

---

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

---

УДК 621.992.7  
ГРНТИ 55.16.18  
Инв. №

<b>УТВЕРЖДЕНО:</b>
Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный техниче- ский университет им. Г.И. Носова»
От имени Руководителя организации Ректор _____/Колокольцев В.М./ М.П.

# **НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ**

о выполнении 1 этапа Государственного контракта  
№ 14.740.11.0684 от 12 октября 2010 г.

---

**Исполнитель:** Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

---

**Программа (мероприятие):** Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.2 Проведение научных исследований целевыми аспирантами.

---

**Проект:** Теоретические и экспериментальные исследования механики процесса накатки крупной резьбы

---

**Руководитель проекта:**  
\_\_\_\_\_/Железков Сергей Олегович  
(подпись)

---

**Магнитогорск  
2010 г.**

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

по Государственному контракту № 14.740.11.0684 от 12 октября 2010 г.  
на выполнение поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд

Организация-Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова"

Руководитель темы:

без ученой степени,  
без ученого звания \_\_\_\_\_ Железков С. О.  
подпись, дата

Исполнители темы:

без ученой степени,  
без ученого звания \_\_\_\_\_ Малаканов С. А.  
подпись, дата

без ученой степени,  
без ученого звания \_\_\_\_\_ Семашко В. В.  
подпись, дата

без ученой степени,  
без ученого звания \_\_\_\_\_ Тонеев П. К.  
подпись, дата

без ученой степени,  
без ученого звания \_\_\_\_\_ Морозов К. Ю.  
подпись, дата

без ученой степени,  
без ученого звания \_\_\_\_\_ Ханафина В. А.  
подпись, дата

## Реферат

Отчет 70 с., 4 ч., 26 рис., 8 табл., 44 источн., 0 прил.

«Резьба, накатка резьбы , стержневые изделия с резьбой , путевые шурупы , точность резьбы , резьбонакатной инструмент , износостойкость инструмент»

В отчете представлены результаты исследований, выполненных по 1 этапу Государственного контракта № 14.740.11.0684 "Теоретические и экспериментальные исследования механики процесса накатки крупной резьбы" (шифр "2010-1.3.2-111-017") от 12 октября 2010 по направлению "Проведение научных исследований целевыми аспирантами по следующим областям: - математика; - механика; - информатика" в рамках мероприятия 1.3.2 "Проведение научных исследований целевыми аспирантами.", мероприятия 1.3 "Проведение научных исследований молодыми учеными - кандидатами наук и целевыми аспирантами в научно-образовательных центрах" , направления 1 "Стимулирование закрепления молодежи в сфере науки, образования и высоких технологий." федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009-2013 годы.

Цель работы - Изучение физико-механических явлений в процессах формирования резьбы пластическим деформированием и получение новых научных знаний о закономерностях механики процессов накатки наружной резьбы в зависимости от особенностей применяемых технологий и конструктивного исполнения резьбоформирующего инструмента, разработка методик поиска эффективных режимов деформирования, обеспечивающих получение качественной резьбы и повышение износостойкости инструмента. Компьютерное и физическое моделирование: метод конечных элементов. ГОСТ Р 15.011-96 Тексты патентов, Интернет ресурсы российской и международной патентных организаций, Персональный компьютер, Сеть Интернет, Специализированные периодические издания,

Цифровой измеритель шероховатости поверхности TR-200, сканирующий электронный микроскоп «JEON 6490LV», аналоговый микротвердомер MicroMet 5103, испытательные разрывные машины.

## Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	5
Основная часть.....	6
1. Патентно-информационный поиск по теме исследования. Математическое моделирование процесса формирования резьбы накаткой.....	6
1.1 Результаты патентно-информационного поиска. Способы формирования резьбы накаткой. Анализ причин образования брака и дефектов при накатке крупной резьбы. Задачи исследования.....	7
1.2. Исследование кинематики процесса формирования крупной резьбы при использовании различных способов накатывания .....	23
1.3. Математическое моделирование процесса формирования резьбы накаткой с использованием метода конечных элементов (МКЭ).....	32
1.3.1 Основные положения метода конечных элементов, используемые в программном комплексе «DEFORM-3D».....	32
1.3.2. Результаты компьютерного моделирования процесса накатки резьбы на путевых шурупах с использованием программного комплекса «DEFORM-3D».....	39
1.4. Экспериментальные исследования процессов накатки резьбы.....	54
1.4.1. Исследование влияния диаметра под накатку и температуры нагрева на качество рез.....	54
1.4.2. Исследование причин образования брака по внутренним дефектам.....	58
1.4.3. Исследование влияния поверхностных дефектов на качество резьбы.....	61
Заключение.....	65
Список использованных источников .....	67

## **ВВЕДЕНИЕ**

Стержневые крепежные изделия с резьбой (болты, винты, шурупы, шпильки и т.п.) находят широкое применение в различных отраслях промышленности. В настоящее время при массовом производстве таких изделий формирование резьбы осуществляют, как правило, пластическим деформированием (накатыванием). Применение процессов накатывания наружных резьб по сравнению с процессами нарезания обеспечивает повышение производительности труда примерно в 3-5 раз, экономию металла, снижение шероховатости поверхности резьбы, а также повышение надежности и долговечности деталей в несколько раз [1,2].

В современном машиностроении и метизном производстве существует два основных способа получения наружных резьбовых профилей: нарезание и накатывание. При изготовлении резьбы нарезанием необходимый профиль образуется путем снятия стружки с помощью режущего инструментов, а при накатывании – путем пластического деформирования. Как отмечают многие исследователи, основными преимуществами накатывания по сравнению с обработкой резанием являются высокая производительность, возможность стабильного получения более точных размеров резьбы, повышенная усталостная прочность получаемых деталей [1,2,18].

В настоящее время накатывание резьб и профилей нашло широкое применение при изготовлении деталей из самых разнообразных металлов и сплавов: углеродистых и легированных сталей, включая нержавеющие и инструментальные, бронзы, латуни, алюминия, меди, бериллия, титана, никеля, порошковых материалов и пластмасс.

## **1. Патентно-информационный поиск по теме исследования.**

### **Математическое моделирование процесса формирования резьбы накаткой.**

#### **1.1. Результаты патентно-информационного поиска. Способы формирования резьбы накаткой. Анализ причин образования брака и дефектов при накатке крупной резьбы. Задачи исследования.**

При изготовлении стержневых изделий с резьбой в основном используются три способа накатывания наружных резьб: плоским инструментом (плашками), приводным цилиндрическим инструментом и неприводным цилиндрическим инструментом (вращающимися резьбонакатными головками).

Накатывание плоскими плашками осуществляется с тангенциальной подачей инструмента на обрабатываемую заготовку. Накатывание приводным цилиндрическим инструментом производится с радиальной, тангенциальной, продольной (осевой) или комбинированной (радиально-осевой) подачей инструмента [1,2].

Накатывание плоскими плашками с тангенциальной подачей инструмента имеет следующие разновидности:

- двумя плашками (подвижной и неподвижной);
- тремя плашками (двумя неподвижными и одной подвижной);
- специальными плашками (одной обычной неподвижной и одной подвижной с несколькими заборными частями);
- плашкой со специальными вставками.

Схемы различных разновидностей способа приведены в табл. 1. Наиболее широкое применение получило накатывание двумя плашками: заготовку помещают между подвижной и неподвижной плашками, на боковых сторонах которых выполнены под углом подъема резьбы прямолинейные поверхности, соответствующие в поперечном сечении профилю резьбы. Подвижная

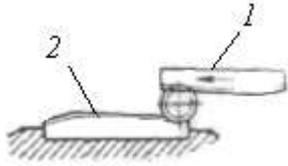
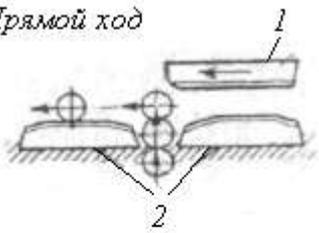
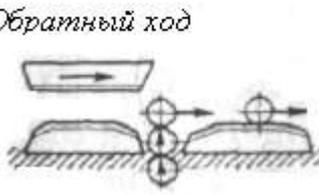
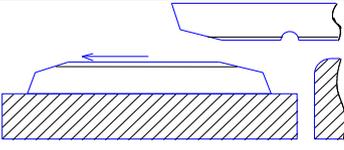
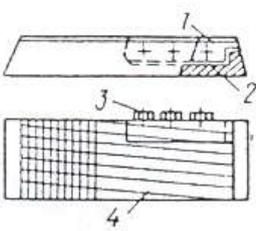
плашка совершает прямолинейное возвратно-поступательное движение. При этом за счет тангенциального усилия создается момент, благодаря которому происходит вращение заготовки вокруг соевой оси.

За счет действия радиального усилия, т.е. усилия, направленного перпендикулярно оси заготовки, негативный профиль резьбы, нанесенный на плашки, передается на обрабатываемую заготовку. При достаточной длине калибрующих частей плашек и применении ползуна и направляющих, выполненных с максимальной точностью, можно получать резьбы 1-го класса точности. Этот факт является одним из преимуществ данного способа формирования резьб по сравнению с другими. При накатывании резьбы тремя плашками производительность увеличивается в 2 раза. Заготовка подается к двум неподвижным плашкам. При прямом ходе подвижной плашки осуществляется накатывание резьбы на одной заготовке, а при обратном – на другой. Конструкция специальной подвижной плашки (она имеет две профилированные заборные части) обеспечивает накатывание резьбы на двух заготовках за один рабочий ход.

Процесс накатывания резьбонакатными головками (неприводным цилиндрическим инструментом) осуществляется, аналогично накатыванию плоскими плашками, тангенциальной подачей инструмента.

Накатывание приводным цилиндрическим инструментом может осуществляться за счет радиальной, тангенциальной, продольной или комбинированной подачи инструмента на обрабатываемую заготовку (или заготовки на инструмент). В табл. 2 приведены схемы различных разновидностей способов накатывания приводным и неприводным цилиндрическими инструментами. Тангенциальная подача заготовок осуществляется различным инструментом: затылованными роликами; роликами, которым сообщаются разные окружные скорости вращения; вращающимся резьбовым роликом и расположенными соосно с ним резьбовыми сегментами.

Способы накатывания наружных резьб плоскими плашками  
с тангенциальной подачей

<i>Способ накатывания</i>	<i>Схема накатывания</i>	<i>Рекомендуемая область применения</i>
Двумя плашками: подвижной 1 и неподвижной 2		Для изготовления деталей типа болтов, винтов, шпилек, шурупов и других цилиндрических изделий с резьбой или рифлениями треугольного или трапецеидального профилей.
Тремя плашками: двумя неподвижными 2 и одной подвижной 1	<p>Прямой ход</p>  <p>Обратный ход</p> 	Для изготовления деталей типа болтов, винтов, шпилек, шурупов и других цилиндрических изделий.
Специальными плашками: одной обычной неподвижной и одной подвижной с несколькими заборными частями		Для изготовления деталей типа болтов, винтов, шпилек, шурупов и других цилиндрических изделий.
Плашками со специальными вставками 1, длина которых соответствует длине накатываемой резьбы большего диаметра; 2 – паз; 3 – болты; 4 – плашки		Одновременное накатывание нескольких резьб на цилиндрических заготовках типа болтов, отличающихся между собой диаметрами на 0,25 – 0,6 мм.

Одним из самым распространенных способов получения резьб накатыванием, наряду со способом накатывания плоскими плашками, является про-

цесс накатывания двумя роликами. При накатывании резьбы затылованными роликами рабочая поверхность одного или обоих роликов состоит из выемки, заборной, калибрующей и сбрасывающей частей. Выемка не имеет профилирующей поверхности и служит для ввода заготовки в зону накатывания и вывода заготовки после завершения накатывания резьбы. Профиль резьбы калибрующей и сбрасывающей частей полный, а профиль заборной, вследствие затыловки по высоте, неполный. Отсутствие необходимости сближения роликов при накатывании резьбы позволяет значительно упростить кинематическую схему резьбонакатных станков [1].

Процесс накатывания вращающимся резьбовым роликом и резьбовыми сегментами называется планетарным, а станки для такого процесса – планетарными. Наружная поверхность накатного ролика и внутренняя поверхность сегмента имеют резьбу с профилем, соответствующим профилю накатываемой резьбы. Заготовка помещается между рабочими поверхностями ролика и сегмента. Чем больше сегментов, тем меньше путь накатывания и тем выше производительность. Производительность, кроме этого, зависит также от диаметра накатываемой резьбы и от пластичности обрабатываемого материала. Высокая стоимость оборудования и инструмента для планетарного накатывания порой делает его экономически нецелесообразным для широкого применения на производстве.

При работе по способу продольной (осевой) подачи инструмента (или заготовки) перемещение происходит в результате ввинчивания (вывинчивания) заготовки в результате вращения роликов. Накатывание осуществляется двумя или тремя роликами с кольцевой нарезкой. В процессе накатывания заготовка перемещается вдоль своей оси, а расстояние между осями роликов сохраняется постоянным. Основным достоинством этого способа накатывания является то, что независимо от ширины роликов резьбу на заготовках можно накатывать практически любой длины.

Из рассмотренных выше способов наиболее широкое применение в отечест-

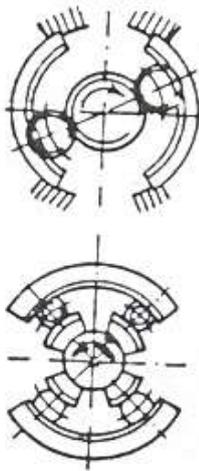
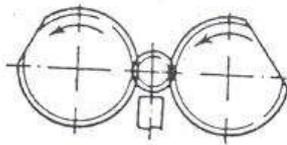
венной и зарубежной промышленности получило накатывание плоскими плашками, планетарная накатка инструментом «ролик-сегмент» и цилиндрическими роликами с винтовой нарезкой.

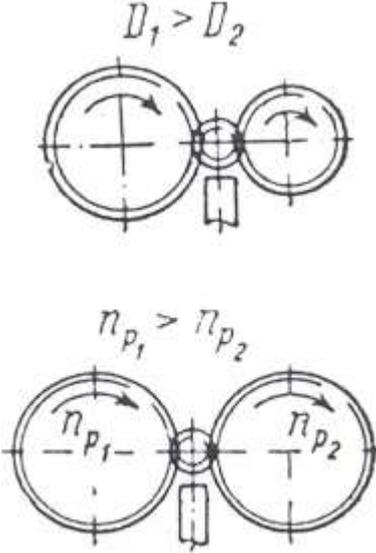
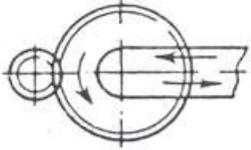
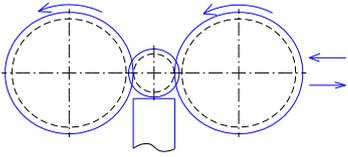
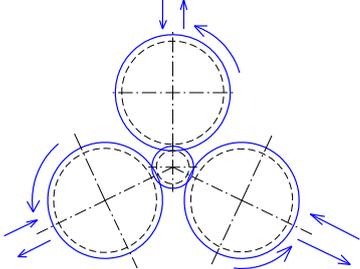
На основании анализа патентно-информационных материалов выявлено следующее. Начало интенсивного развития теории накатывания резьб приходится примерно на конец 40-х – начало 50-х гг. XX века. Из трудов зарубежных исследователей следует отметить работы немецких ученых Х. Апеля [4], В. Нясера [5], Г. Монтага и Д. Кенига [6], австралийского исследователя Т. Форреса [7], японских ученых А. Ямамото, И. Есимото [8-10], а также американского ученого Д. Далласа [11]. Изучением вопросов формирования наружных резьб в 40-е – 70-е гг. занимались российские ученые Ю.Л. Фрумин [3], А.П. Губин [12], В.И. Загурский [13-15], В.Г. Дейнеко [16]. За последние же десятилетия значительный вклад в теорию и практику резьбонакатного производства внесли такие исследователи как В.Г. Якухин [24-25] А.З. Журавлев [28] и др. [32-48].

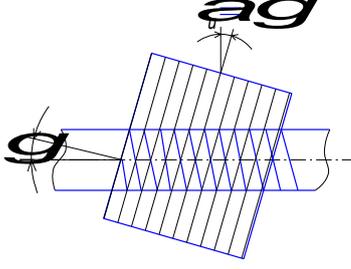
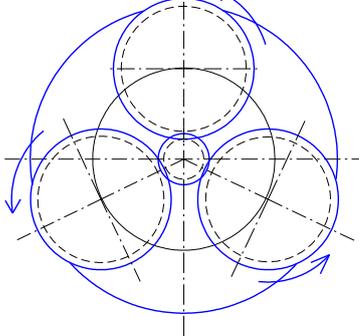
Особое место в теории накатывания наружных резьб занимают работы М.И. Писаревского, Ю.А. Миропольского и Э.П. Лугового [1,2, 17-23]. В трудах этих ученых дан анализ известных способов формирования как наружных, так и внутренних резьб, описаны конструктивные особенности накатного оборудования, методы расчета процессов накатывания, требования к инструменту. Ю.А. Миропольским и Э.П. Луговым проведен анализ факторов, влияющих на точность накатанных резьб, а также анализ показателей качества и технического уровня накатного оборудования [2]. Однако многие проблемы, связанные с получением изделий с накатанной резьбой высокого качества, исследованы недостаточно полно.

