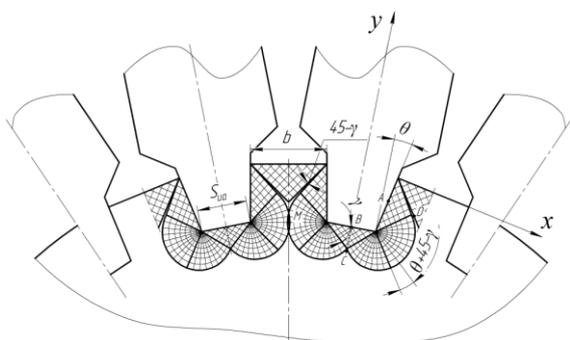


Рисунок 1 – Возможные поля линий скольжения с учётом сил трения

С целью определения осевого усилия на ролик  $T_{осев}^{рол}$  нами был использован метод линий скольжения (рисунок 1).

Анализ литературных источников выявил, что для расчёта усилий при пластическом деформировании авторы используют выражение:

$$P = K \cdot \sigma_S \cdot A, \quad (1)$$

где  $K$  – коэффициент зависящий от трения, геометрических параметров, линий скольжения деформируемого металла;

$\sigma_S$  – напряжение течения металла, МПа;  $A$  – площадь пятна контакта, м<sup>2</sup>.

Были определены выражения действующих усилий на каждый накатной ролик  $T_{осев}^{рол}$  при различных коэффициентах трения  $\mu = 0,05$ ,  $\mu = 0,12$ :

без учёта сил трения:

$$T_{осев}^{рол} = 3,76 \cdot \sigma_T \cdot A$$

при  $\mu = 0,05$ :

$$T_{осев}^{рол} = 3,85 \cdot \sigma_T \cdot A$$

при  $\mu = 0,12$ :

$$T_{осев}^{рол} = 3,81 \cdot \sigma_T \cdot A$$

Для практического расчёта реакции действующей в пятне контакта цилиндрической поверхности накатного ролика можно использовать выражение (рисунок 2):

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

где  $\sigma_T$  – напряжения течения металла, МПа;  $\lambda_i$  – угол длины дуги контакта, град;  $\psi$  – угол наклона клина, град

Для практического определения усилий действующих на пятне контакта конусных поверхностей инструмента получено выражение (рисунок 3):

$$\Phi_{oi} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi}{\sin\left(\frac{\lambda_i}{2}\right) \cdot \sin \theta}, \quad (3)$$

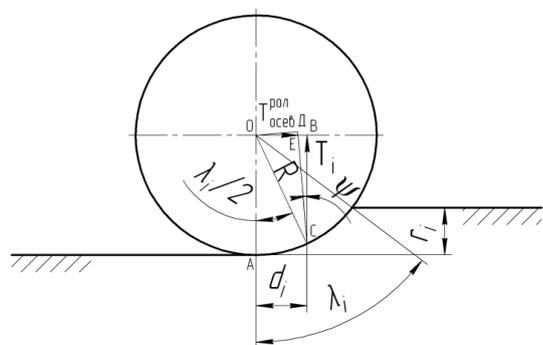


Рисунок 2 – Схема к расчёту усилий на контакте по цилиндрической части накатного ролика

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

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

С целью определения площади пятна контакта  $A_{ABE}$  на конической части ролика рассматривался геометрический профиль инструмента, откуда следует:

$$A_{ABE(1-3)} = \frac{R}{2 \cdot \cos \theta} \left[ 0,0174 \cdot R \cdot \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) - (R-r_i) \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) \right) \right], \quad (4)$$

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

Площадь пятна контакта  $A_{ABCD}$  цилиндрической поверхности накатного ролика при различной глубине внедрения определяли:

$$A_{ABCD} = \frac{\pi \cdot R \cdot a \cdot \arccos \left( \frac{R-r_i^{II}}{R} \right)}{180}, \quad (5)$$

где  $r_i^{II}$  – глубина внедрения накатного ролика при каждом отдельном проходе фильеры, м.

Напряжения, действующие на цилиндрическую поверхность накатного ролика и на весь ролик от действия равнодействующей силы  $T_i$ , оценивали по выражению:

$$\sigma_{u(1-3)}^I = \frac{180 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi}{\pi \cdot R \cdot \lambda_i \cdot \sin \left( \frac{\lambda_i}{2} \right) \cdot (2 \cdot r_i \cdot \operatorname{tg} \theta + a)}, \quad (6)$$

где  $a$  – ширина цилиндрической части ролика, м.

Далее рассчитывали напряжения, действующие на боковую поверхность накатного ролика и на весь ролик от действия равнодействующей силы  $T_i$ ,  $\Phi_i$  (рисунок 3):

$$\sigma_{(1-3)} = \frac{2 \cdot K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \operatorname{ctg} \theta}{R \cdot \sin \left( \frac{\lambda_i}{2} \right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) - (R-r_i) \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) \right) \right]}. \quad (7)$$

Касательные напряжения, действующие на боковую поверхность основного конуса накатного ролика (рисунок 4), для 1-3 проходов вычисляется по формуле:

$$\tau_{(1-3)} = \frac{K \cdot \sigma_T \cdot A \cdot \cos \psi \cdot \cos^2 \theta}{R \cdot \sin \left( \frac{\lambda_i}{2} \right) \cdot \left[ \frac{\pi}{180} \cdot R \cdot \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) - (R-r_i) \cdot \sin \left( \arccos \left( \frac{R-r_i}{R} \right) \right) \right]}. \quad (8)$$

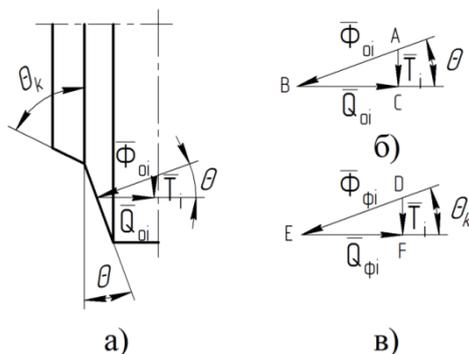


Рисунок 3 – Схема к расчёту усилий действующих на пятно контакта по конусной части накатного ролика:

а) схема расположения векторов сил на инструменте; б) силовой многоугольник для основного конуса; в) силовой многоугольник для вспомогательного конуса

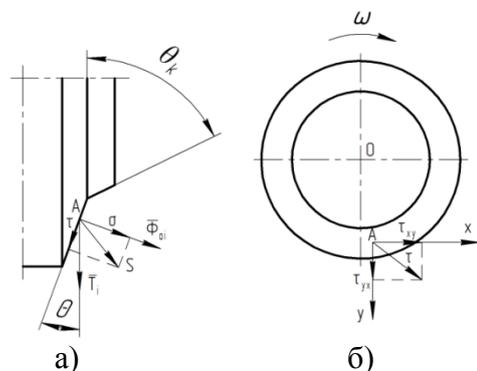
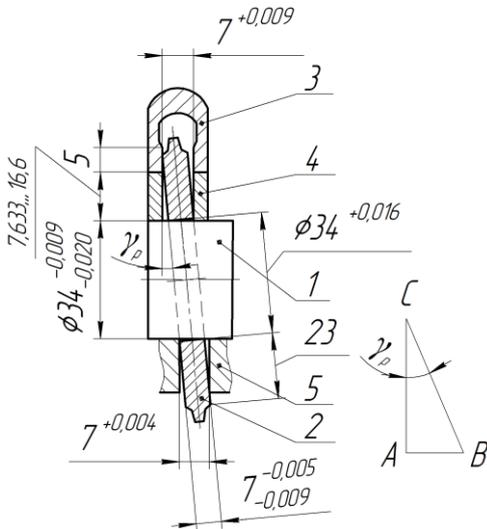


Рисунок 4 – Схема действия напряжений на боковой поверхности накатного ролика: а) схема расположения нормальных  $\sigma$  и касательных  $\tau$  напряжений; б) схема расположения касательных  $\tau$  напряжений

По проведённым расчётам величины бокового смещения накатного ролика (рисунок 5) выявлено, что в конструкции шлиценакатной головки уже заложены отклонения, которые равны предельно допустимым отклонениям от геометрических параметров накатываемых шлицевых профилей. Угол отклонения накатного ролика равен:

$$\gamma_p = 0,0478^\circ.$$



1 – ось; 2 – накатной ролик;  
3 – вставка; 4 – клин; 5 – втулка  
Рисунок 5 – Расчётная схема  
бокового смещения накатного  
ролика

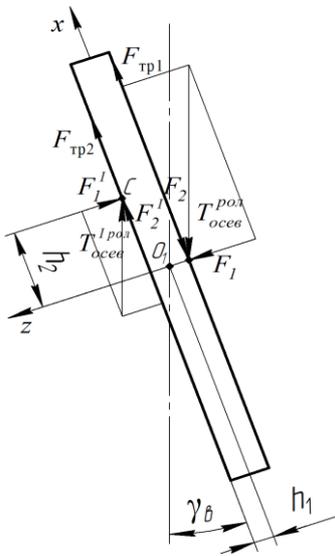


Рисунок 6 – Схема нагружения  
накатного ролика действующими  
силами

приложения действующих сил на один накатной ролик (рисунок 6).

При прямолинейном перемещении накатных роликов уравнение моментов относительно оси центров  $\sum M_{O1} = 0$ .

$$\sum M_{O1} = (F_2 - F_{тр1} + F_{тр2} + F_2^I) \cdot h_1 + F_1^I \cdot h_2, \quad (10)$$

где  $F_{тр1}, F_{тр2}$  – силы трения металла о поверхность ролика, Н;  $F_2 = T_{осев}^{пол} \cdot \cos \gamma_b$ ;  $F_1^I = T_{осев}^{пол} \cdot \sin \gamma_b$ ;  $F_2^I = T_{осев}^{пол} \cdot \cos \gamma_b$ ;  $T_{осев}^{пол}$  – осевая сила противодействия накатного ролика, Н;  $\gamma_b$  – угол закручивания вала, град.

Действующие при накатывании силы изменяют взаимное положение заготовки и инструмента. В момент встречи с заготовкой контактирует наружная поверхность ролика, формирующая впадину. Поскольку эта поверхность у различных роликов располагается на разном расстоянии от оси возникает сила, сдвигающая заходный конец заготовки. Величина такого перемещения определяется конкретной настройкой 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.

Отклонение от прямолинейности накатываемых профилей возникает из-за неточности установки накатных роликов и отсутствия жёсткого зажима заготовки в подвижном центре. Возможный угол поворота заготовки рассчитывается по формуле:

$$\xi = 2 \arcsin \frac{\delta_3}{2 \cdot L}, \quad (9)$$

где  $L$  – общая длина заготовки, м;  $\delta_3$  – биением заходного конца заготовки относительно линии центров, м.