Таблица 2

Способы накатывания резьб цилиндрическим инструментом

<i>Способ накатывания</i>	<i>Схема накатывания</i>	<i>Рекомендуемая область применения</i>
<b>Приводным цилиндрическим инструментом</b>		
<p>С тангенциальной подачей:</p> <p>а) вращающимся резьбовым роликом и резьбовыми сегментами (подвижными или неподвижными)</p>		<p>В массовом и крупносерийном производстве для изготовления винтов, болтов, шпилек, рифлений и т.п. с резьбой 2 и 3-го классов точности.</p>
<p>б) специальными (затылованными) роликами</p>		<p>Для изготовления винтов, пустотелых резьбовых деталей, болтов, метчиков, резьбовых калибров и других изделий с цилиндрической и конической резьбой треугольного, круглого и трапецидального профилей.</p>

Способ накатывания	Схема накатывания	Рекомендуемая область применения
<p>в) роликами с разными окружными скоростями:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Роликами разных диаметров, но с равным числом оборотов;</li> <li>- Роликами равных диаметров, но с разным числом оборотов</li> </ul>		<p>Для изготовления мелких шлицев, зубьев, рифлений, режущего инструмента (разверток, концевых фрез и т.д.), калибровки тел вращения, полирования, правки валков и подобных им деталей, а также для образования кольцевых выступов и канавок. Для накатывания профилей прямой, угловой и ромбической формы.</p>
<p>С радиальной подачи:</p> <p>а) одним роликом с винтовой нарезкой</p>		<p>Для накатывания резьбы позади буртика или головки болта и подобных деталей с коротким стержнем (преимущественно из цветных металлов).</p>
<p>б) двумя многозаходными роликами с винтовой нарезкой</p>		<p>Для накатывания резьб на винтах, болтах, шпильках и других деталях, а также для изготовления метчиков, микрометрических и ходовых винтов и резьбовых калибров.</p>
<p>в) тремя роликами с винтовой нарезкой</p>		<p>Для накатывания резьб не только на специальных резьбонакатных станках.</p>

Способ накатывания	Схема накатывания	Рекомендуемая область применения
3. С продольной (осевой) подачей роликами (одним, двумя или тремя) с кольцевой нарезкой	Схема такая же, как и при работе с радиальной подачей	Для изготовления длинных метрических трапецеидальных резьб на специальных и универсальных (с применением резбонакатных головок) металлорежущих станках в крупносерийном и массовом производстве
Радиально-осевой способ Когда угол подъема резьбы ролика равен нулю, имеет место конструкция роликов с кольцевой нарезкой, т.е. оси роликов наклонены к оси накатываемой детали под углом подъема резьбы: $\alpha_u = \gamma$		Для изготовления длинных резьб.
<b>Неприводным цилиндрическим инструментом с тангенциальной подачей</b>		
Вращающимися резбонакатными головками		Для изготовления длинных цилиндрических резьб треугольного и трапецеидального профилей на неподвижных деталях и, в частности, на деталях (тройниках и пр.), которые по своей конфигурации не могут быть обработаны на резбонакатных станках. Точность резьбы в массовом производстве соответствует 2-му классу.

К стержневому крепежу с крупной резьбой относятся изделия, у которых высота резьбового профиля составляет более  $0,15 d$ , где  $d$  - наружный диаметр резьбы. В частности, к крепежным изделиям с крупной резьбой относятся путевые шурупы (ГОСТ 809-71, ТУ 14-176-100-96, ТУ 1293-165-

01124323-2005, ТУ 14-176-133-2004), которые в настоящее время находят широкое применение в современной конструкции верхнего строения железнодорожного пути (рис 2 -4). Характерной особенностью путевых шурупов является наличие резьбы несимметричного профиля с наружным диаметром 24 мм, шагом 12,5 мм и высотой выступов 4,5 мм. (рис.5) В данной работе основное внимание уделено совершенствованию процесса накатки путевых шурупов.

Путевые шурупы относятся к классу крепежных изделий с упорной шурупной резьбой, которые не свинчиваются с гайками. Поэтому применение их в упругом скреплении делает последнее практически необслуживаемым, что экономически эффективно при эксплуатации железнодорожного пути.

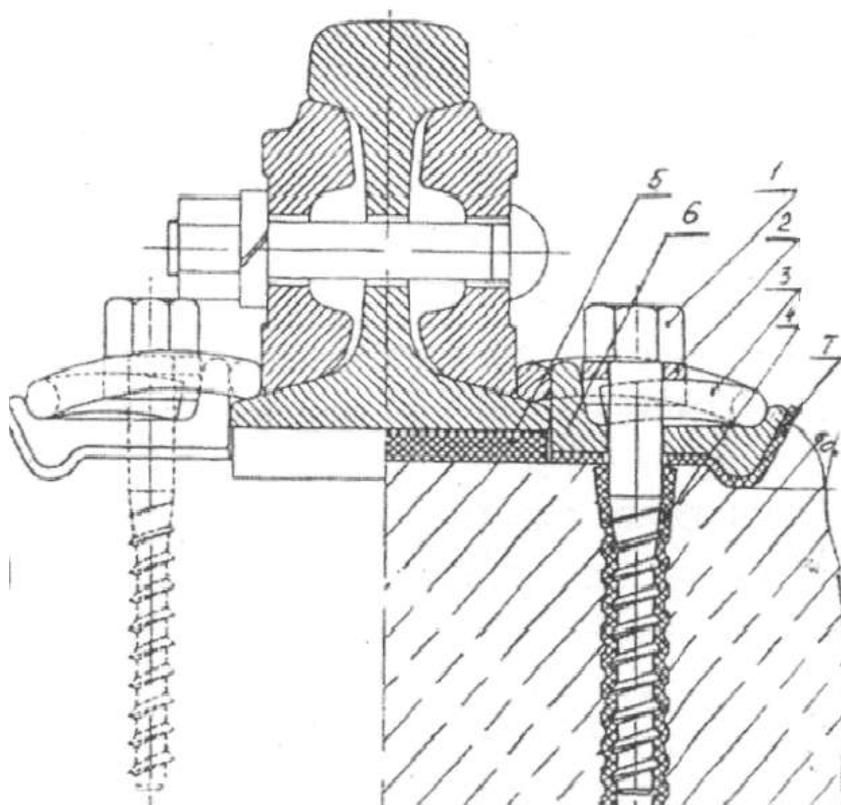


Рис.1. Скрепление рельсовое ЖБР – 65 с использованием пружинных клемм и путевых шурупов: 1 - шуруп путевой с шестигранной головкой; 2 - шайба плоская; 3 - клемма ЖБР; 4 - дюбель полимерный; 5,6- прокладки; 7 - плита.

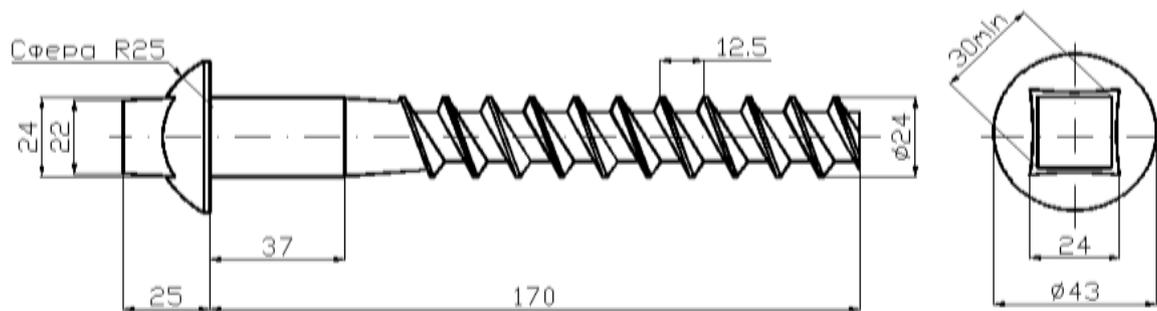


Рис.2. Шуруп путевой с квадратной головкой (ГОСТ 809-71).

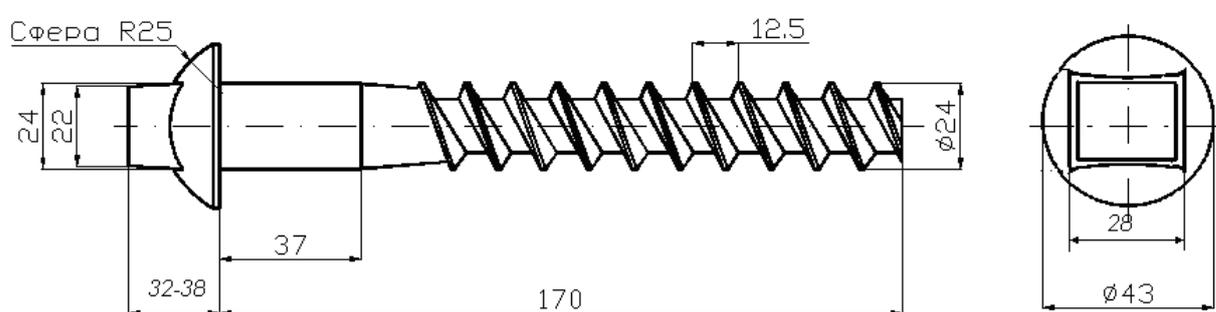


Рис.3. Шуруп путевой с прямоугольной головкой  
 (“Фосло”, Германия, ТУ 14-176-100-96).

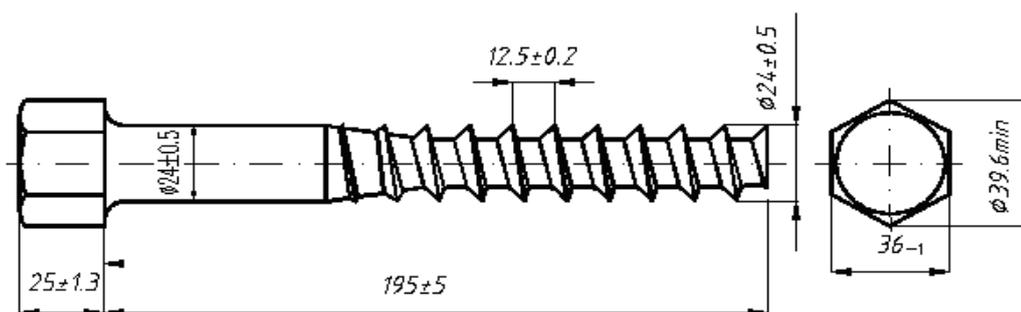


Рис.4. Шуруп путевой с шестигранной головкой  
 (ТУ 1293-165-01124323-2005, ТУ 14-176-133-2004)

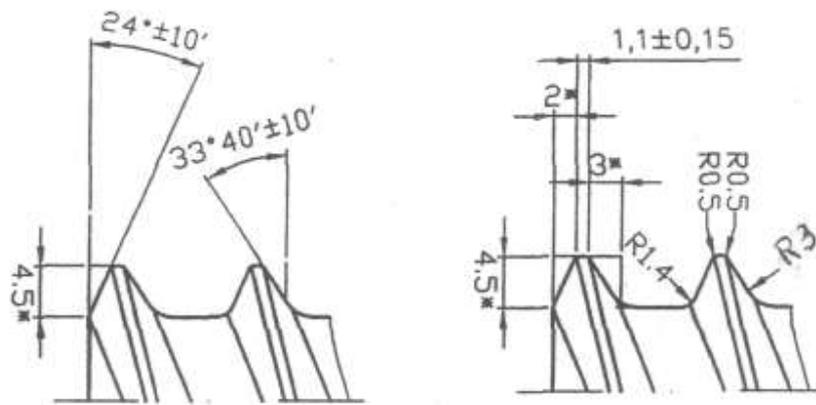


Рис.5. Резьба путевых шурупов

В условиях ОАО «ММК-МЕТИЗ» заготовки путевые шурупы изготавливаются на холодной штамповкой за четыре перехода на автоматах-комбайнах КА-84 и КА-74 («Malmedie», Германия). Резьба формируется горячей накаткой на трехроликовых станках WGW-25 (Германия) или ORT (Италия).

На рис 6 представлена схема технологического процесса изготовления путевых шурупов 24x170 с квадратной головкой по ГОСТ 809-71 от исходной заготовки до готового изделия.

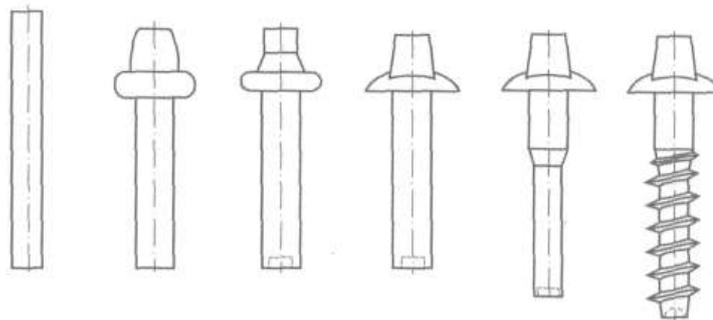


Рис. 6. Схема технологического процесса изготовления путевых шурупов 24x170 с квадратной головкой по ГОСТ 809-71

Процесс формоизменения состоит из операций отрезки заготовки; черновой, предварительной и окончательной высадки головки с фланцем; редуцирования стержня; индукционный нагреем участка стержня под накатку и

формирование резьбы накаткой тремя роликами.

На рис. 7. представлена схема технологического процесс изготовления путевых шурупов 24x195 с шестигранной головкой по ТУ 1293-165-01124323-2005, включающая операции отрезки заготовки, предварительной и окончательной высадки головки, редуцирования стержня, обрезки головки на шестигранник, накатки резьбы горячим способом.

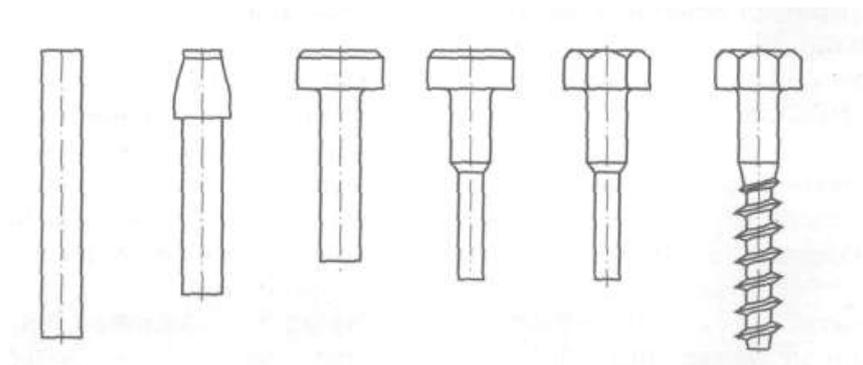


Рис. 7. Схема технологического процесса изготовления путевых шурупов 24x195 шестигранной головкой по ТУ 1293-165-01124323-2005

Температурно-временные режимы нагрева заготовок шурупов в индукторе перед накаткой резьбы и технология накатки одинаковы для обоих видов шурупов. Схема накатки шурупной резьбы тремя накатными роликами представлена на рис. 8.

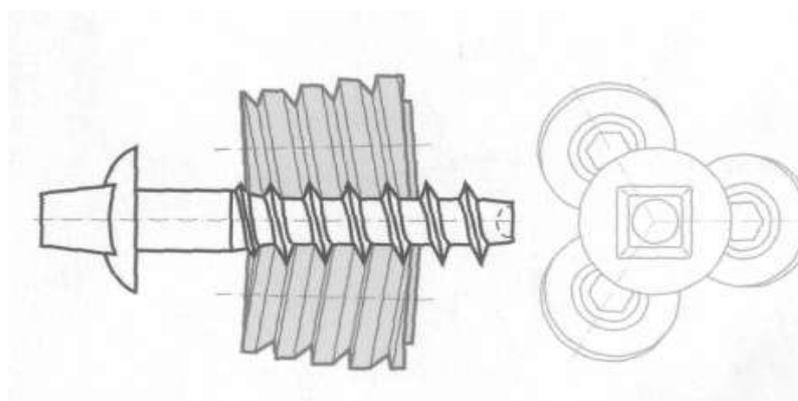


Рис. 8. Схема накатки резьбы на путевых шурупах тремя роликами

Узким местом в технологии изготовления путевых шурупов является процесс накатки, который в некоторых случаях приводит либо к образованию задигов и отслоений во впадинах сформированной резьбы, возникающих вследствие локального проскальзывания инструмента относительно деформируемой заготовки (рис.9), либо к возникновению пустот в центральных зонах из-за неблагоприятной схемы напряженно-деформированное состояние и возникновения растягивающих напряжений в осевых зонах заготовки.



Рис.9. Дефекты резьбы путевых шурупов в виде задигов и отслоений

На основании анализа промышленного опыта ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» установлено, что при формировании резьбы на путевых шурупах горячей накаткой с использованием трехроликовых станков возникают наружные и внутренние дефекты. Наружные дефекты:

- задиры по выступам накатываемого профиля;
- отпечатки заходов винтовых калибров валков (роликов) на боковых сторонах профиля;
- подрезка зуба и вдавливание срезанного металла во впадину профиля;

- образование трещин во впадине профиля;
- отслоение (шелушение) металла по профилю.

К внутренним дефектам относится образование трещин и пустот в осевой части накатанной заготовки.

Задир по выступам профиля происходят от налипания металла на рабочую поверхность формообразующего инструмента при недостаточной чистоте рабочей поверхности и неудовлетворительных условиях смазывания. Причиной задиров также является неправильная установка и настройка инструмента.

Отпечатки (вмятины) заходов витков профиля на боковых сторонах профиля происходят при неправильном изготовлении заходов профиля валков, при наличии люфтов в кинематической цепи привода валков и неправильной их установке.