При накатывании шлицевых профилей на валах необходимо, чтобы прямолинейность шлиц относительно оси вращения находилось в поле допуска. При этом момент закручивания шлицевой части вала в процессе накатывания должен не превышать значений, способствующих выходу прямолинейности шлиц из поля допуска по ГОСТ 1139-80. Для определения суммарного крутящего момента фильеры, необходимо рассмотреть схему

Крутящий момент всей накатной головки будет складываться от моментов всех отклоняющихся накатных роликов, а  $F_{mp} = \tau \cdot A_{ABE(1-3)}$ :

$$\sum M_{\phi} = n \left[ \left( \frac{(T_{осев}^{пол} \cdot \cos \gamma_B - \tau_{xy1} \cdot A_{ABE(1-3)}^I + \tau_{xy2} \cdot A_{ABE(1-3)} + T_{осев}^{пол} \cdot \cos \gamma_B) \cdot \left( \frac{a}{2} + \frac{2}{3} r_i \tan \theta \right)}{\sqrt{R^2 - (R - r_i)^2}} + \frac{1}{3} \cdot T_{осев}^{пол} \cdot \sin \gamma_B \right) \cdot r_a \cdot \cos \theta + T_{осев}^{пол} \cdot \cos \psi \cdot (r_a - r_i + R) \cdot \tan \gamma_p \right], \quad (11)$$

где  $n$  – количество роликов в накатной головке, шт.;  $A_{ABE(1-3)}$ ,  $A_{ABE(1-3)}^I$  – площадь пятна контакта, м<sup>2</sup>;  $\tau$  – касательные контактное напряжение, МПа;  $r_a$  – радиус вала по вершине зуба, м;  $\gamma_p$  – угол отклонения ролика от оси симметрии, град.

Таким образом, выражение (11) можно использовать для определения момента закручивания накатной головки, который должен быть меньше или равен допускаемому моменту на скручивание вала:  $M_{\phi} \leq [M_K]$ .

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.

Скорость течения верхних слоёв металла в заготовке (рисунок 7) при накатывании шлиц определяли по выражению:

$$V_{мет} = \frac{v_{cp} \left[ \Delta l - \left( k_i - \frac{2 \cdot r_i^{II} \cdot c_3}{D_2 - D_1} \right) \right]}{S - S_{x.x.}}, \quad (12)$$

где  $v_{cp}$  – средняя скорость движения фильеры, м/с;  $k_i$  – попоходное расстояние расположения волн деформаций на детали после накатки, м;  $r_i^{II}$  – глубина внедрения накатного ролика при каждом отдельном проходе фильеры, м;  $c_3$  – длина конической части заготовки, м;  $D_1$  – диаметр фаски, м;  $D_2$  – наибольший диаметр заготовки, м;  $S$  – полный путь движения фильеры, м;  $S_{x.x.}$  – холостого хода фильеры, м.

Окружную скорость накатного ролика (рисунок 7) для каждого прохода вычисляли по формуле:

$$V_i = v_{cp} \cdot \left( 1 - \frac{r_i}{R} \right). \quad (13)$$

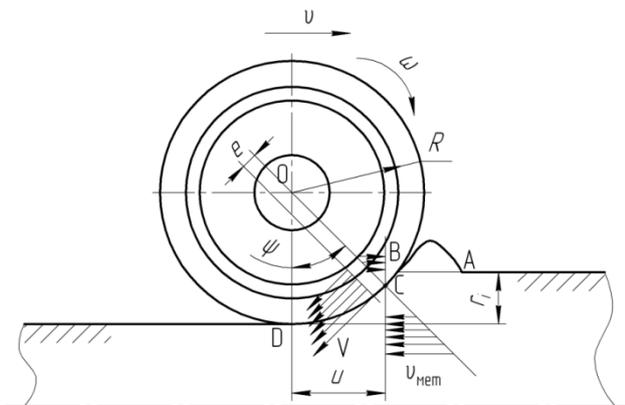


Рисунок 7 – Схема определения точки равенства скоростей

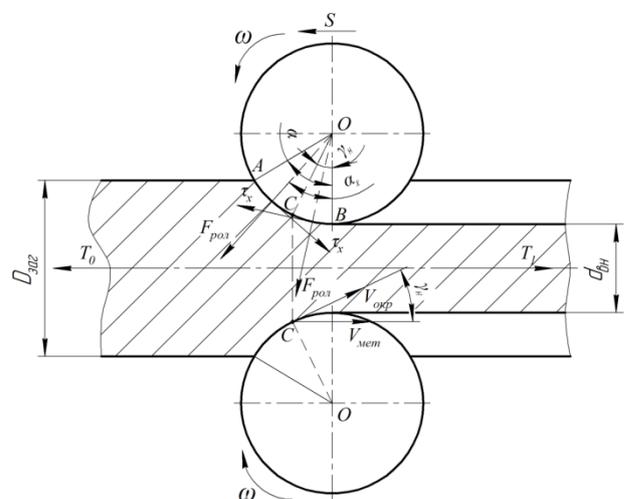


Рисунок 8 – Расчётная схема действующих сил при накатывании

Для определения угла  $\gamma_n$  нейтрального сечения (рисунок 8) и анализа условий движения металла составляли уравнение равновесия:

$$\sum x = -F_{пол} \cdot \sin \alpha_x \cdot Rd\alpha_x + \tau_x \cdot \cos \alpha_x \cdot Rd\alpha_x - \tau_x \cdot \cos \alpha_x \cdot Rd\alpha_x + \frac{(T_1 - T_0)}{2 \cdot d_{вн}} = 0. \quad (14)$$

Продифференцируем по углу захвата  $\alpha$  и приняв  $T_1 = T_0 = 0$  получим:

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

Продифференцировав уравнение и учитывая, что угол захвата  $\alpha \leq 13^\circ$ , а  $\cos \alpha$  этого угла практически равен единицы, то формула приобретает вид:

$$\sin \gamma_i = 0,5 \cdot \sin \alpha \Rightarrow \gamma_i = \frac{\alpha}{2}. \quad (15)$$

Для снижения сил трения и общей мощности на деформирование по результатам проведённых расчётов предлагается на деформирующий инструмент наносить покрытия, обладающие хорошей адгезией к подложке, низким коэффициентом трения и достаточной пластичностью.

**В третьей главе** представлены общая методика проведения экспериментальных исследований структурных параметров, механических свойств покрытий, статистическая обработка результатов экспериментальных исследований образцов накатных роликов с покрытиями на машине трения. В качестве инструментального материала использовали ролики 1126.03-009 из быстрорежущей стали Р6М5 (ГОСТ 19265 – 73), взятые из одной партии. В качестве обрабатываемого материала для стойкостных испытаний использовали заготовки 3171-2201020 из углеродистой конструкционной стали 45 (ГОСТ 1050 – 88).