Подрезка зуба и закатывание срезанного металла во впадину профиля происходят при недостаточно точной осевой и угловой настройке валков, а также при острых вершинах деформирующих гребней заборного конуса валков.

Образование трещин во впадинах накатываемого профиля происходит от избытка металла в калибрах валков при заниженном межцентровом расстоянии последних.

Образование трещин и вскрытие полости заготовки происходит при накатке профиля в заднем конце на заготовках с глубокой центровкой или заниженном межцентровом расстоянии валков.

Отслоение (шелушение) металла на заготовке происходит от наличия поверхностных дефектов заготовки (риски, трещины, обехуглероженный слой, перенаклеп верхнего слоя металла и т.п.).

При накатке изделий с винтовой поверхностью из-за одностороннего действия калибров валков на концах накатываемой заготовки происходит осевая вытяжка металла, вследствие чего крайние 1,5-2 витка заготовки не имеют полной высоты профиля. Передний конец заготовки ввиду наличия конуса всегда имеет больший участок с неполной высотой профиля. С увеличением шага и высоты профиля с винтовой поверхностью длина участка с неполной высотой профиля заготовки увеличивается.

На заднем конце заготовки происходит растяжка шага и уменьшение внутреннего диаметра прокатываемого профиля. По мере движения заднего конца заготовки между валками растяжка шага профиля постепенно увеличивается, а внутренний и наружный диаметры уменьшаются. Это происходит от упругих деформаций узлов накатного механизма и изменения межцентрового расстояния между ними по мере продвижения заднего конца заготовки между ними.

Анализ литературных данных и практического опыта ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» и других предприятий, производящих крепежные изделия, показал:

1. Характерной особенностью способов формирования резьбы накаткой является локальное проскальзывание резьбоформирующего инструмента относительно отдельных зон деформируемой заготовки. Проскальзывание инструмента относительно заготовки, зачастую (особенно при накатке крупной резьбы) приводит к образованию поверхностных дефектов в виде задиров и отслоений на отдельных участках накатанной резьбы. Поэтому исследования, направленные на поиск рациональных способов и режимов накатки резьбы, при которых исключается образование поверхностных дефектов являются важными и актуальными

2. В процессе накатки резьбы в некоторых случаях в зонах, примыкающих к оси заготовки, возникают растягивающие напряжения, которые вызы-

вают образование рыхлостей и пустот, что снижает качество изделий. Результаты моделирования процесса накатки резьбы с использованием современного метода исследования (метод конечных элементов) позволят получить достоверные данные о напряженно-деформированном состоянии в накачиваемой заготовке, что даст возможность определить рациональные режимы накатывания резьбы, при которых исключается образование рыхлости и пустот в осевой части.

3. При накатке резьбы в результате колебаний конструктивно-технологических параметров (размеры исходных заготовок, механические свойства применяемых сталей, условия трения, температура и т.п.) изменяются усилия в системе «станок-инструмент-заготовка», что вызывает колебания размеров накатанных резьб. При недостаточной жесткости системы «станок-инструмент-заготовка» и широком диапазоне колебаний вышеотмеченных параметров возможен выход размеров накатанной резьбы за поле регламентированных допусков, что приводит к образованию брака. Поэтому разработка надежной методики прогнозирования точности резьбы позволит определить рациональные значения жесткости системы «станок-инструмент-заготовка», при которых обеспечивается получение изделий с качественной резьбой.

4. Анализ силового взаимодействия в системе «инструмент-заготовка» позволит выявить наиболее нагруженные зоны рабочей поверхности инструмента и разработать мероприятия по повышению его стойкости. Полученная информация позволит разработать новые технические решения по повышению ресурса работы инструмента и определить сроки своевременной его замены.

В целом проведенные исследования позволят получить новые научные знания о механике процесса накатки резьбы, а практическое применение выполненных разработок обеспечит повышение эффективности процессов изготовления стержневых изделий с резьбой

На основании вышеизложенного сформулированы следующие задачи

исследования:

- исследовать кинематику процесса накатки, с целью определения рациональных способов и режимов деформирования, при которых обеспечивается минимальное проскальзывание инструмента относительно заготовки;

- разработать компьютерную модель процесса накатки резьбы, определить напряженно-деформированное состояние в деформируемой заготовке и режимы деформирования, снижающие вероятность образования рыхлости и пустот в осевой части накатанного участка;

- разработать методику прогнозирования точности резьбы в зависимости от колебаний диаметра исходной заготовки, механических свойств применяемой стали, условий трения и жесткости системы «станок-инструмент-заготовка»;

- разработать методику прогнозирования стойкости инструмента, с целью поиска новых технических решений по повышению ресурса работы инструмента и определения сроков своевременной его замены;

- разработать рациональные режимы накатки резьбы на путевых шурупах, спроектировать инструмент и провести промышленное опробование выполненных разработок в условиях ОАО «Магнитогорский метизнокалибровочный завод «ММК-МЕТИЗ».

## 1.2. Исследование кинематики процесса формирования крупной резьбы при использовании различных способов накатывания

Как отмечалось выше при накатывании крупной резьбы возникают проблемы, связанные низким качеством изделий из-за плохого оформления выступов резьбы и появления отслоений и задиров на резьбовой поверхности (см. рис.1.9). Одной из причин образования дефектов является проскальзывание рабочей поверхности резьбообразующего инструмента относительно накатываемой заготовки.

С целью определения проскальзывания инструмента относительно заготовки и выявления наиболее эффективного способа резьбоформирования, при котором наблюдается минимальное проскальзывание проведены исследования кинематики процесса резьбоформирования с использованием наиболее распространенных способов:

- цилиндрическими роликами;
- плоским инструментом (плашки);
- инструментом «ролик-сегмент» (планетарная накатка).

При накатке цилиндрическими роликами (рис.10) заготовка совершает вращательное движение. Принято, что на конечном этапе накатки резьбы заготовка 1 вращается с угловой скоростью  $\omega$ , а ролик 2 имеет угловую скорость  $\omega_1$ . При этом имеются окружности с радиусом  $r_0$  на заготовке и радиусом  $R_0$  на ролике, на которых линейные скорости  $V$ , одинаковы.

Тогда угловые скорость заготовки и ролика

$$\omega = \frac{V}{r_0}, \quad \omega_1 = \frac{V}{R_0}. \quad (1)$$

Линейная скорость точки заготовки, расположенной во впадине резьбы

$$V_{B3} = \omega \cdot r_B = \frac{r_B}{r_0} V \quad (2)$$

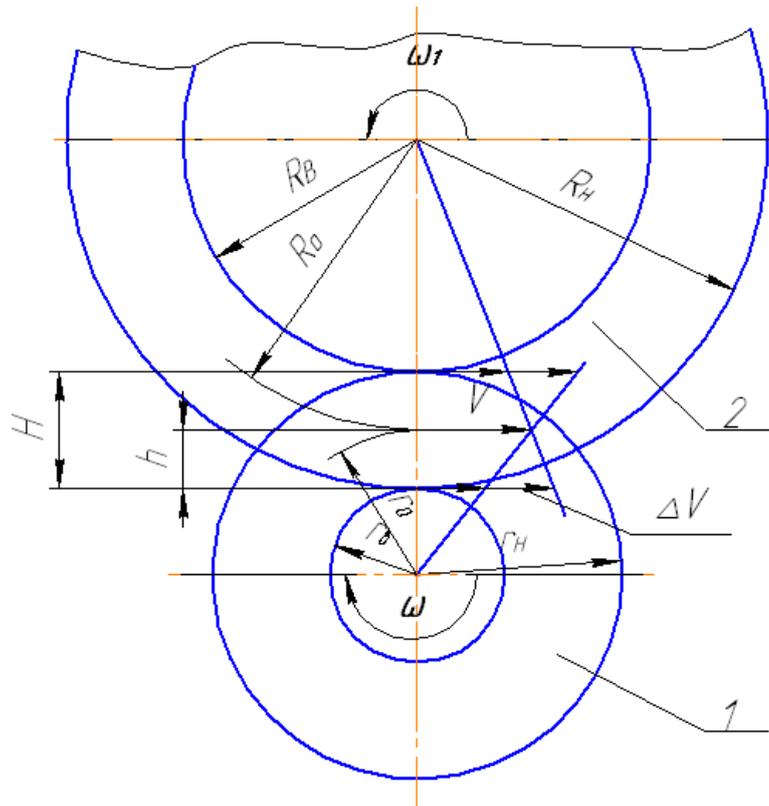


Рис.10. К расчету кинематики процесса накатывания цилиндрическими роликами  
 Линейная скорость точки, расположенной на наружной поверхности ролика

$$V_{н.л.} = \omega_1 \cdot R_H = \frac{R_H}{R_0} V \quad (3)$$

Разность скоростей, характеризующая проскальзывание заготовки и инструмента

$$\Delta V = V_{н.л.} - V_{в.з} = V \cdot \left( \frac{R_H}{R_0} - \frac{r_B}{r_0} \right) \quad (4)$$

Тогда относительная скорость проскальзывания во впадине резьбы

$$\mathcal{G} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{R_H}{R_0} - \frac{r_B}{r_0} \quad (5)$$

Анализируя полученные выражения, установлено, что проскальзывание зависит от положения радиусов  $r_0$  и  $R_0$  окружностей, где скорости одинаковы (качение без проскальзывания). Положение этих окружностей зависит от формы накатываемой профиля резьбы, условий трения, температуры заго-

товки и инструмента и других факторов. Для оценки расположения окружностей вводился коэффициент

$$k = \frac{h}{H}, \quad (6)$$

где  $h$  - расстояние от впадины резьбы до точки на заготовке и инструменте с одинаковыми скоростями;

$H$  – высота выступа резьбы.

Тогда относительная скорость проскальзывания

$$g = \frac{R_n}{R_n + k(R_n - R_e)} - \frac{r_H}{r_e + k(r_n - r_e)} \quad (7)$$

В качестве примера рассматривался процесс накатки путевых шурупов ЦП-54 на трехроликовой накатной машине модели WGW-25 (фирма «Кизерлинг», Германия). Для заданных параметров  $r_B = 7,5\text{мм}$ ;  $r_n = 12\text{мм}$ ;  $r_0 = 9,5\text{мм}$ ;  $R_n = 40\text{мм}$ ;  $R_B = 35,5\text{мм}$ ;  $R_0 = 38\text{мм}$  рассчитывалась относительная скорость проскальзывания в впадине резьбы. При этом коэффициенту « $k$ » задавались значения в диапазоне 0,3...0,8. Результаты расчетов представлены в табл.3. и на рис.11.

Таблица 3.

Относительная скорость проскальзывания при накатке цилиндрическими роликами

$K$	$r_e$	$r_H$	$R_e$	$R_H$	$r_0$	$R_0$	$g$
0,3	7,5	12	35,5	40	8,85	36,85	0,238024
0,4	7,5	12	35,5	40	9,3	37,3	0,265934
0,5	7,5	12	35,5	40	9,75	37,75	0,290372
0,6	7,5	12	35,5	40	10,2	38,2	0,311826
0,7	7,5	12	35,5	40	10,65	38,65	0,330703
0,8	7,5	12	35,5	40	11,1	39,1	0,347342

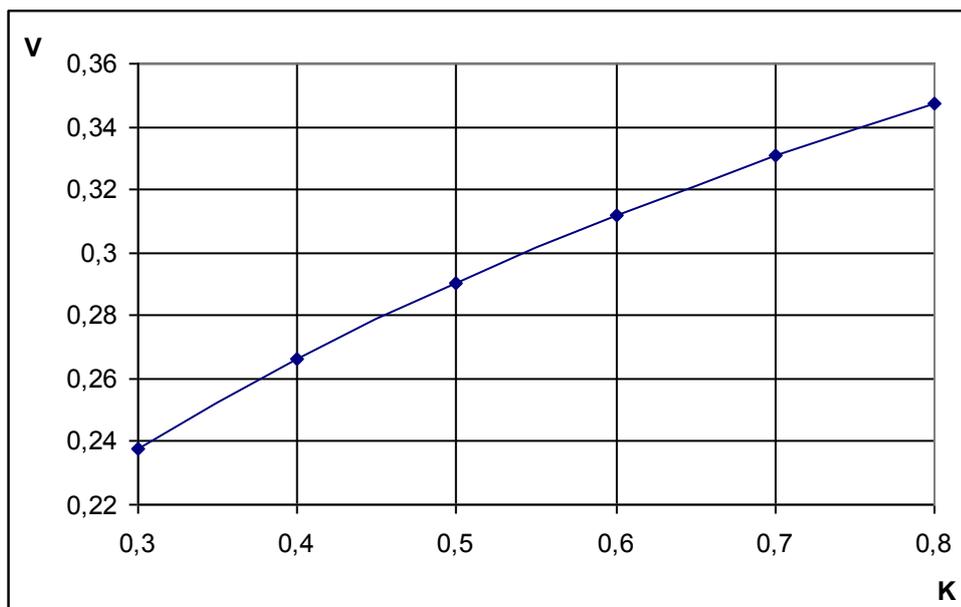


Рис.11. Зависимость относительной скорости проскальзывания от коэффициента «к» при накатке цилиндрическими роликами

Рассматривая конечный этап накатки плоскими плашками (рис.12), принято, что подвижная плашка 2 движется со скоростью  $V$ . Заготовка 1 совершает плоскопараллельное движение. Мгновенный центр вращения (точка  $C_v$ ) располагается на расстоянии  $r_o$  от оси заготовки. Тогда угловая скорость вращения заготовки

$$\omega = \frac{V}{2 \cdot r_o}.$$

Линейная скорость точки заготовки, расположенной во впадине резьбы

$$V_{B.3} = \omega \cdot (r_o + r_B) = V \cdot \frac{r_o + r_B}{2r_o}. \quad (8)$$

Разность скоростей

$$\Delta V = V - V_{B.3} = V \cdot \left( \frac{r_o - r_B}{2r_o} \right). \quad (9)$$

Относительная скорость проскальзывания

$$\mathcal{G} = \frac{\Delta V}{V} = \frac{r_0 - r_B}{2r_0}. \quad (10)$$

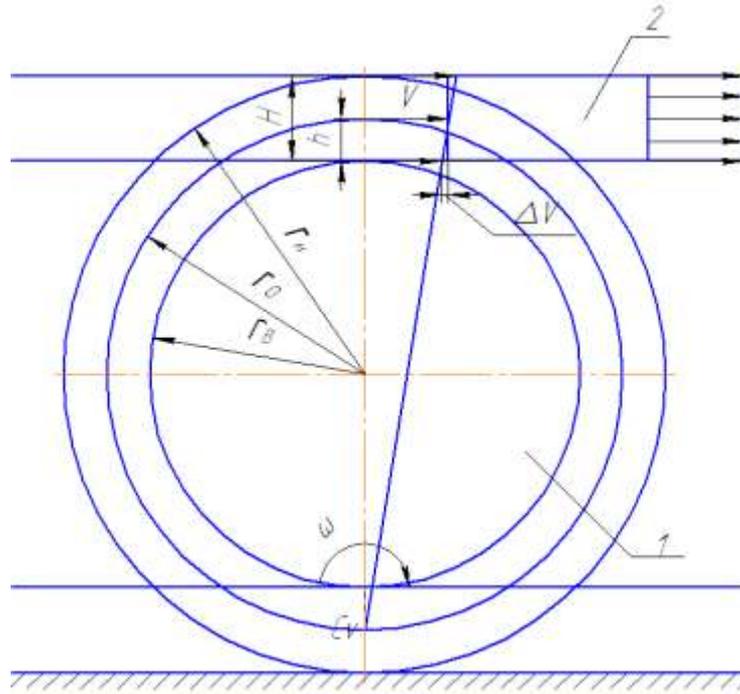


Рис.12. Кинематика процесса накатывания плоскими плашками

Вводя коэффициент «к» (6), получили

$$\mathcal{G} = \frac{k(r_n - r_g)}{2 \cdot (r_g + k(r_n - r_g))} \quad (11)$$

Используя полученную зависимость (11), проведены расчеты для случая накатки резьбы на путевых шурупах ЦП-54 при заданных параметрах  $r_B = 7,5 \text{ мм}$ ;  $r_H = 12 \text{ мм}$ ;  $r_0 = 9,5 \text{ мм}$  Результаты расчетов представлены в таблице 4 и на рис. 13.

Относительная скорость проскальзывания при накатке плашками

$K$	$r_e$	$r_H$	$r_0$	$\varrho$
0,3	7,5	12	8,85	0,076271
0,4	7,5	12	9,3	0,096774
0,5	7,5	12	9,75	0,115385
0,6	7,5	12	10,2	0,132353
0,7	7,5	12	10,65	0,147887
0,8	7,5	12	11,1	0,162162

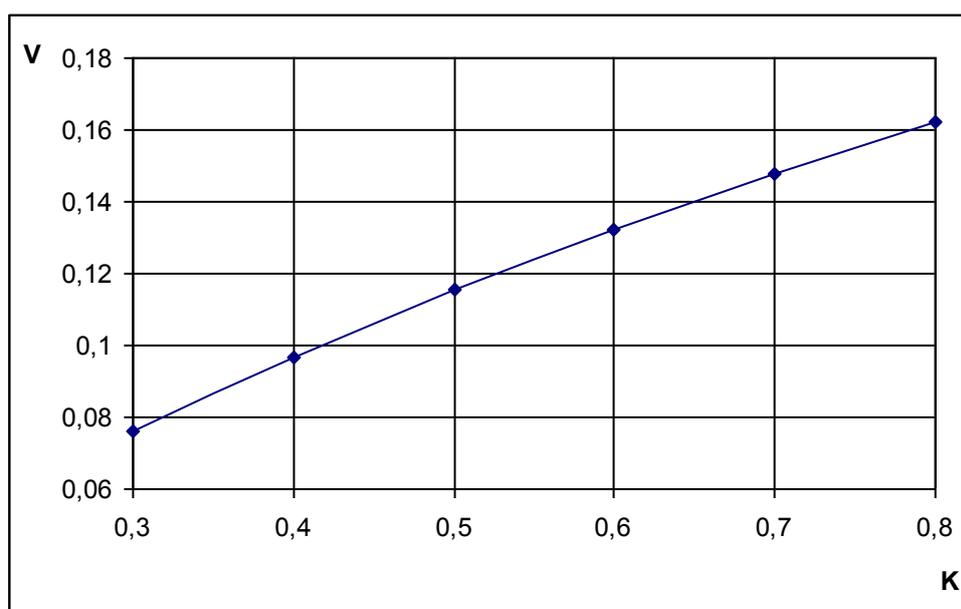


Рис.13. Зависимость относительной скорости проскальзывания от коэффициента «к» при накатке плашками

При планетарной накатке резьбы (рис.14) ролик 1 неподвижен, а сегмент 2 совершает вращательное движение с угловой скоростью  $\omega_1$ . При этом заготовка 3 совершает плоскопараллельное движение. На поверхности контак-



сегмента

$$V_{B.H.} = \omega_1 \cdot R_B = \frac{R_B}{R_0} V. \quad (14)$$

Разность скоростей

$$\Delta V = V_{B.H.} - V_{B.З} = V \cdot \left( \frac{R_B}{R_0} - \frac{r_0 + r_B}{2r_0} \right) \quad (15)$$

Относительная скорость проскальзывания

$$g = \frac{\Delta V}{V} = \frac{R_B}{R_0} - \frac{r_0 + r_B}{2r_0} \quad (16)$$

Вводя коэффициент «к» (6), характеризующий положение катящихся без скольжения окружностей, получили

$$g = \frac{R_B}{R_\epsilon + k(R_H - R_\epsilon)} - \frac{2r_B + k(r_H - r_\epsilon)}{2(r_\epsilon + k(r_H - r_\epsilon))}. \quad (17)$$

Используя формулу (17) для случая планетарной накатки резьбы путевого шурупа ЦП-54 при основных размерах  $r_B = 7,5 \text{ мм}$ ;  $r_H = 12 \text{ мм}$ ;  $r_0 = 9,5 \text{ мм}$ ;  $R_H = 150 \text{ мм}$ ;  $R_B = 145,5 \text{ мм}$ ;  $R_0 = 148 \text{ мм}$  рассчитывалась относительная скорость проскальзывания (табл. 5, рис. 15 ).

Таблица 5

Относительная скорость проскальзывания при планетарной накатке

Коэффициент K	$r_\epsilon$	$r_H$	$R_\epsilon$	$R_H$	$r_0$	$R_0$	g
0,3	7,5	12	8,85	150	145,5	146,85	0,067078
0,4	7,5	12	9,3	150	145,5	147,3	0,084554
0,5	7,5	12	9,75	150	145,5	147,75	0,100156
0,6	7,5	12	10,2	150	145,5	148,2	0,114134
0,7	7,5	12	10,65	150	145,5	148,65	0,126697
0,8	7,5	12	11,1	150	145,5	149,1	0,138017

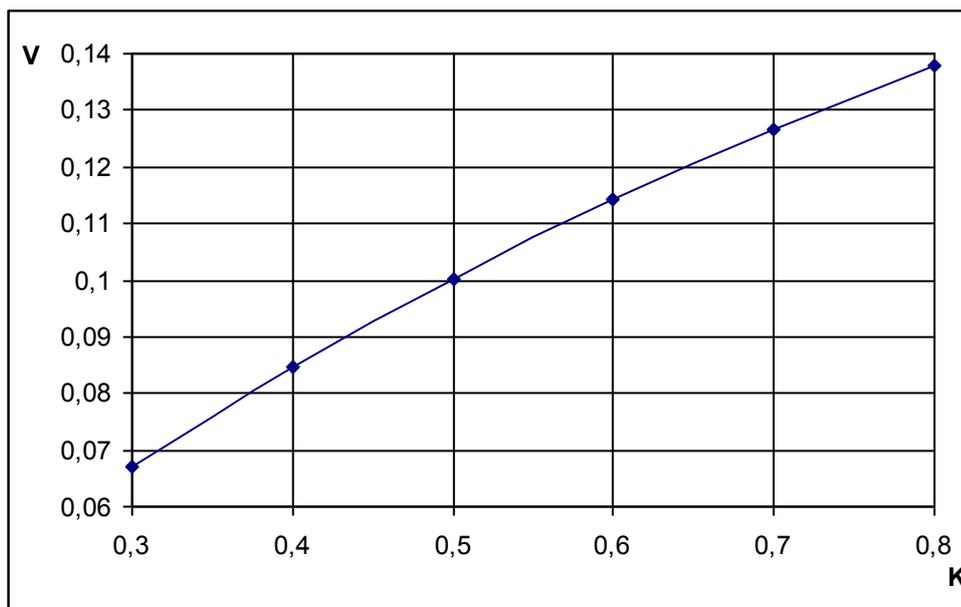


Рис.15. Зависимость относительной скорости проскальзывания от коэффициента «к» при планетарной накатке

Анализ полученных результатов показывает, что при планетарной накатке резьб с использованием инструмента «ролик-сегмент» относительная скорость проскальзывания заготовки относительно инструмента в 2,5...3,5 раза меньше, чем при накатке цилиндрическими роликами. Уменьшение относительного проскальзывания снижает вероятность возникновения задиров и отслоений на поверхности накатываемой резьбы. Учитывая, что инструмент для планетарной накатки существенно сложнее инструмента в виде плоских плашек, следует считать наиболее рациональной технологией накатки путевых шурупов накатку плоскими плашками. Соответствующие рекомендации по совершенствованию конструкции плашек для накатки путевых шурупов изложены в работе [42].

## Выводы по разделу 1.2

1. Установлены закономерности кинематики процесса резбоформирования при использовании трех наиболее распространенных способа накатывания: цилиндрическими роликами, плоскими плашками и инструментом «ролик-сегмент» (планетарная накатка). Определены зависимости, позволяющие определять скорость проскальзывания инструмента относительно заготовки в зонах впадины резьбы.

2. Анализ результатов расчетов показал, что минимальная скорость проскальзывания заготовки относительно инструмента имеет место при планетарной накатке резьбы с использованием инструмента «ролик-сегмент». При накатке путевых шурупов плоскими плашками этот параметр возрастает на 13...17 %, а при накатке цилиндрическими роликами - в 2,5...3,5 раза.

3. Учитывая то обстоятельство, что инструмент для планетарной накатки существенно сложнее инструмента в виде плоских плашек, следует считать наиболее эффективной технологией накатки путевых шурупов накатку плоскими плашками.

### **1.3. Математическое моделирование процесса формирования резьбы накаткой с использованием метода конечных элементов (МКЭ)**

#### **1.3.1. Основные положения метода конечных элементов, используемые в программном комплексе «DEFORM-3D»**

В основу программного комплекса «DEFORM-3D» положен метод конечных элементов [1-7], а математическая задача сводится к решению известных уравнений теории пластичности и теплопроводности совместно с начальными и граничными условиями в напряжениях, перемещениях или смешанного типа для различных областей деформируемого тела. При этом используются следующие основополагающие зависимости и соотношения:

### 1. Дифференциальные уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial X_j} + G_i = 0, \text{ или } \frac{\partial \sigma_{ix}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{iy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{iz}}{\partial z} + G_i = 0, \quad (18)$$

где  $G_i$  – объемная сила, приходящаяся на единицу объема. Принято, что объемная сила есть сила инерции, то есть  $G_i = -a_i \rho$ , где  $\rho$  – плотность ( $\text{кг/м}^3$ ),  $a_i$  – ускорение на  $i$  – ом шаге деформирования, которое определяется по формуле

$$a_i = \frac{v_{i1} - v_{i0}}{\Delta t}, \quad (19)$$

где  $v_{i0}$  и  $v_{i1}$  – скорости в начале и конце каждого деформационного шага (м/с),  $\Delta t$  – продолжительность  $i$  – ого этапа деформирования (с).

2. Уравнение связи компонент тензора деформации и вектора перемещений (дифференциальные зависимости Коши)

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_k}{\partial x_i} \frac{\partial U_k}{\partial x_j} \right). \quad (20)$$

3. Распределение скорости конечных элементов в матричном виде записывается как

$$v_i = [N] \{v_e\}, \quad (21)$$

где  $[N]$  – функция формы элемента;  $\{v_e\}$  – вектор узловых скоростей.

Выражение для скоростей деформации получается путем дифференцирования

$$\xi = [B] \{v_e\}, \quad (22)$$

где  $[B]$  – матрица, связывающая компоненты скоростей деформации с компонентами узловых скоростей.

#### 4. Условие пластичности Губера-Мизеса

$$\frac{3}{2} \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} = \bar{\sigma}^2, \quad (23)$$

где  $\sigma'_{ij}$  - девиатор напряжений;  $\bar{\sigma}$  - предел текучести.

#### 5. Уравнение теплового баланса деформируемой среды

$$cT\rho = k_l T_{li,i} + \beta \bar{\sigma} \bar{\varepsilon}, \quad (24)$$

где  $c$  – удельная теплоемкость среды при постоянном объеме;  $T$  – средняя абсолютная температура сплошной среды в градусах Кельвина;  $k_l$  - коэффициенты, определяющие условия теплообмена на границе  $l$ ;  $T_{li,i}$  – тепловое поле на границе  $l$ ;  $\beta$  - коэффициент, определяющий тепловыделение в результате деформации сплошной среды;  $\bar{\varepsilon} = \int_0^{\tau} \xi d\tau$  – накопленная деформация.

6. Закон трения Кулона-Амонтона, согласно которому считается что, касательные напряжения на поверхности контакта деформируемой среды с инструментом пропорциональны нормальному

$$\vec{\tau} = f \vec{\sigma}, \quad (25)$$

где  $f$  – коэффициент трения.

7. Используя программный комплекс «DEFORM-3D», могут решаться задачи упругопластические и жесткопластические. В зависимости от типа решаемых задач используются различные реологические уравнения состояния.

При решении упругопластических задач для зон, находящихся в упругом состоянии связь между деформациями и напряжениями выражается в виде обобщенного закона Гука

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] ; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} ; \\
\varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] ; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G} ; \\
\varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)] ; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} ,
\end{aligned} \tag{26}$$

где  $E$  – модуль Юнга;  $G$  – модуль сдвига;  $\mu$  - коэффициент Пуассона, которые связаны между собой зависимостью

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \tag{27}$$

Для зон деформируемой среды, где деформации становятся пластическими, вводятся так называемые переменные параметры упругости  $E^*$  и  $G^*$ , связь между которыми аналогична (3.10), и используются соотношения подобные (3.9), то есть

$$\begin{aligned}
\varepsilon_x &= \frac{1}{E^*}[\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)] ; \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G^*} ; \\
\varepsilon_y &= \frac{1}{E^*}[\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)] ; \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G^*} ; \\
\varepsilon_z &= \frac{1}{E^*}[\sigma_z - \mu(\sigma_y + \sigma_x)] ; \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G^*} ,
\end{aligned} \tag{28}$$

При решении жесткопластических задач, в частности при исследовании процессов горячего пластического деформирования, используется модель среды, у которой напряжение течения зависят от степени деформации, скорости деформации и температуры

$$\bar{\sigma} = \bar{\sigma}(\varepsilon, \dot{\varepsilon}, T). \tag{29}$$

В теории ОМД известны эмпирические формулы для аппроксимации

уравнения (29) аналитическими зависимостями [8,9]. Однако, как правило, эти формулы обладают определенными погрешностями и недостаточно точно передают количественный и качественный характер зависимости (29). В программном комплексе «DEFORM-3D» не используются эмпирические формулы, а аппроксимацию сопротивления деформации в зависимости от термомеханических параметров осуществляют непосредственно на основе экспериментальных данных, представленных в виде таблиц.

8. В основу МКЭ, применяемого в программном комплексе «DEFORM-3D», используется вариационный принцип Лагранжа, согласно которому истинное состояние системы отличается от всех возможных тем, что сообщает полной энергии деформации минимальное значение [10, 11].

Расчеты выполняются поэтапно. Величина перемещений, деформаций и напряжений на каждом шаге определяется как

$$U = U_* + \Delta U \quad ; \quad \varepsilon = \varepsilon_* + \Delta \varepsilon \quad ; \quad \sigma = \sigma_* + \Delta \sigma \quad , \quad (30)$$

где  $U_*, \varepsilon_*, \sigma_*$  - значения перемещений, деформаций и напряжений на предыдущем шаге.

Параметры  $U_*, \varepsilon_*, \sigma_*$  обеспечивают минимум функционала полной энергии деформации на предыдущем этапе. Поэтому задача сводится к определению приращений функций  $\Delta U, \Delta \varepsilon, \Delta \sigma$ , при которых также функционал имеет минимальное значение.

Функционал, описывающий полную работу деформации на некотором шаге деформирования, имеет вид

$$\chi = \frac{1}{2} \iiint_V (\sigma \Delta \varepsilon + \Delta \sigma \varepsilon + \Delta \sigma \Delta \varepsilon) dV - \iiint_V G_i \Delta U dV - \iint_S \tau \Delta U dS \quad (31)$$

Структура функционала (31): первое слагаемое представляет собой работу внутренних сил, второе слагаемое – работу массовых сил, третье слагаемое - работу поверхностных сил (сил трения).

Функционал (31) выражается через матричные и векторные составляющие (матрица базисных функций элементов, вектор узловых перемещений и т.п.), а интегралы заменяются суммами и задача сводится к решению систем линейных уравнений относительно перемещений. По найденным значениям  $\Delta U_1, \Delta U_2, \dots, \Delta U_n$  определяются перемещения  $U$ , деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\xi$ , напряжения  $\sigma$ , компоненты тензоров деформации и напряжений, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, силы нормального давления, силы трения на поверхности контакта металла с инструментом, распределение температуры по объему деформируемой среды (температурные поля) и другие параметры.

Работа с использованием программного комплекса «DEFORM-3D» осуществляется в следующей последовательности:

1. В зависимости от конкретных условий (форма исходной заготовки и форма отштампованного изделия, форма инструмента, условия деформирования и т.п.) выбирается тип конечно-элементного анализа, то есть определяется, какая задача решается (плоская, осесимметричная или объемная).
2. Создаются геометрические модели исходной заготовки и инструмента (подвижного и неподвижного).
3. На заготовку наносится сетка конечных элементов.
4. Задаются реологические свойства заготовки, для чего используется либо имеющаяся в ПК «DEFORM-3D» база данных, либо термомеханические свойства материала заготовки задаются с помощью таблиц.
5. Устанавливается температура, при которой начинается процесс деформирования заготовки.
6. Задаются условия на поверхности контакта заготовки и инструмента (коэффициент трения).

7. В зависимости от типа применяемого оборудования устанавливается закон движения подвижного инструмента, в частности, при моделировании процесса штамповки на кривошипных прессах задаются угловая скорость вращения кривошипа и длины кривошипа и шатуна.

8. С заданной точностью выполняются расчеты. При этом определяются перемещения  $U$ , деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\xi$ , напряжения  $\sigma$ , компоненты тензоров деформации и напряжений, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, сила нормального давления, сила трения на поверхности контакта металла с инструментом, распределение температуры по объему деформируемой среды.

9. Результаты расчетов представляются либо в виде полей распределения соответствующих параметров по объему деформированного тела, либо в виде численных значений в узлах деформированной сетки.

Важнейшим этапом моделирования процессов деформирования, от которого зависят точность и трудоемкость расчетов, является нанесение сетки конечных элементов. В программном комплексе «Deform» в зависимости от типа решаемой задачи (плоская, осесимметричная или объемная) сетка элементов наносится с использованием треугольников, четырехугольников, тетраэдров, трехгранных призм (пятигранников), шестигранников.

Программный комплекс «DEFORM-3D» позволяет в зависимости от заданных условий автоматически разбивать деформируемый объем на необходимое количество элементов и изменять сетку в процессе моделирования. При этом можно задавать различные типы элементов для деформируемого тела одной и той же формы (треугольники и четырехугольники, тетраэдры и шестигранники).

Программный комплекс «DEFORM-3D» позволяет при необходимости изменять плотность сетки элементов в отдельных зонах деформируемого те-

ла.

### **1.3.2. Результаты компьютерного моделирования процесса накатки резьбы на путевых шурупах с использованием программного комплекса «DEFORM-3D»**

Реальные процессы накатки резьбы, которая представляет собой сложную винтовую поверхность, чрезвычайно сложны. Поэтому рассматривался процесс формирования на цилиндрической поверхности кольцевых выступов, профиль которых соответствует профилю резьбы, поперечной прокаткой с помощью инструмента в виде подвижной и неподвижной плашек.

На начальном этапе процесса моделирования, используя программный комплекс «Компас», создавались виртуальные объемные модели инструмента и заготовки. Инструмент задавался в виде параллелепипеда, у которых на рабочей поверхности выполнялись продольные канавки, профиль которых соответствовал профилю выступов резьбы путевых шурупов (см. рис.4) с шагом равным 12,5 мм. Заготовка задавалась в виде цилиндра с диаметром 21,6 мм, значение которого определено на основании экспериментальных исследований (см. раздел. 4 данного отчета)

Объемные виртуальные модели инструмента и заготовки переносились в ПК «Deform» и соответствующим образом размещались. Плашки располагались параллельно с зазором, равным диаметру заготовки, в котором размещалась заготовка. Ось заготовки располагалась перпендикулярно канавкам плашек.