Нанесение покрытий производили на серийной вакуумно-плазменной установке типа «Булат-6», оснащённой системой магнитной фокусировки плазменного потока. Ролики устанавливались в оправку из стали 20Х13, на конструкцию которой получен патент на полезную модель №109608. 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.

Структурные исследования образцов с покрытиями проводили методами рентгеновской дифрактометрии. Измерение параметров структуры проводили на дифрактометре «ДРОН-3М» с использованием фильтрованного  $\text{Cu}_{\text{K}\alpha}$ -излучения.

Для исследования образцов накатных роликов с покрытиями применялась машина трения 2070 СМТ-1, испытания по схеме «колодка-ролик». 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.

**В четвёртой главе** содержатся результаты исследований повышения долговечности инструмента при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах в холодном состоянии. Изучен и описан механизм изнашивания накатных роликов при холодном пластическом деформировании шлицевых профилей на валах, усовершенствована технологияковки шлиценакатных роликов, смоделировано напряженное состояние инструмента и заготовки при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах, описано повышение долговечности накатных роликов применением износостойких покрытий полученных методом КИБ, приведены результаты лабораторных исследований остаточных напряжений в накатных роликах и их анализ.

Основной причиной выхода роликов из строя является их поломка обусловленная как энергосиловой схемой процесса и напряженным состоянием ролика, так и качеством металла, из которого ролики изготовлены, его структурным состоянием и физико-механическими свойствами.

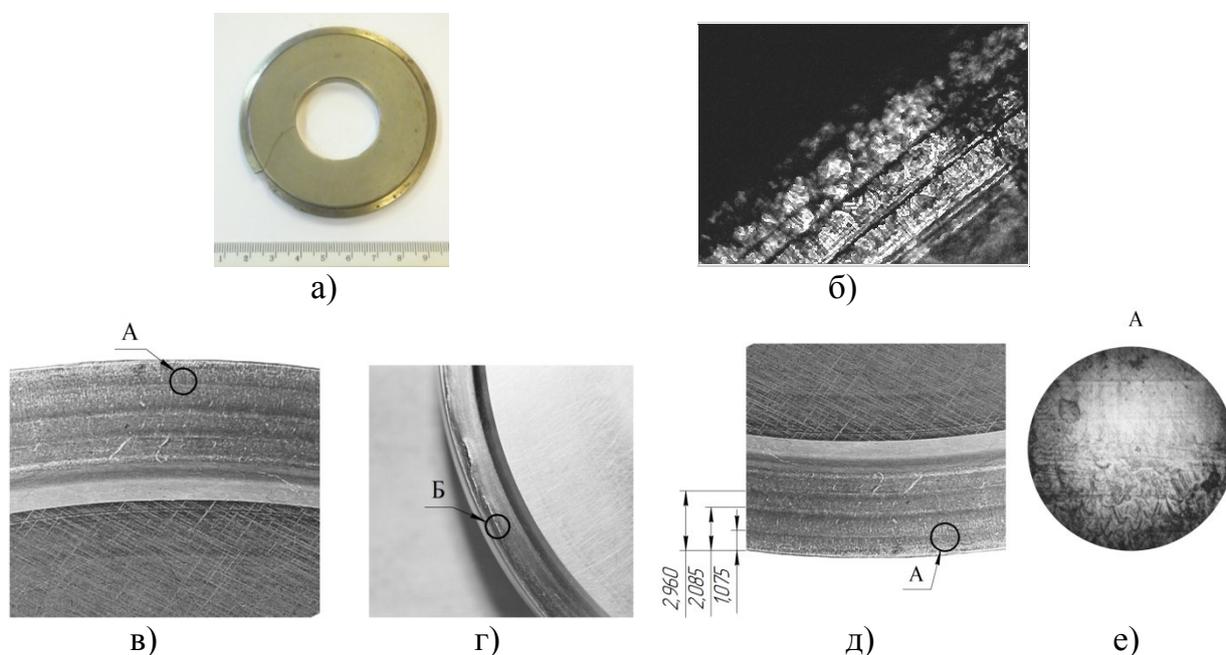
При анализе вышедших из строя роликов были установлены четыре основных вида разрушений: 1. Сквозные радиальные трещины; 2. Угловые поперечные трещины и выкрашивания по режущей кромке ролика; 3. Поперечные трещины на радиусном выходе; 4. Кольцевые отслоения по рабочему профилю ролика.

При эксплуатации роликов сквозные радиальные трещины (рисунок 9,а) появляются из-за возникновения в них рабочих напряжений, превышающих предел прочности металла, а также из-за неудовлетворительного структурного состояния металла.

Угловые, поперечные трещины (рисунок 9,б) и выкрашивания по режущей кромке ролика – часто встречающийся вид разрушения, связанный с конструкцией шлиценакатного ролика, и прежде всего с геометрией его рабочего профиля.

Поперечные трещины на радиусном выходе и кольцевые усталостные трещины возникают в связи с условиями эксплуатации шлиценакатных роликов в головке и обусловлены энергосиловой схемой процесса шлиценакатывания (рисунок 9,в, г). Доказано, что поверхностные слои металла, работающего в условиях усталости, примерно в 2 раза слабее слоев, лежащих под поверхностью. Они возникают симметрично на боковых поверхностях рабочего профиля на расстоянии, примерно равном глубине поперечного внедрения накатного ролика в заготовку (рисунок 9,д).

Установлено, что «чешуйки» это начало появления усталостных трещин. Процесс образования «чешуек» является важной стадией в развитии усталостного разрушения. Долговечность при усталости определяется в основном временем, в течение которого трещины увеличиваются до катастрофических размеров. По мере работы «чешуйки» накапливают напряжения и на их месте образуются субмикротрещины.



А – Концентрическая окружность сетки трещин; Б – Кольцевая усталостная трещина.