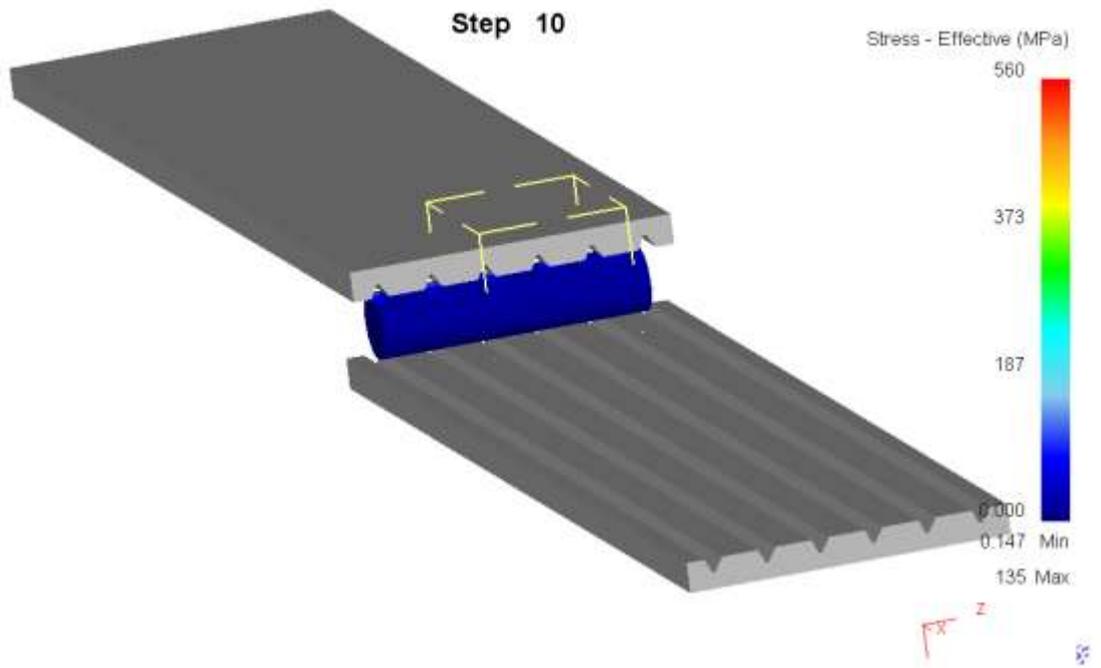
Заготовка разбивалась на 100000 элементов в идее тетраэдров. Материал заготовки сталь 20 (аналог DIN C15). Реологические свойства задавались из базы данных программного комплекса «DEFORM-3D».

Задавалась начальная температура заготовки  $1000^{\circ}\text{C}$ .

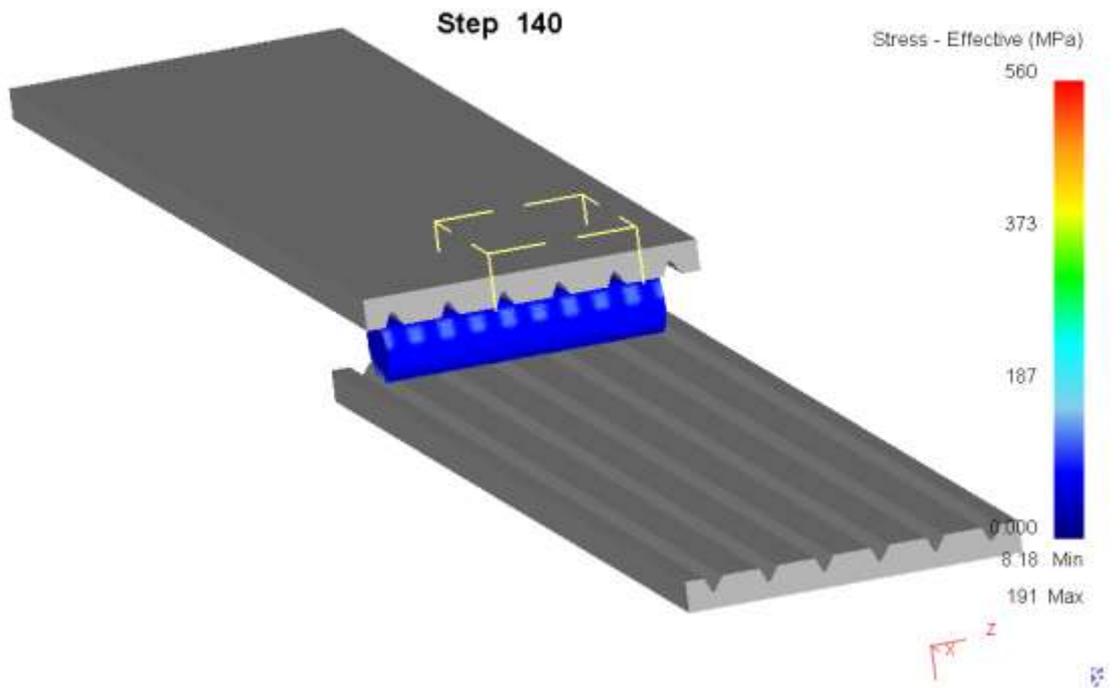
Коэффициент трения на поверхности инструмента с заготовкой принимался равным  $0,3$ .

Плашки рассматривались как абсолютно твердые тела. При этом нижняя плашка закреплялась, а верхней плашке задавались горизонтальное (в направлении ось  $x$ ) и вертикальное (в направлении оси  $y$ ) перемещения, причем  $\frac{\Delta_y}{\Delta_x} = \operatorname{tg} \alpha$ , где  $\Delta_y$  - вертикальное перемещение;  $\Delta_x$  - горизонтальное перемещение,  $\alpha = 4,5^{\circ}$  угол наклона рабочих поверхностей реальных плашек на заходной части. Полное вертикальное перемещение  $\Delta_y = 5$  мм, полное горизонтальное перемещение  $\Delta_x = 200$  мм.

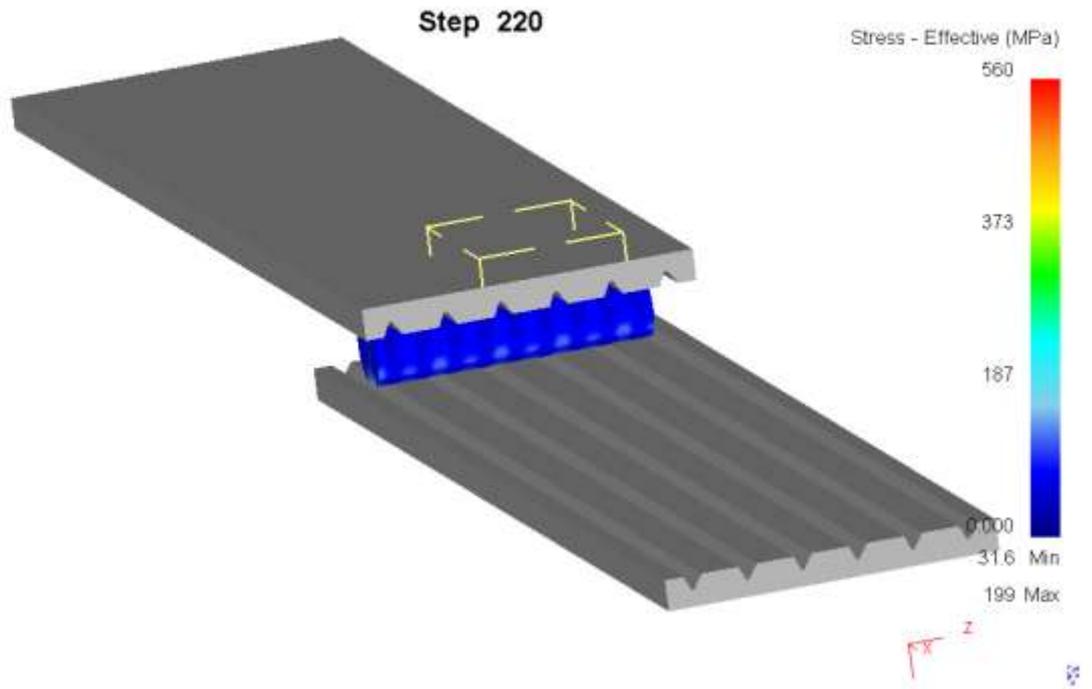
Программа запускалась на счет. Выполнялось 1000 шагов расчета. В результате расчета на каждом шаге определялись перемещения  $U$ , деформации  $\varepsilon$ , скорости деформации  $\xi$ , напряжения  $\sigma$ , компоненты тензоров деформации и напряжений, интенсивность деформаций, интенсивность напряжений, сила нормального давления, сила трения на поверхности контакта металла с инструментом, распределение температуры по объему деформируемой среды. Некоторые результаты расчетов представлены на рис.16-23.. Для оценки эффективности режимов накатывания резьбы на путевых шурупах предложено использовать критерий минимальной неравномерности деформации [43,44].



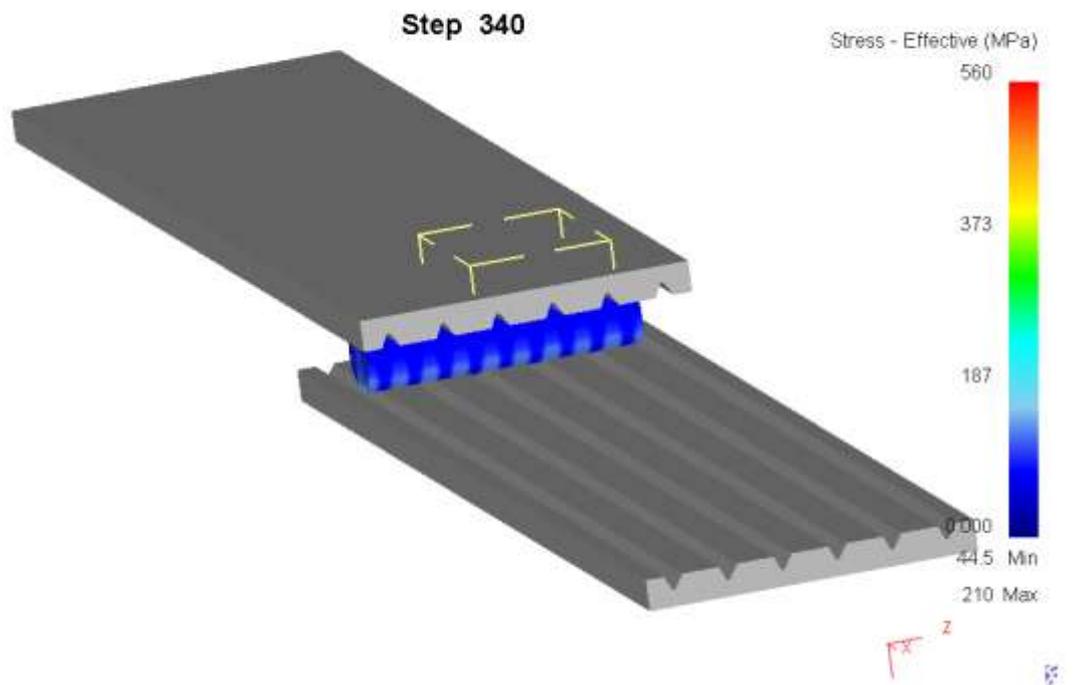
a)



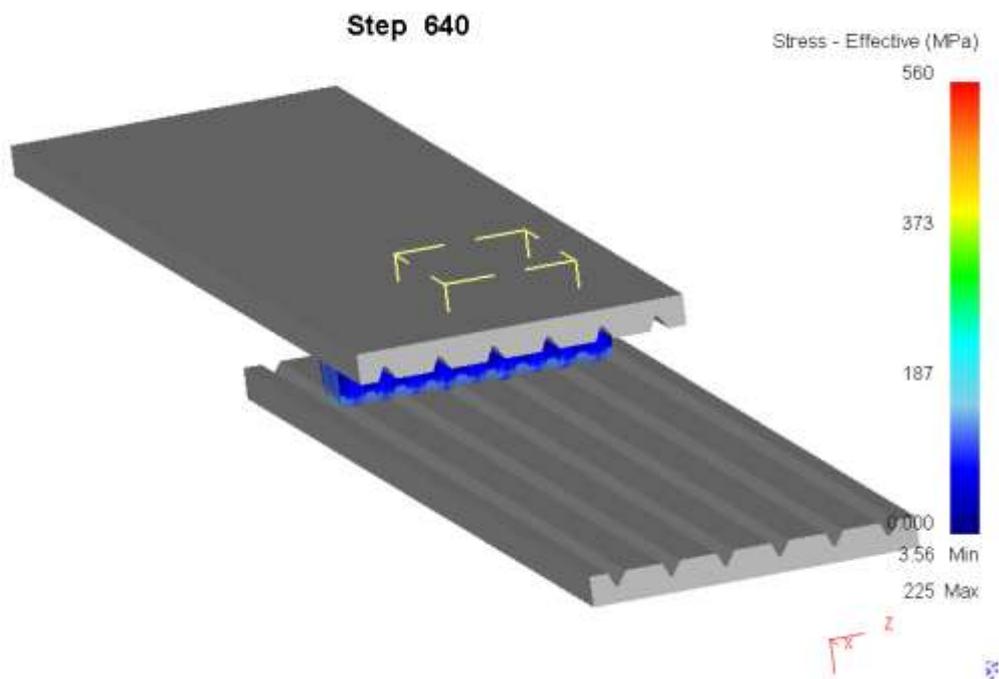
b)



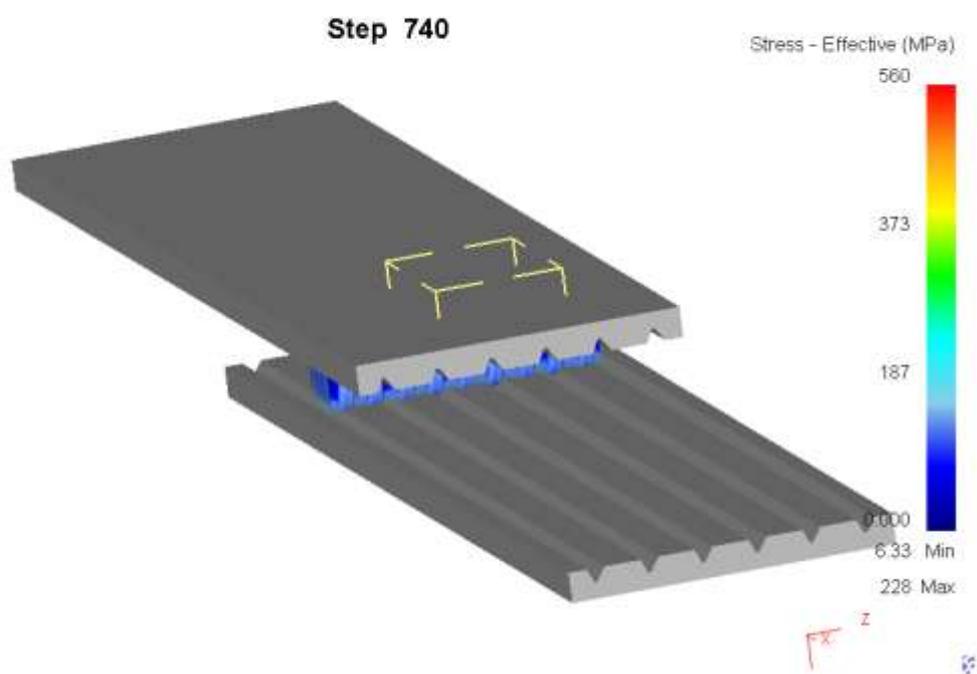
B)



Г)

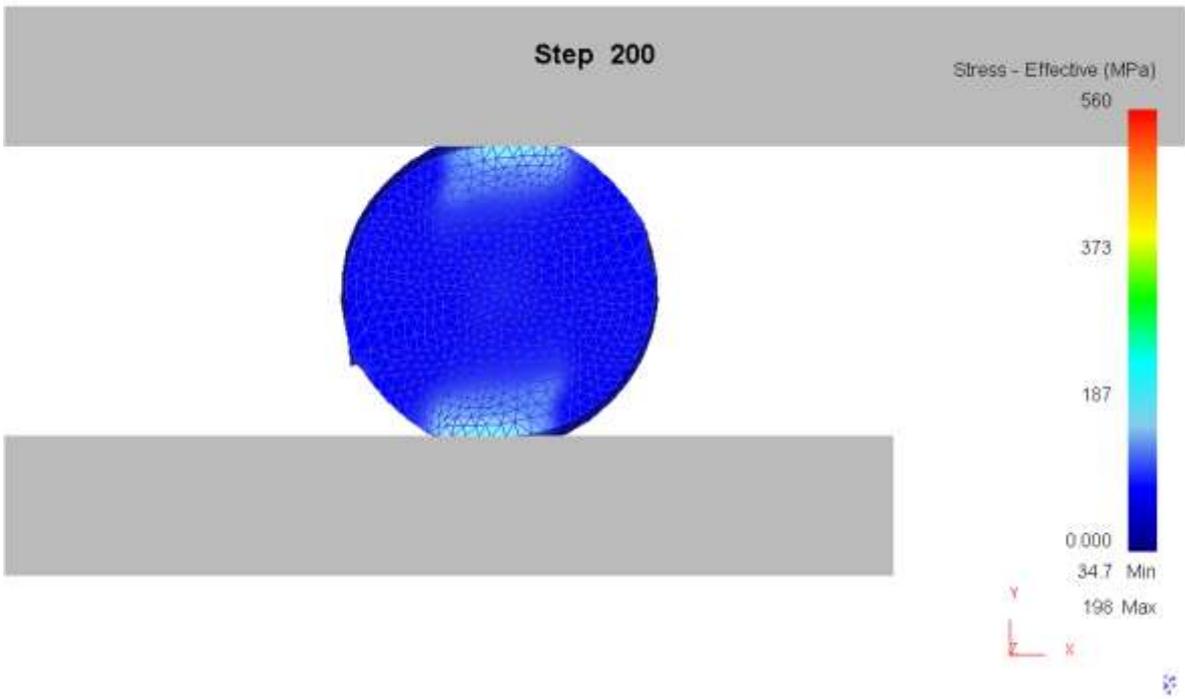


д)

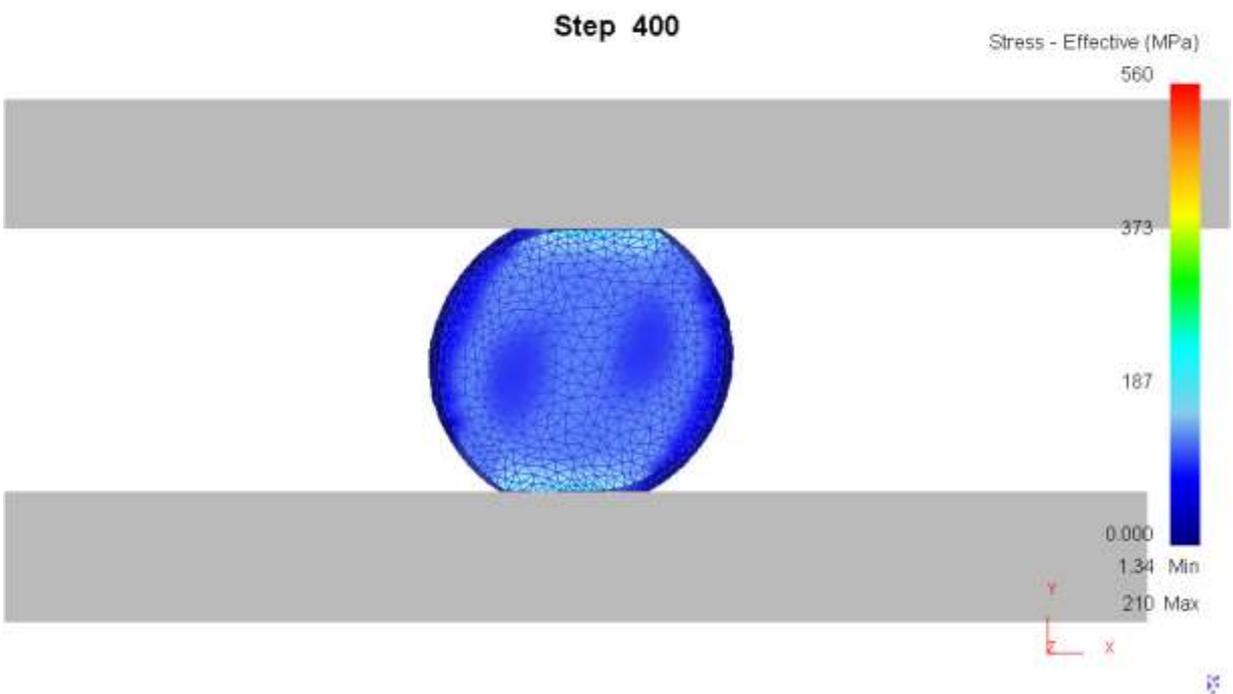


е)

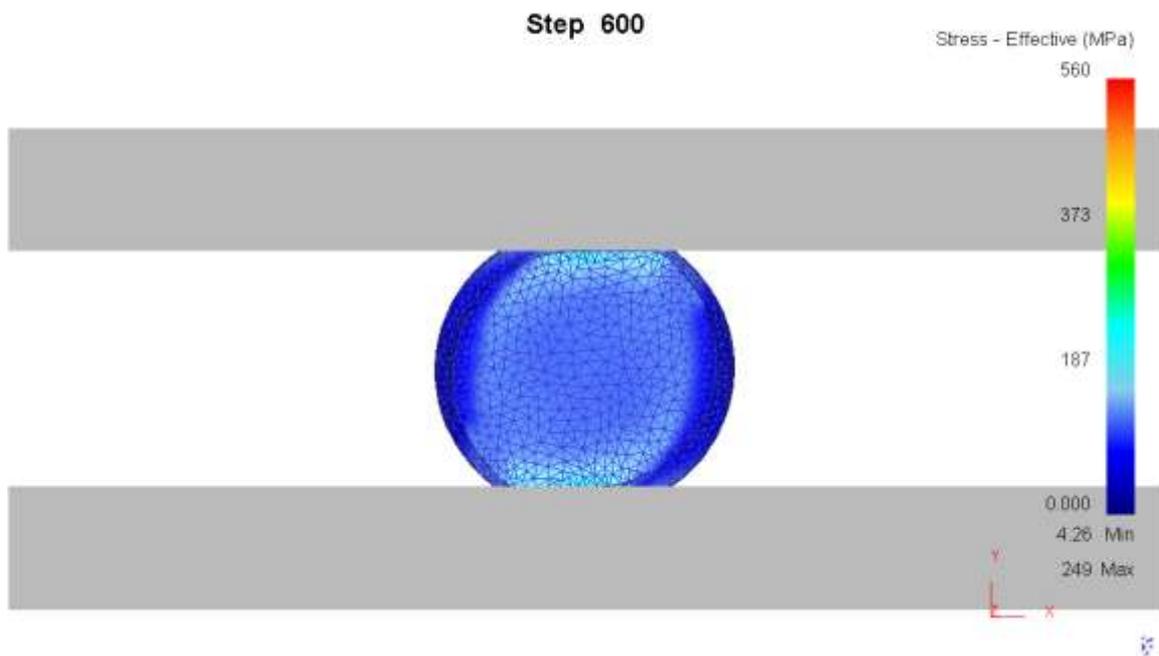
Рис.16. Изменение интенсивности напряжений на различных этапах процесса накатки резьбы на заготовке путевого шурупа



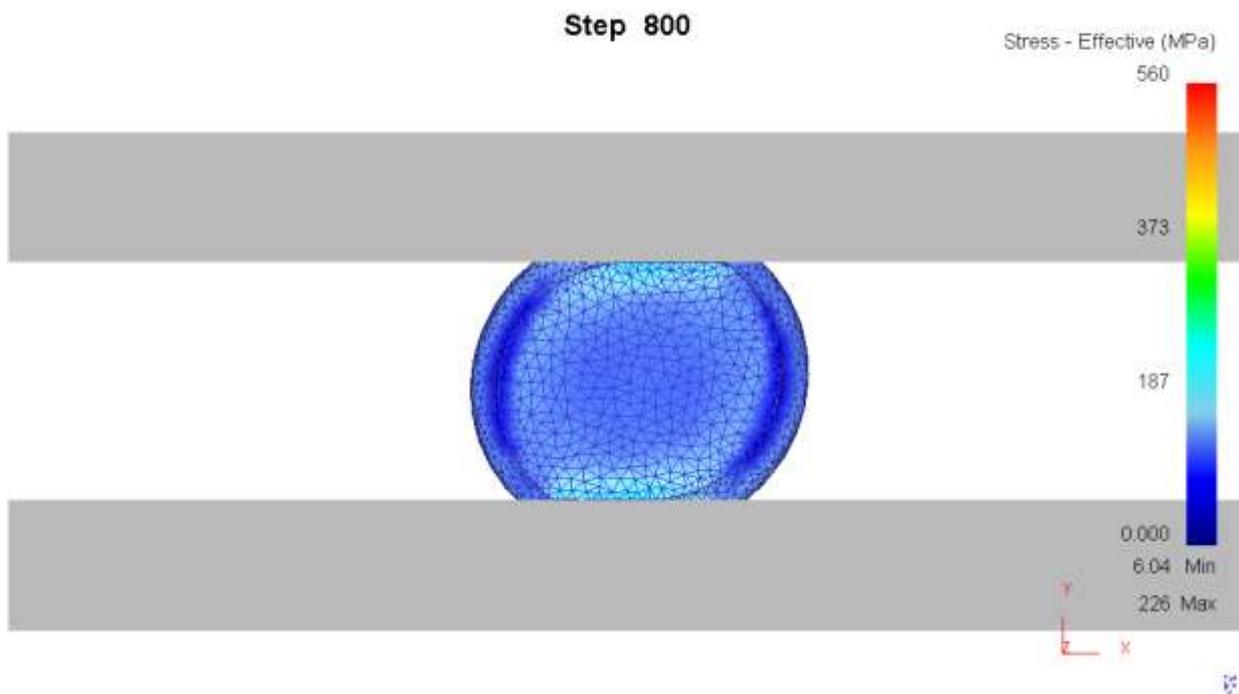
a)



b)

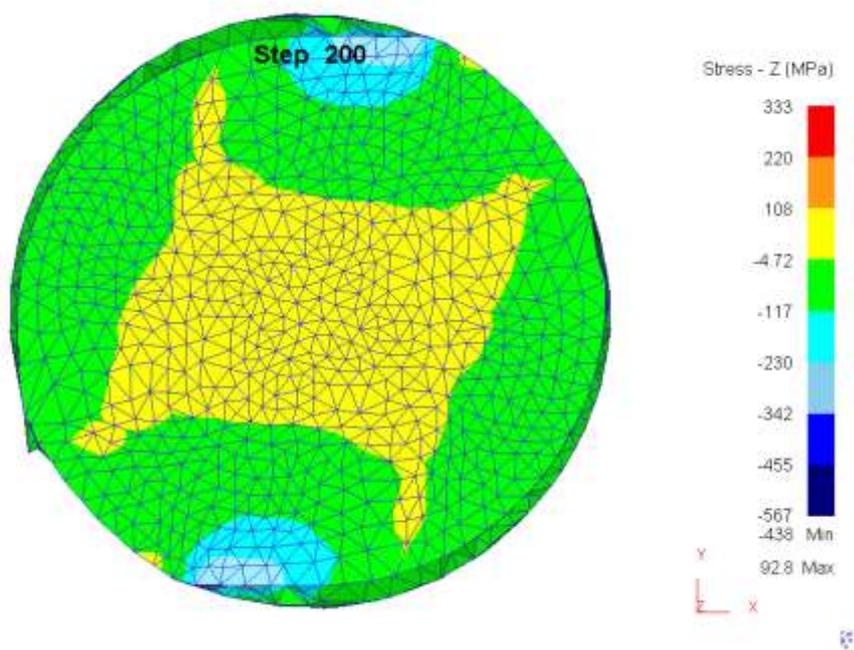


В)

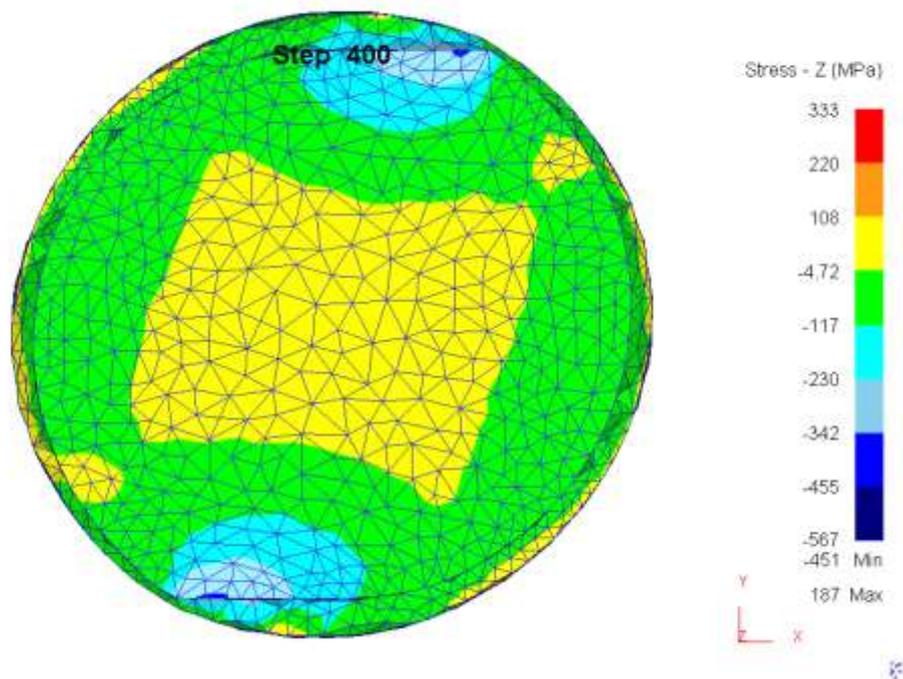


Г)

Рис.17. Изменение интенсивности напряжений в плоскости, перпендикулярной оси заготовки, на различных этапах накатки резьбы



а)



б)

Рис.18. Компонента напряжений  $\sigma_z$  в накатываемой заготовке на отдельных этапах деформирования

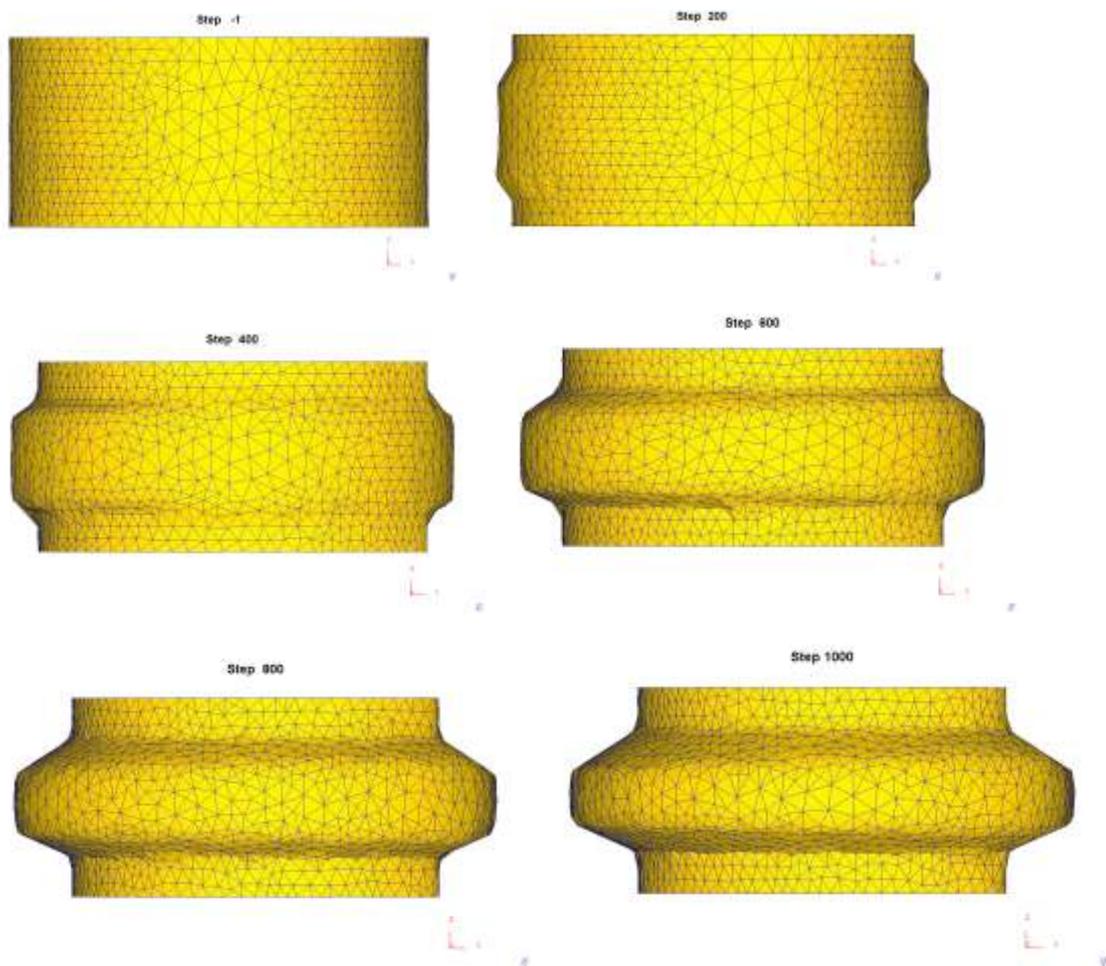


Рис.19. Изменение формы заготовки при накатке одного выступа на  
отдельных этапах