Рисунок 9 – Виды разрушений накатных роликов: а) сквозная радиальная трещина; б) износ режущей кромки накатного инструмента (x120); в), г) кольцевые усталостные трещины; д), е) расположение кольцевых трещин по глубине внедрения инструмента

Эти трещины развиваются по длине и ширине от циклических нагрузок соединяются в одну кольцевую трещину, концентричную 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.

Проведенное аналитическое исследование напряжений, возникающих в шлиценкатных роликах в процессе их эксплуатации, выявило, что при накатывании шлиц на поверхности роликов возникают напряжения сжатия значительной величины. Таким образом, при накатывании шлицев карданного вала автомобиля УАЗ на ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска на поверхности роликов возникают суммарные нормальные напряжения на цилиндрической поверхности от 285 до 537 МПа. Расчеты показывают, что возникающие в роликах напряжения превышают или находятся в ряде случаев на пределе соответствующие механические характеристики применяемых в настоящее время для шлиценкатного инструмента сталей ХВГ, Х12Ф1, Х6ВФ, Р18, Р6М5.

Для определения напряжений в инструменте и заготовке мы использовали программное обеспечение SolidWorks и DEFORM-3D. В данных программах был смоделирован процесс деформирования вала (Сталь 45) роликами (Р6М5) с получением на нём шлицевого профиля.

Условия деформирования были максимально приближены к реальным, протекающим при накатывании. Были заданы граничащие условия, материал, приложены рассчитанные ранее усилия деформирования при каждом проходе, наложены ограничения и коэффициент трения. В результате расчёта были получены напряжения при каждом из 5 проходов, как в заготовке, так и в инструменте (рисунок 10).

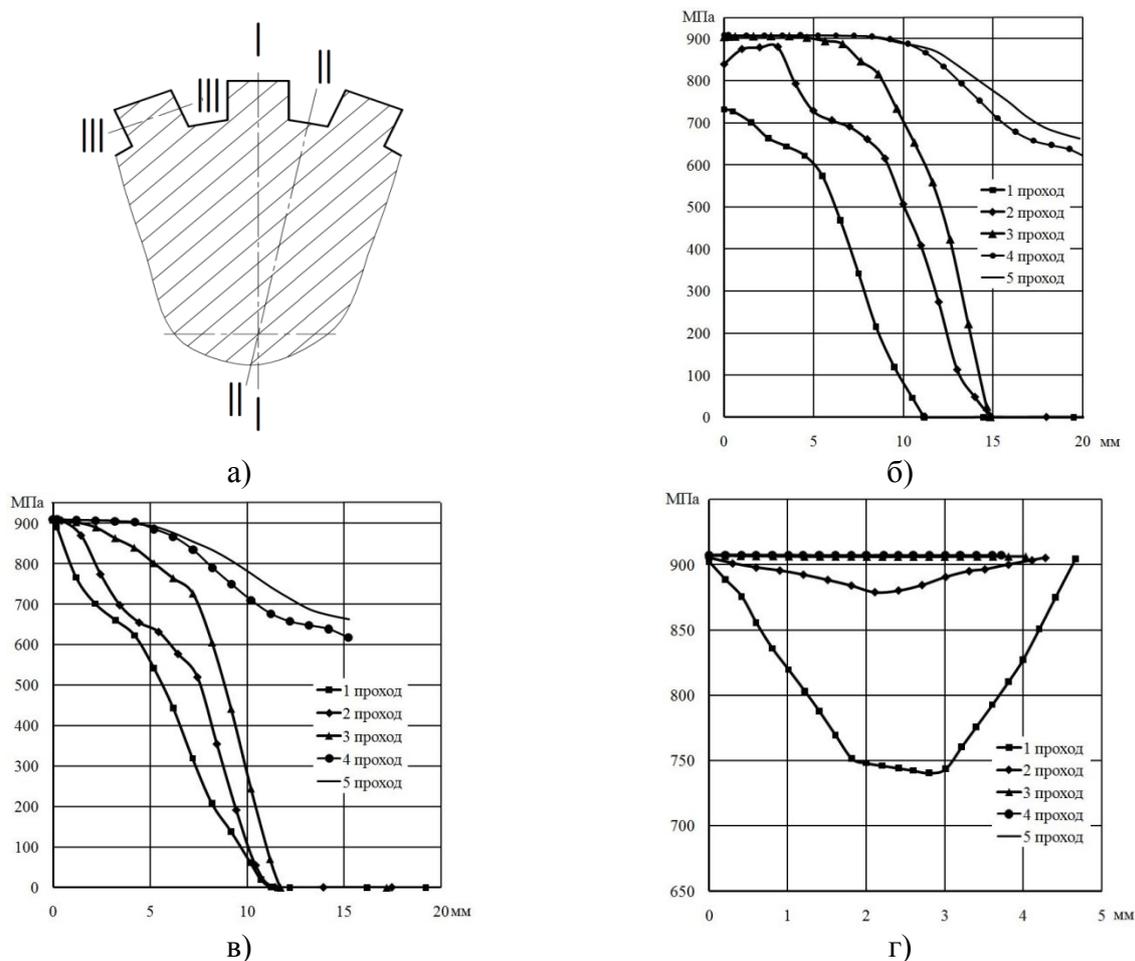


Рисунок 10 – Распределение напряжений в заготовке при  $f = 0,12$ :

- а) схема сечений для исследования напряжений на заготовке; б) сечение I-I; в) сечение II-II; г) сечение III-III

На рисунке 10 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. С повышением коэффициента контактного трения  $f$  с 0,12 до 0,7, напряжения в заготовке возрастают на 15...20 %. Распределение напряжений в накатном ролике при коэффициентах контактного трения  $f = 0,12$  и  $f = 0,7$  (от центра к его периферии (рисунок 11)) 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 начинают резко возрастать, в связи с приближением к зоне контакта инструмент-заготовка и геометрической форме поперечного сечения инструмента.