## Step -1

### Load Prediction

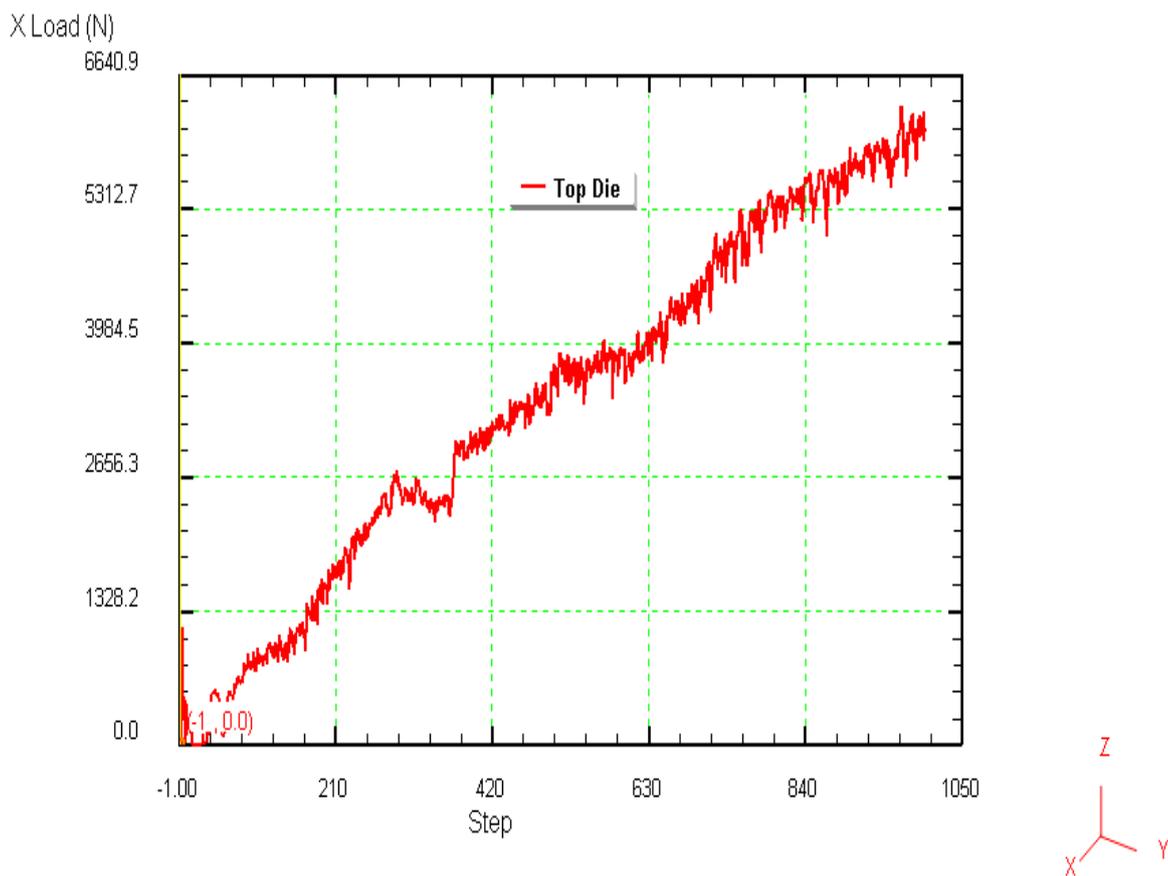


Рис.20. Изменение тангенциальной силы накатывания в процессе формирования выступа резьбы

## Step -1

### Load Prediction

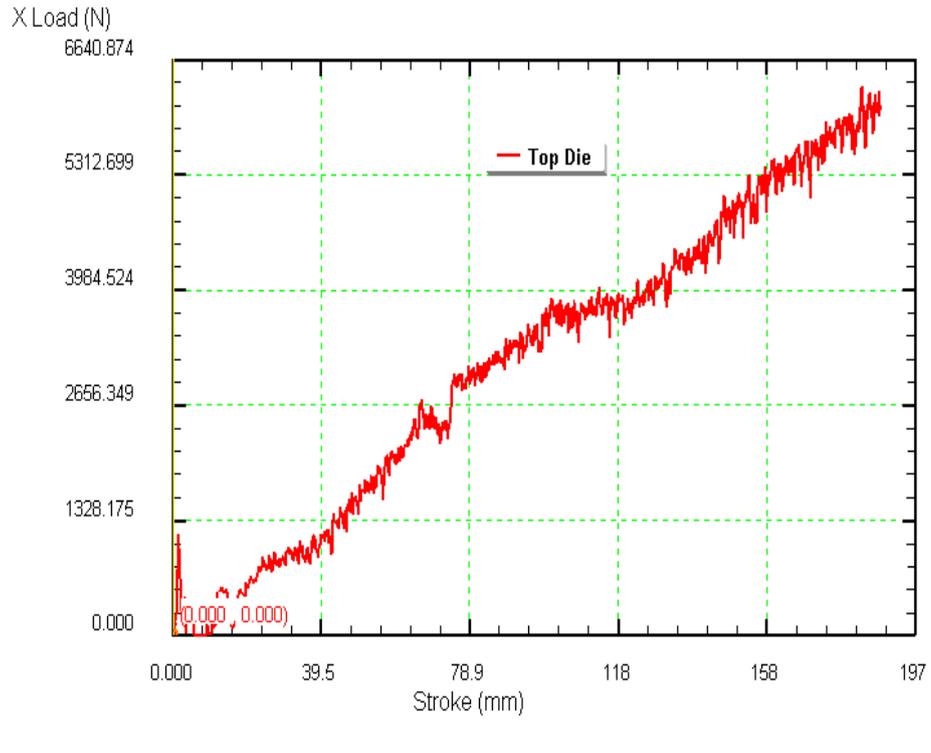


Рис.21. Изменение тангенциальной силы накатывания в зависимости от перемещения подвижной плашки

## Step -1

### Load Prediction

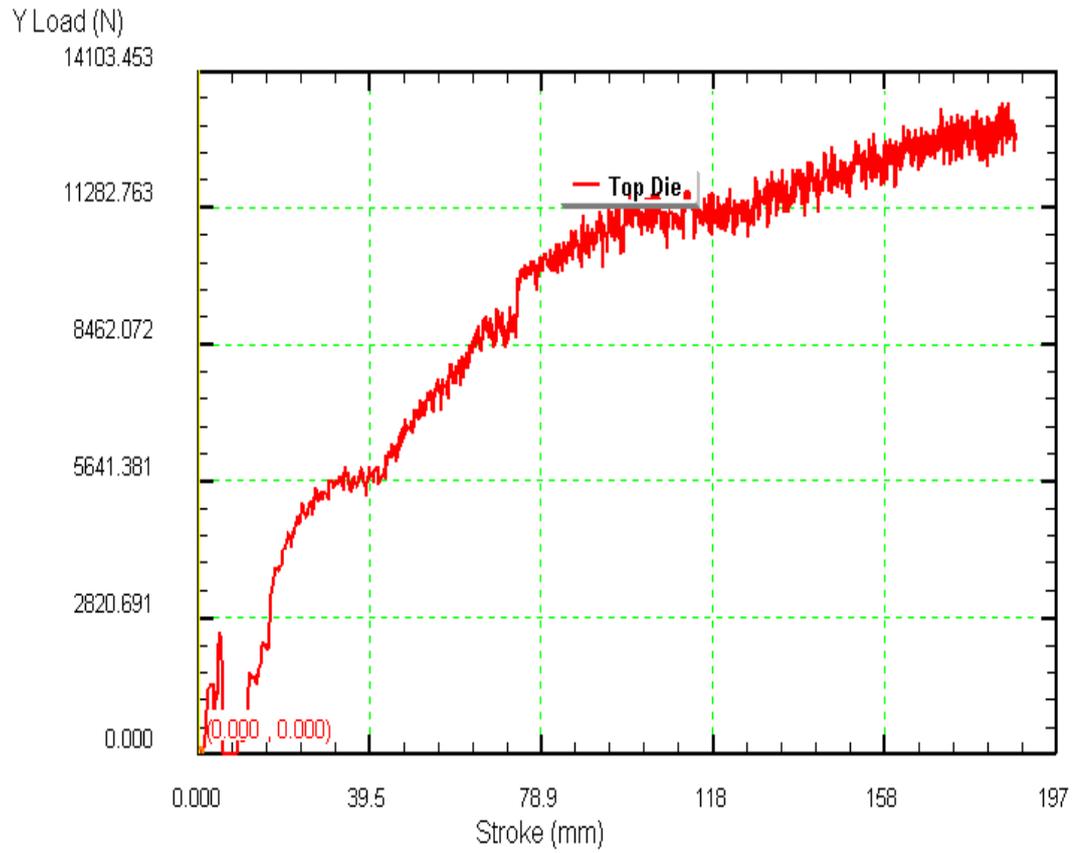


Рис.22. Изменение радиальной силы накатывания в зависимости от перемещения подвижной плашки

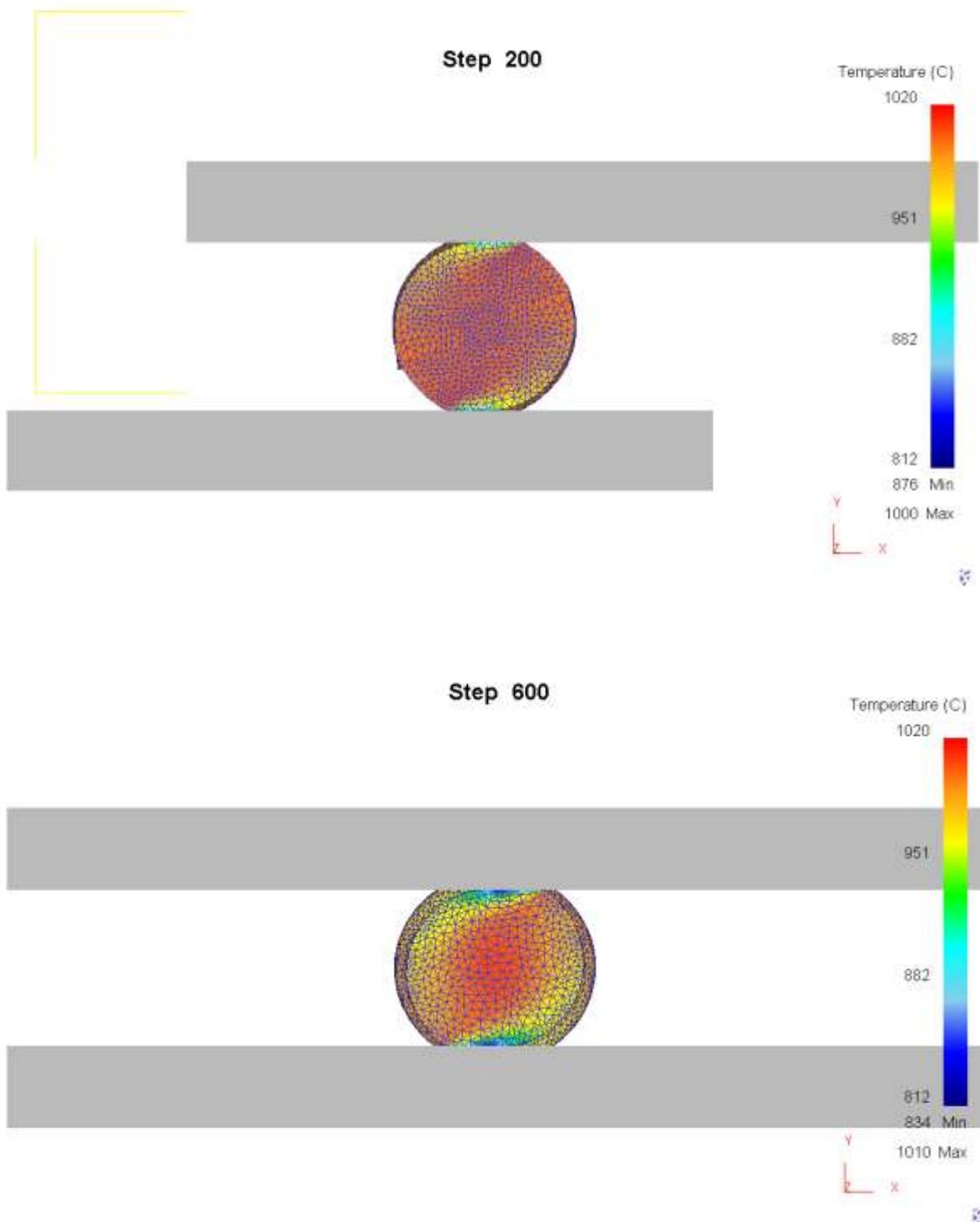


Рис.23. Изменение температуры заготовки в процессе накатывания

На рис. 16 (а-е) представлено положение инструмента и заготовки на отдельных этапах деформирования и поля распределения интенсивности деформаций в накатываемой заготовке

На рис.17 (а-г) показаны поля интенсивности напряжений в плоскости, перпендикулярной оси заготовки, на различных этапах накатки резьбы .

На рис.18 показаны осевые напряжения  $\sigma_z$  в накатываемой заготовке. Картина напряжений свидетельствует о том, что в осевой зоне накатываемой заготовки возникают растягивающие напряжения, которые при определенных условиях могут привести к возникновению дефектов в центральной части заготовки в виде рыхлости и пустот. Подобные данные известны из исследований процессов поперечно-клиновой прокатки [40-41].

На рис.19. показано изменение формы заготовки при накатке одного выступа на отдельных этапах.

На рис.20. представлено изменение тангенциальной силы накатывания (силы, действующей на верхнюю подвижную плашку) в процессе формирования выступа резьбы на отдельных этапах деформирования.

На рис. 21 показано изменение тангенциальной силы накатывания от перемещения верхней подвижной плашки

На рис.22 показано изменение радиальной силы накатывания в зависимости от перемещения подвижной плашки.

Изменение температуры заготовки в процессе накатывания представлено на рис.23.

### Выводы по разделу 1.3.

1. Используя программный комплекс «DEFORM-3D», выполнено компьютерное моделирование процесса накатки резьбы на путевых шурупах. При этом рассматривался процесс формирования на цилиндрической поверхности заготовки кольцевых выступов, профиль которых соответствует профилю резьбы путевого шурупа, поперечной прокаткой с помощью инст-

румента в виде подвижной и неподвижной плашек.

2. На основании выполненных расчетов определены основные параметры напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе накатки, радиальная и тангенциальная силы, действующие на подвижную плашку, изменение температуры заготовки в процессе накатывания.

3. Полученная информация о тангенциальных силах накатывания будет использована в дальнейшем в качестве исходных данных при разработке рекомендаций по определению мощности привода и расчете деталей привода резьбонакатных станков.

4. Информация о радиальных силах накатывания будет использована в рамках выполнения данной работы при разработке методики прогнозирования точности накатанной резьбы.

## **1.4. Экспериментальные исследования процессов накатки резьбы.**

### **1.4.1. Исследование влияния диаметра под накатку и температуры нагрева на качество резьбы**

Предварительный расчет диаметра под накатку из условия равенства объемов, вытесняемых из впадин в выступы, показал, что диаметр исходной заготовки составляет 21,2 мм. Однако, проведенные эксперименты показали, что при таком диаметре металл не заполняет выступы резьбы и происходит недооформление выступов (высота выступов  $\approx 4$  мм, наружный диаметр  $\approx 23$  мм) и резьба не соответствует требованиям нормативно-технической документации (НТД) в части наружного диаметра.

Проведена серия экспериментов по поиску рационального диаметра под накатку. У образцов изменялся диаметр участка под накатку при неизменных длине заготовки ( $L_{заг.} - 160$  мм), длине редуцированной части ( $L_{ред.} - 95$  мм) и температуре нагрева  $t=1100$  °С. Результаты замеров приведены в таблице 6.

Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что наилучшие результаты получены при значениях диаметра под накатку  $d_n = 21,5- 21,6$ мм, внутренний и наружные диаметры накатанной резьбы при этом соответствует регламентированным НТД значениям.

Проведены экспериментальные исследования влияния температуры нагрева на качество накатанной резьбы. Исходные заготовки с диаметром под накатку  $d_n = 21,6$  мм при длине заготовки  $L_{заг.} = 160$  мм нагревались до температур 1000 °С и 1100 °С и накатывались на трехроликовом станке. Контроль температуры осуществлялся оптическим пирометром. Результаты экспериментов представлены таблице 7.

Таблица 6.

## Результаты экспериментов по выбору диаметра под накатку

Диаметр под накатку $d_n=22$ мм.					
№ образца	1	2	3	4	5
$d_{внутр.}$ , мм (15 +0,5)	15,6	16,1	16,1	16,0	16,0
$d_{нар.}$ , мм (24 +0,5)	24,6	24,5	24,4	24,5	24,6
L, мм (195 +5)	203	196	196	198	204
Диаметр под накатку $d_n=21,8$ мм.					
№ образца	1	2	3	4	5
$d_{вн.}$ , мм	16,0	16,0	15,8	15,8	16,0
$d_{нар.}$ , мм	24,3	24,4	24,7	24,5	24,5
L, мм	196	197	198	200	203
Диаметр под накатку $d_n = 21,7$ мм.					
№ образца	1	2	3	4	5
$d_{вн.}$ , мм	16,0	16,0	15,8	16,0	15,7

днар. , мм	24,5	24,3	24,5	24,5	24,0
L, мм	200	202	201	203	200
Диаметр под накатку $d_n = 21,6$ мм.					
№ образца	1	2	3	4	5
двн. , мм	15,5	15,5	15,6	15,5	15,5
днар. , мм	24,3	24,1	24,0	24,1	24,3
L, мм	196	197	195	196	198
Диаметр под накатку $d_n = 21,5$ мм.					
№ образца	1	2	3	4	5
двн., мм	15,5	15,0	15,5	15,0	15,3
днар., мм	24,0	24,1	24,2	24,1	24,2
L, мм	196	195	197	195	196

Таблица 7.

Результаты экспериментов по накатке резьбы при различных температурах

Температура нагрева 1000 °С						
№ образца	1	2	3	4	5	Среднее значение
L, мм	194,5	194,5	195	195	195	194,8
L, мм	194,5	194,5	195	195	195	194,8
Вытяжка, мм	41	41	42	42	42	41,8
Температура нагрева 1100 °С						
№ образца	1	2	3	4	5	Среднее значение
L, мм	196	196	197	196	196	196,2
Вытяжка, мм	42	43	44	44	44	43,6

Анализ результатов экспериментов показал, что внутренний и наружный диаметры резьбы соответствуют требованиям НТД. При неизменных диаметре под накатку и длине заготовки повышение температуры нагрева под накатку на 100°С увеличивает вытяжку изделия при накатке в среднем на 1,8мм.

#### **1.4.2. Исследование причин образования брака по внутренним дефектам**

Нормативные документы на путевые шурупы (ГОСТ 809-71 и ТУ 1293-165-01124323-2005) предусматривают испытание на изгиб при контроле качества и приемке готовой продукции. С целью получения высококачественной продукции с отсутствием дефектов исследовали влияние марочного состава стали и температурно-временных режимов накатки резьбы на качество готовых изделий.

Нормативной документацией на путевые шурупы предусмотрено применение для их производства низкоуглеродистых спокойных и кипящих сталей (Ст.3, Ст.10, Ст.10кп, Ст.20, Ст.20кп).

Ранее изготовление шурупов осуществлялось практически из всех вышеперечисленных марок стали. Отметим, что сталь марки Ст.3 применяется исключительно для горячей штамповки заготовок путевых шурупов, которая в настоящее время в ОАО «ММК-МЕТИЗ» не производится.

Из литературных источников и производственного опыта известно, что низкоуглеродистые кипящие стали находят широкое применение для холодной штамповки изделий, а спокойные - и для холодного, и для горячего пластического деформирования.

Проведены исследования двух партий шурупов, которые разрушились в процессах испытаний и эксплуатации.

По результатам проведенного химического анализа установлено, что марка стали образцов шурупов первой партии соответствовала стали Ст.20кп по ГОСТ 10702-78. Микроисследование проводили на продольных образцах, вырезанных из резьбовой части и гладкой части стержней шурупов. Резуль-

таты исследования микроструктуры приведены в табл.8.

Таблица 8.

### Результаты исследования структуры

№ образца	Резьбовая часть стержня		Гладкая часть стержня	
	микроструктура ГОСТ 8233 ГОСТ 5640	номер зерна ГОСТ 5639	микроструктура ГОСТ 8233 ГОСТ 5640	номер зерна ГОСТ 5639
1	В осевой части: феррит, перлит, видманштетт 3 балла Край: феррит, перлит	В осевой части: 4 Край: 7	Феррит, перлит	7
2	В осевой части: феррит, перлит, видманштетт 3 балла Край: феррит, перлит	В осевой части: 4 Край: 6 – 7	Феррит, перлит	7
3	В осевой части: феррит, перлит, видманштетт 3 балла Край: феррит, перлит	В осевой части: 4 Край: 7	Феррит, перлит	7
4	В осевой части: феррит, перлит, видманштетт 3 балла Край: феррит, перлит	В осевой части: 4 – 5 Край: 7	Феррит, перлит	7

Из приведенных в табл.4.3 данных видно, что по оси резьбовой части стержня обнаружена структура перегрева - видманштетт 3 балла и крупное зерно 4-5 баллов (рис.24).



Рис.24. Структура перегрева в резьбовой части путевого шурупа из стали марки 20кп (видманштетт 3 балла)

Видманштеттовская структура характеризуется тем, что избыточный феррит выделяется в виде длинных пластин (игл), прорезывающих зерна перлита. Такая структура образуется в результате перегрева стали выше точ-

ки Ar<sub>3</sub>. Металл с такой структурой характеризуется низкими механическими свойствами, крупнозернистостью, при приложении нагрузки происходит крупнокристаллический излом по границам зерен. Наблюдается в основном в литых сталях с пониженным содержанием углерода.

Установлено, что при изготовлении данной партии шурупов происходило застревание заготовок в щелевом индукторе с завышением времени нагрева, что и явилось причиной возникновения дефектов в осевой части стержня.

При исследовании второй забракованной партии путевых шурупов (стали марок Ст.10кп и Ст.20кп) были обнаружены дефекты металлургического производства: раскатанные газовые пузыри и неметаллические включения как внутри, так и снаружи изделий, что и явилось причиной их поломок.

При накатке упорной шурупной резьбы тремя накатными роликами в осевой зоне стержня возникает схема объемного напряженного состояния всестороннего растяжения, а также происходит вытяжка металла в осевом направлении, вызывающая дополнительные радиальные растягивающие напряжения.

Исследования макро и микроструктур резьбовой части стержня шурупов показали, что в центральной части имеется зона ярко выраженной пластической деформации, являющейся причиной осевой утяжки металла.

В результате в центре стержня при наличии неблагоприятных факторов (структура перегрева, наличие металлургических дефектов) может произойти разрушение материала в виде трещин, микропор и т.д. Данные дефекты обуславливают склонность к осевому разрушению стержня шурупа при эксплуатации.

Установлено, что осевая утяжка в центральной части стержня накатываемых шурупов зависит от нескольких факторов: степени деформации, применяемой марки стали (желательно с меньшим содержанием углерода), от наличия в исходной заготовке дефектов металлургического происхождения. В связи с тем, что степень деформации определяется геометрическими размерами стержня шурупа до и после накатки, которые регламентированы нормативной и технологической документацией ( $\epsilon = 54\%$ ), а все применяемые стали - низкоуглеродистые, то основным определяющим фактором в данном случае является качество исходного горячекатаного проката. Предпочтительно использовать стали по ГОСТ 10702-78, который регламентирует более жесткие технические требования по наличию дефектов.

#### **1.4.3. Исследование влияния поверхностных дефектов на качество резьбы**

На основании анализа кинематики процесса накатки, проведенного в разделе 2 данного отчета, установлено, что в процессе накатки крупной резьбы тремя роликами наблюдается значительное проскальзывание инструмента относительно деформируемого металла. В некоторых случаях (наличие поверхностных дефектов, обезуглероженного слоя и т.п.) проскальзывание инструмента приводит к образованию дефектов в виде отслоений на поверхности сформированной резьбы.

С целью выявления причин образования отслоений проведена серия экспериментов. В частности, моделировалось влияние поверхностных дефектов заготовки в виде рисок и поверхностных трещин на качество накатанной резьбы. Создавалась искусственная риска, которая наносилась на образующую цилиндрической поверхности проредуцированного под накатку участка заготовки с помощью резца на строгальном станке. Горячую накатку заго-

товки с риской осуществляли на трехроликовом резьбонакатном станке (фирма ORT, Италия). Анализ результатов экспериментов (рис.25) показал:

1. Наличие риски способствует образованию отслоений на накатанной резьбе.

2. В процессе накатки резьбовой участок подвергается существенно-му закручиванию.



Рис.25. Резьба путевого шурупа, сформированная из заготовки с искусственной риской на проредуцированном участке

Используя инструментальный микроскоп, проведены соответствующие замеры и расчеты, которые позволили определить характер изменения угла закручивания по длине резьбовой части (рис.26).



Рис.26. Изменение угла закручивания по длине резьбовой части (отсчет ведется от гладкого участка путевого шурупа)

Таким образом, экспериментально установлено, что наличие поверхностных дефектов виде рисок и поверхностных трещин способствует образованию отслоений на поверхности накатанной резьбы. В процессе горячей накатки резьбы путевых шурупов тремя роликами происходит закручивание накатываемого участка, причем угол закручивания на каждом шаге резьбы составляет  $\approx 43...47^\circ$ .

#### Выводы по разделу 1.4.

1. На основании проведенных экспериментов установлено, что наилучшие результаты получены при значениях диаметра заготовки под накатку в пределах 21,5- 21,6 мм и температуре нагрева в диапазоне 1000 - 1100 °С качество резьбы соответствует требованиям нормативно-технической документации.

2. Наличие поверхностных дефектов виде рисок и поверхностных трещин способствует образованию отслоений на поверхности накатанной резьбы.

3. В процессе горячей накатки резьбы путевых шурупов тремя роликами происходит закручивание накатываемого участка. Угол закручивания на каждом шаге резьбы (12,5 мм) составляет  $\approx 43...47^\circ$ .

## **Заключение**

1. На основании анализа патентно-информационных материалов и производственного опыта ОАО «Магнитогорский метизно-калибровочный завод «ММК-МЕТИЗ» установлено:

- при формировании резьбы накаткой происходит локальное проскальзывание резьбоформирующего инструмента относительно отдельных зон деформируемой заготовки, что зачастую (особенно при накатке крупной резьбы) приводит к образованию поверхностных дефектов в виде задиров и отслоений на отдельных участках накатанной резьбы;

- в процессе накатки резьбы в некоторых случаях в зонах, примыкающих к оси заготовки, возникают растягивающие напряжения, которые вызывают образование рыхлостей и пустот, что снижает качество изделий;

- в результате колебаний конструктивно-технологических параметров (размеры исходных заготовок, механические свойства применяемых сталей, условия трения, температура и т.п.) изменяются усилия в системе «станок-инструмент-заготовка», что вызывает колебания размеров накатанных резьб и может привести к образованию брака, из-за выхода внутреннего и наружного диаметров за пределы регламентированных допусков.

2. На основании анализа кинематики процесса резьбоформирования при использовании трех наиболее распространенных способа накатывания (цилиндрическими роликами, плоскими плашками и инструментом «ролик-сегмент») установлены зависимости, позволяющие определять проскальзывание инструмента относительно заготовки в зонах впадины и выступа резьбы. Анализ результатов расчетов показал, что минимальная скорость проскальзывания заготовки относительно инструмента имеет место при планетарной накатке резьбы с использованием инструмента «ролик-сегмент». При

накатке путевых шурупов плоскими плашками этот параметр возрастает на 13...17 %, а при накатке цилиндрическими роликами - в 2,5...3,5 раза.

3. Используя программный комплекс «DEFORM-3D», выполнено компьютерное моделирование процесса накатки резьбы на путевых шурупах. При этом рассматривался процесс формирования на цилиндрической поверхности заготовки кольцевых выступов, профиль которых соответствует профилю резьбы путевого шурупа, поперечной прокаткой с помощью инструмента в виде подвижной и неподвижной плашек. На основании выполненных расчетов определены основные параметры напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе накатки, радиальная и тангенциальная силы, действующие на подвижную плашку, изменение температуры заготовки в процессе накатывания.

4. Проведены экспериментальные исследования процесса горячей накатки резьбы на путевых шурупах, на основании которых установлено:

- при использовании заготовки с диаметром под накатку в пределах 21,5- 21,6 мм и температуре нагрева в диапазоне 1000 - 1100 °С качество резьбы соответствует требованиям нормативно-технической документации;

- наличие поверхностных дефектов виде рисок и поверхностных трещин способствует образованию отслоений на поверхности накатанной резьбы;

- процесс горячей накатки резьбы путевых шурупов тремя роликами сопровождается закручивание накатываемого участка на угол  $\approx 43^\circ \dots 47^\circ$  на каждом шаге резьбы.

## Список использованных источников

1. *Писаревский М.И.* Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев. - Л.: Машиностроение, 1973. - 200 с.
2. *Миропольский Ю.А., Луговой Э.П.* Накатывание резьб и профилей. - М.: Машиностроение, 1976. - 175 с.
3. *Фрумин Ю.Л.* Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1977. - 183 с.
4. *Apel H.* Gewindewalzen. Carl Hanser Verlag. - München, 1952.
5. *Näser W., Meichsner H.* Technologie des Gewindewalzens. - Leipzig Fachbuchverlag, 1959.
6. *Montag G, König D.* Kraft, Arbeit und Machinengrundzeit beim Gewindewalzen zwei Rollen im Einstechverfahren // Fertigungstechnik und Betrieb. – 1965. - N 4. - S. 227-230.
7. *Forres T.* The Cold Rolling of Spline Shafts // Australian Machinery and Production Engineering. - October, 1966.
8. *Ямамото А., Акаси К, Есимото И.* Усилие накатывания и расчет межцентрового расстояния накатных роликов // Перевод ВИНТИ № 52847/5. Статья из журнала «Никой кикай гаккай ромбунсю». – 1960. - № 166. - С. 813 – 826.
9. *Jamamoto A.* Investigations on thread rolling // Bulletin of the Tokyo Institute of Technology. – 1959. - N 2. - Ser. B. - P. 27-34.
10. *Jamamoto A., Joshimoto I.* Investigations on thread rolling // Bulletin of the Tokyo Institute of Technology. – 1961. - N 40. - P. 141-145.
11. *Dallas D. B.* Getting the most of thread rolling attachments // The Tool and Manufacturing engineer. – 1966. - Apr. - P. 170-173.
12. *Губин А.П.* Накатывание резьбы роликами. - М.: Машгиз, 1947.
13. *Загурский В.И.* Исследование процесса накатывания наружных резьб с продольной подачей: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. М.,

Институт машиноведения АН СССР, 1959.

14. *Загурский В.И.* Прогрессивные способы обработки резьбы. - М.: Машгиз, 1960. - 125 с.
15. *Загурский В.И.* Автоматизированное производство резьбовых крепежных изделий. - М.: Машгиз, 1962. - 121 с.
16. *Дейнеко В.Г.* Новые способы непрерывного накатывания резьбы и других профилей. - М.: Машгиз, 1961. - 159 с.
17. *Писаревский М.И.* Накатывание точных резьб: Автореф. дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. ЛПИ им. М. И. Калинина, 1954
18. *Писаревский М.И.* Накатывание точных резьб и шлицев. - М.-Л.: Машгиз, 1963. - 180 с.
19. *Писаревский М.И.* Новый инструмент для накатывания резьб и шлицев. - М.- Л.: Машиностроение, 1966. - 152 с.
20. *Писаревский М.И., Самсонов В.И.* Новое в технологии накатывания резьб, шлицев и зубьев. - ЛДНТП, 1978. - 20 с.
21. *Миропольский Ю.А.* Исследование прессов-автоматов для объемной штамповки. - М.: Машиностроение, 1968. - 155 с.
22. *Миропольский Ю.А., Луговой Э.П., Дмитриенко В.Д.* Экспериментальные исследования резьбонакатного автомата модели А2522 с ролик-сегментом // Кузнечно-штамповочное производство. – 1974. - № 5. - С. 27-29.
23. *Миропольский Ю.А., Насонов А.Н.* Технология и оборудование для накатывания резьб и профилей // Кузнечно-прессовое машиностроение. - Серия С.-Ш., М., НИИМАШ. - 1971. - 175 с.
24. *Якухин В.Г.* Оптимальная технология изготовления резьб. - М.: Машиностроение, 1985.- 184 с.
25. *Якухин В.Г., Ставров В.А.* Изготовление резьбы: Справочник.- М.: Машиностроение, 1989.- 192 с.
26. *Грудов А.А., Комаров П.Н.* Силы при накатывании резьб // Станки и инструмент. – 1981. - №1. - С.19-21.

27. *Усов В.П.* Кинематика пластического течения металла при деформировании резьбового профиля. // Кузнечно-штамповочное производство. – 1977. - №9. - С.16.
28. *Андреев А.М., Журавлев А.З., Луговой Э.П.* Графоаналитический метод определения радиальных усилий накатки резьбы // Кузнечно-штамповочное производство. – 1979. - №11. - С.7-9.
29. Stiffness and deflection analysis of complex structures / *Turner L.J., Clough R.W., Martin H.C., Topp L.J.* // J. Aeronaut Sci., 1956, v. 23, № 9, p. 805-824.
- 30.** *Zienkiewicz, O. C., Taylor R. L.* The Finite Element Method (4th ed.) Vol. 1. Basic Formulation and Linear Problems (1989), Vol. 2. Solid and Fluid Mechanics, Dynamics, and Nonlinearity (1991) McGraw-Hill Book Co., London.
- 31.** *Bathe, K. J.* Finite Element Procedures, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
- 32.** *Hughes, T. J.* The Finite Element Method—Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1987.
- 33.** *Cook, R. D., D. S. Malkus, and M. E. Plesha.* Concepts and Applications of Finite Element Analysis (3rd ed.), John Wiley & Sons, New York, NY, 1989.
34. *Зенкевич О.К.* Метод конечных элементов в технике - М.: Мир, 1975. С. 541.
35. *Сегерлинд Л.Д.* Применение метода конечных элементов.- М.: Мир, 1979. С. 240.
36. *Андреюк Л.В., Тюленев Г.Г.* Об учете упрочнения стали при дробной деформации / Сталь, 1969, № 5. С. 245-249.
37. *Остапенко А.Л., Забира Л.А.* Сопротивление деформации стали при прокатке и методики его расчета / Бюлл. ин-та «Черметинформация», 2009,

№3. С. 54-79.

38. *Качанов Л.М.* Основы теории пластичности.- М.:Наука. 1969. С.420.

39. *Колмогоров.В.Л.* Механика обработки металлов давлением.- М.:  
Металлургия, 1986. С. 688.

40. *Тетерин П.К.* Теория поперечно-винтовой прокатки. М.: Метал-  
лургия, 1971. С.367.

41. *Щукин В.Я., Кожевников Г.В., Рудович А.О.* Новое в поперечно-кли-  
новой прокатке / Кузнечно-штамповочное производство, 1999, № 3. С.35-37.

42. *Железков О.С., Железков С.О.* Совершенствование конструкции ин-  
струмента для накатки резьбы на путевых шурупах / Сталь, № 3, 2009. С. 88.

43. Оценка эффективности процессов пластического формоизменения  
по критерию минимальной неравномерности деформации / *О.С. Железков,  
Е.Ю. Чуйко, Ф.Ф. Гатин, С.О. Железков* // Кузнечно-штамповочное произ-  
водство. Обработка металлов давлением. 2009. № 5. С. 31-34.

44. Применение критерия минимальной неравномерности деформации  
для оценки эффективности процессов обработки металлов давлением / *О.С.  
Железков, Ф.Ф. Гатин, Е.Ю. Чуйко, С.О. Железков* // Вестник МГТУ им.  
Г.И.Носова. 2009. № 1. С. 46-48.