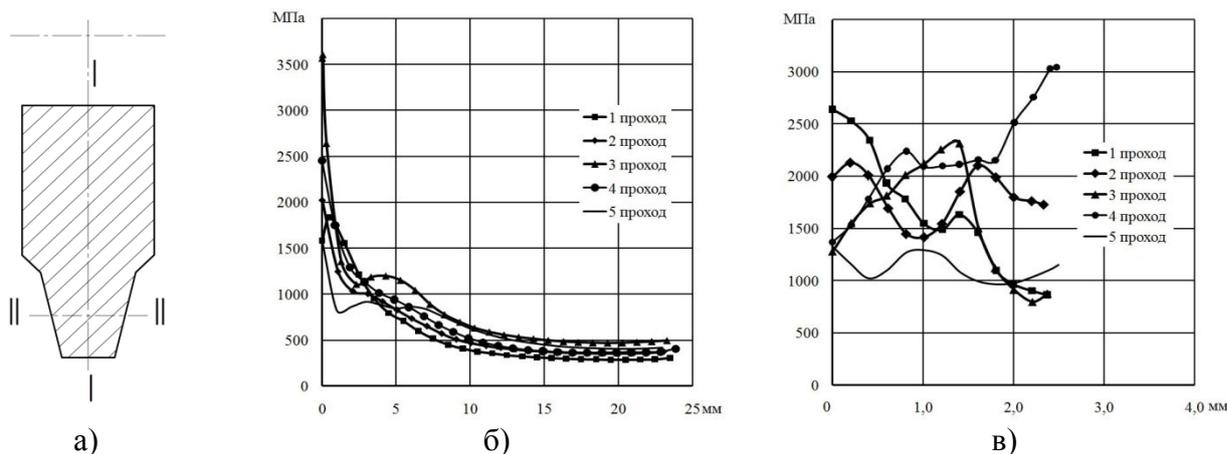


Рисунок 11 – Распределение напряжений в инструменте при  $f = 0,12$ :  
а) схема сечений для исследования напряжений; б) сечение I-I; в) сечение II-II

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.

Нами была разработана наилучшая 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  $2 h_{нок}$ , протяжка по диаметру до  $1/2 h_{исх}$ , осадка до  $h < h_{нок}$ , обкатка и осадка в размер поковки  $\varnothing 88 \times 11$ , где  $h_{исх}$  – высота исходной заготовки.

Данная схемаковки позволяет эффективно бороться с карбидной неоднородностью в инструментальном материале. С увеличением степени уковки тонкая карбидная сетка в поверхностных слоях исчезает, а в центральных слоях сохраняется сплошная или разорванная сетка карбидов.

Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований заключалась в определении необходимого числа опытов по доверительной вероятности, оценке точности измерений, существенности различия сравниваемых величин. Для получения эмпирических моделей момента трения использовали метод полного факторного эксперимента. Были получены уравнения регрессии и поверхности отклика момента трения (рисунок 12).

$$M_{тр} = 12,0053 - 0,1309 \cdot HB - 2,9080 \cdot 10^{-4} \cdot F - 0,4631 \cdot v + 9,5104 \cdot 10^{-7} \cdot HB \cdot F + 1,8953 \cdot 10^{-3} \cdot HB \cdot v + 6,7401 \cdot 10^{-4} \cdot F \cdot v - 3,8903 \cdot 10^{-6} \cdot HB \cdot F \cdot v + 3,6536 \cdot 10^{-4} \cdot HB^2 + 5,8129 \cdot 10^{-7} \cdot F^2 + 0,3939 \cdot v^2, \quad (16)$$

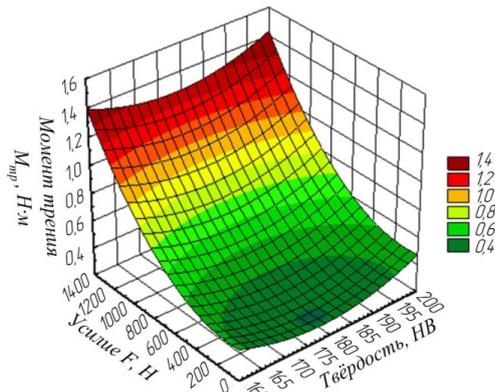


Рисунок 12 – Поверхность отклика взаимодействия усилия деформирования  $F$  и твёрдости заготовки  $HB$  на момент трения  $M_{тр}$

случаях находится на среднем уровне.

Анализируя образцы с покрытием по приросту площади пятна контакта (рисунок 13, в, г) можно сделать вывод, что образцы с покрытиями TiN и TiCN практически не отличаются при всех твёрдостях на всём протяжении изменения усилий. Образцы с покрытием TiZrN при твёрдости HB 156...172 имеют наименьшую площадь контакта с приростом усилия, что соответствует наилучшей их работе. Анализируя образцы по приросту площади пятна контакта (рисунок 13, д, е) можно сделать вывод, что с увеличением нагрузки прирост площади образцов в начальный момент уменьшается 200...400 Н, а при дальнейшем увеличении начинает расти. И оптимальной твёрдостью работы образцов является HB 181.

Лабораторные исследования влияния износостойких покрытий на работоспособность шлиценкатных роликов были направлены на определение момента трения  $M_{тр}$  и интенсивность изнашивания  $J$  покрытий на различных режимах обработки.

Из графиков (рисунок 13, а, б) 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. Покрытие TiZrN на низкой твёрдости показывает наименьший момент трения, в остальных

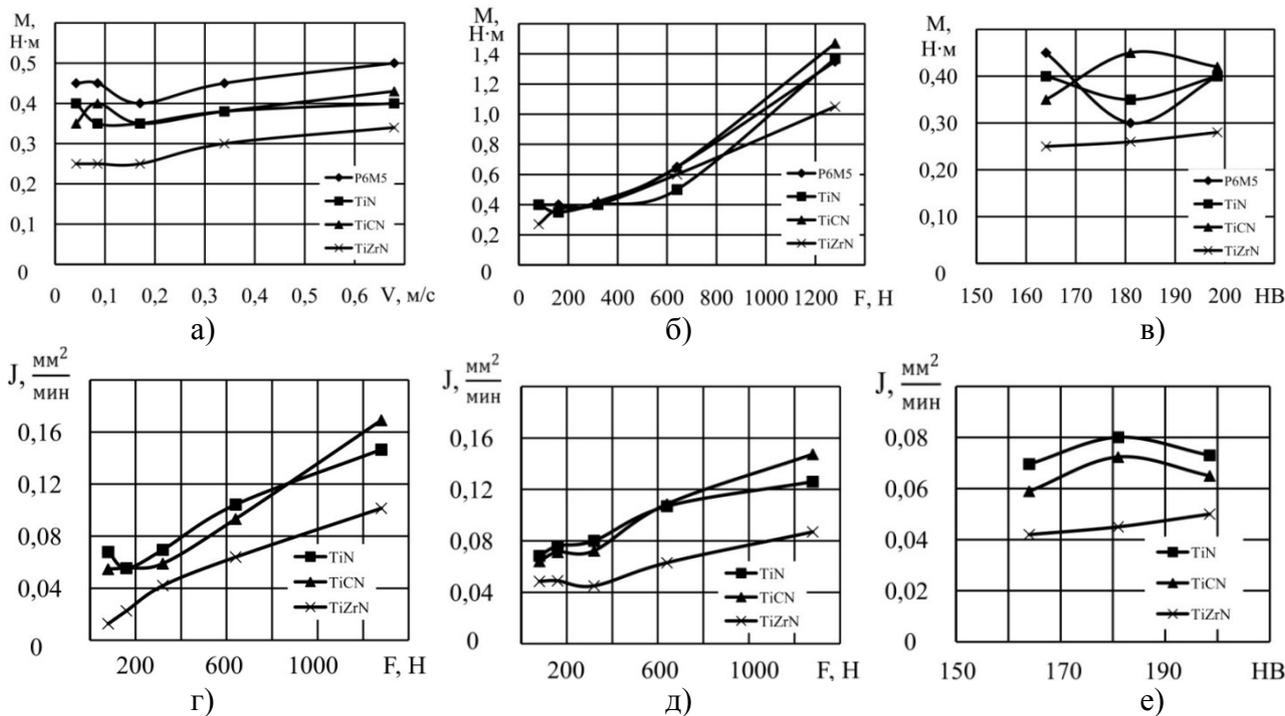


Рисунок 13 – Триботехнические характеристики:

- а) HB 156-172; б) HB 189-210; в)  $F = 320$  Н;  $V = 0,042$  м/с; г) HB 152-172;  $V = 0,042$  м/с;
- д) HB 173-189;  $V = 0,042$  м/с; е)  $F = 320$  Н;  $V = 0,042$  м/с

Остаточные напряжения оценивали по рабочим конусным поверхностям ролика. Присутствие остаточных напряжений сжатия в роликах, способствуют увеличению прочности роликов и их стойкости. Это подтверждается тем, что новый ролик

имеет остаточные напряжения от -940 до -960 МПа, а изношенный от -10 до -35 МПа (рисунок 14). При этом разрушенный накатной ролик 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.

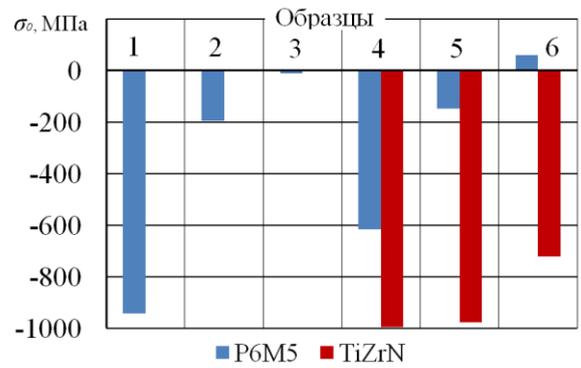
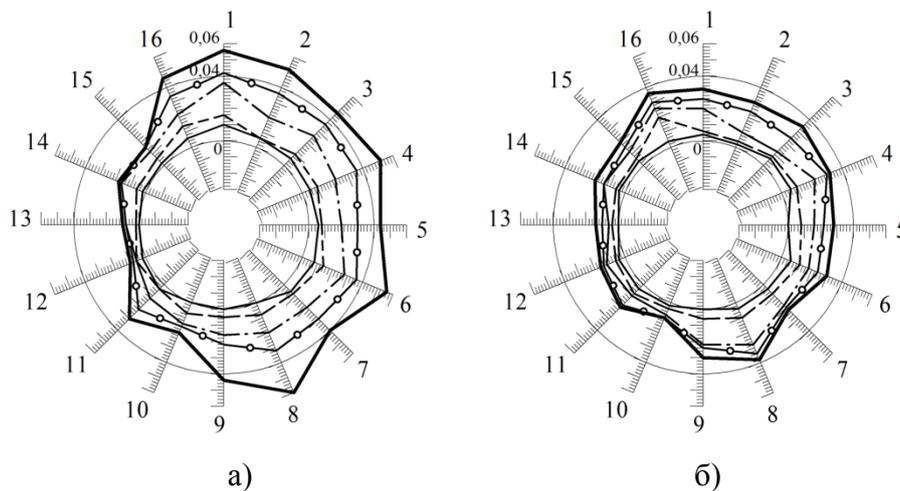


Рисунок 14 – Концентрация остаточных напряжений в инструменте и в покрытии

**В пятой главе** представлены результаты опытно-промышленной проверки стандартных и исследовательских шлиценакатных роликов в условиях массового производства на стабильность процесса шлиценакатывания и точность шлицев на валах. Исследован механизм изнашивания шлиценакатных роликов с покрытиями, полученными методом КИБ, проведены и описаны результаты по промышленной проверке влияния шлиценакатных роликов с износостойкими покрытиями на точность шлицев на валах, проведено технико-экономическое обоснование применения накатных роликов с износостойкими покрытиями.

Опытно-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 на заготовках из стали 45 с исходной твёрдостью HB 156-207.

Сравнивая полученные диаграммы шлицевого профиля полученного накатными роликами с покрытием и без покрытия (рисунок 15,а) можно сделать вывод, что

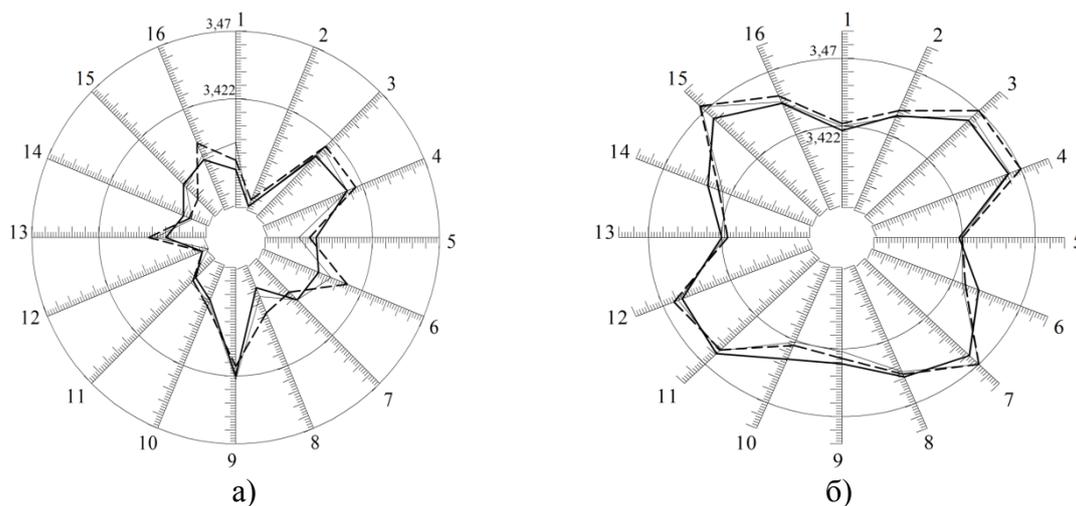


- 1-16 – порядковый номер шлица; поле допуска отклонений 0...0,04 мм по ГОСТ 1139-80;
- отклонение от параллельности на расстоянии 10 мм от торца заготовки;
  - - - отклонение от параллельности на расстоянии 15 мм от торца заготовки;
  - · — отклонение от параллельности на расстоянии 30 мм от торца заготовки;
  - отклонение от параллельности на расстоянии 50 мм от торца заготовки;
  - отклонение от параллельности на расстоянии 70 мм от торца заготовки.

Рисунок 15 – Диаграмма нелинейности шлиц при твёрдости заготовки HB 190-207:  
а) без покрытия; б) с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

выход показаний прямолинейности шлиц за пределы поля допуска у шлицевого профиля накатанного роликами без применения покрытий выше чем у накатных роликов с покрытиями (рисунок 15,б). Это связано со снижением трения в зоне контакта накатного ролика с материалом заготовки за счёт нанесения однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN.

Сравнивая диаграммы по толщине шлиц (рисунок 16,а, б) так же как и по прямолинейности, толщина шлиц накатанных роликов без покрытия ниже поля допуска на толщину. При накатывании шлицевого профиля роликами с покрытием TiZrN, толщина шлиц строго попадает в поле допуска (рисунок 16,б).



поле допуска отклонений  $3,5_{-0,078}^{-0,03}$  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 16 – Диаграмма толщины шлиц при твёрдости заготовки НВ 156-172:  
а) без покрытия; б) с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN

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 (рисунок 17) возникают симметрично на боковых поверхностях рабочего профиля на расстоянии, примерно равном глубине поперечного внедрения накатного ролика в заготовку.

По мере нарастания радиальных трещин расположенные по кольцу, возникает сетка трещин. Это приводит к образованию отдельных фрагментов в покрытии, которые работают по отдельности и не выдерживают возникающих напряжений со стороны обрабатываемого материала. Это приводит к сходу покрытия и обнажению инструментальной основы (рисунок 17).

Анализ исследований разрушения накатных роликов с покрытием при накатывании шлицевых профилей, позволил сделать вывод, что наибольшей эффективностью в данных условиях работы инструмента обладают многокомпонентные однослойные покрытия, имеющие высокую трещиностойкость и низкий коэффициент отслоения.



Рисунок 17 – Отслоение покрытий на конической части накатного ролика

Опытно-промышленными испытаниями установлено, что средняя стойкость накатных роликов без покрытия составляет 5804 накатанных деталей. С применением однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN стойкость

составила 11120 деталей, при этом коэффициент повышения стойкости накатных роликов  $K_T = 1,92$ . Годовой экономический эффект от применения износостойких покрытий составил 1647105,6 руб. Разработанные накатные ролики с покрытиями TiZrN были рекомендованы к внедрению на ОАО «Автодеталь-Сервис» г. Ульяновска.

### 3. 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 попроходного 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. Опытно-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.

#### **Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:**

– в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Федотов, Г. Д. Геометрическая точность прямобоковых 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.

2. 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.

3. 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.

– патенты:

4. 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.

5. Пат. № 2468879 Российская Федерация, МПК B21H 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.

– в остальных изданиях:

6. 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.

7. 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.

8. 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.

9. 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.

10. 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.

11. Адакин, В. А. Повышение долговечности деформирующего инструмента применением износостойких покрытий / В. А. Адакин // Вестник УлГТУ. – Ульяновск: ГТУ, 2012. – №4. – С. 32-36.