

На правах рукописи

Трусковский Виктор Иванович

**РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ  
ПРОИЗВОДСТВА ЗАГОТОВОК ОБРАБОТКОЙ ДАВЛЕНИЕМ  
НА ОСНОВЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДОВ АНАЛИЗА НДС,  
СОЗДАНИЯ НОВЫХ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ**

Специальность 05.02.09 – Технология и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Магнитогорск – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО Южно-Уральский государственный университет (НИУ) г. Челябинск

Научный консультант – Шеркунов Виктор Георгиевич,  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: Демин Виктор Алексеевич,  
доктор технических наук, профессор  
Московский государственный  
индустриальный университет;

Колмогоров Герман Леонидович,  
доктор технических наук, профессор,  
Пермский национальный исследова-  
тельский политехнический университет;

Яковлев Сергей Сергеевич,  
доктор технических наук, профессор,  
Тульский государственный университет.

Ведущая организация – Сибирский Федеральный университет,  
институт цветных металлов  
и материаловедения, г. Красноярск.

Защита состоится 27 марта 2014 г., в 15.00 часов, на заседании диссертационного совета Д212.111.03 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова» по адресу: 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», 455000, г. Магнитогорск, пр. Ленина, 38, МГТУ

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2014 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Жиркин Ю.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Создание и развитие новых способов и устройств для получения заготовок обработкой давлением из плоского композиционного и сортового проката, особенно в условиях многономенклатурного мелкосерийного и серийного производства определяется необходимостью снижения производственных затрат и повышения качества готовой продукции, сокращения расхода материалов и уменьшения энергоемкости процессов.

Существующие технологии и оборудование, используемые при производстве заготовок абразивных кругов отличает высокая материалоемкость и трудоемкость операций. Получаемые заготовки имеют завышенные допуски на геометрические размеры. Изготовлению высоких заготовок для шлифовальных и полировальных кругов сопутствуют потери их сплошности, разноплотность, а для отрезных кругов разнотолщинность, искажение геометрической формы, наличие больших заусенцев, что становится причиной не только снижения эксплуатационных характеристик, но и возникновения достаточно большого брака. Указанные проблемы объясняются недостаточным научно-техническим обеспечением процессов обработки давлением абразивно-вулканитовых композиций.

В области получения мерных заготовок из сортового проката круглого сечения диаметром до 100 мм перспективно создание компактных ножниц, обладающих универсальностью, простотой и надежностью конструкции с не высокой металло- и энергоемкостью.

Анализ современного состояния заготовительного производства показал, что вопросы изучения и исследования прессовых операций, разработки новых прогрессивных способов и устройств для получения заготовок из плоского композиционного и сортового проката являются актуальными.

**Объект исследования** – способы и устройства для получения заготовок из плоского композиционного и круглого металлического проката обработкой давлением.

**Предмет исследования** – процессы, технологическая оснастка и оборудование для получения сплошных и полых цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций и круглого металлического проката обработкой давлением.

**Цель работы** – развитие теории и практики производства заготовок из плоского композиционного и сортового проката на основе математического моделирования напряженно-деформированного состояния и экспериментального исследования процессов обработки материалов давлением, создания и промышленного внедрения, эффективных научно-обоснованных технологий, инструмента и оборудования.

**Задачи исследования**, направленные на достижение поставленной цели:

1. Выполнить анализ существующего состояния производства заготовок методами обработки материалов давлением, установить степень изученности процессов;

2. Разработать более совершенные алгоритмы анализа напряженного и деформированного состояний с использованием вариационных принципов на основе нетрадиционных функционалов;

3. Разработать математические модели основных процессов формования заготовок для абразивных кругов и на их основе создать научно-обоснованные ресурсосберегающие технологии;

4. Создать гамму патентозащищенных способов и устройств для получения заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке из композиционного плоского проката, мерных заготовок из сортового металлического проката и сплавов, устройств для измерения и контроля технологических усилий;

5. Разработать, исследовать и внедрить в производство научно-обоснованные технологии с использованием новых способов и устройств.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

- Новые математические модели и алгоритмы расчета напряженного и деформированного состояния для различных вариантов прессования сплошных и полых цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций, позволяющие создавать и реализовывать на практике научно-обоснованные и наиболее эффективные технологические процессы, обеспечивающие получение качественных шлифовальных, полировальных и отрезных абразивных кругов на вулканитовой связке.

- Численная оценка параметров НДС и интегральных характеристик процесса деформации абразивно-вулканитовых композиций.

- Методика конструирования непрерывного и дифференцируемого по всему объему деформируемого тела поля скоростей для случая сложных граничных условий.

- Обоснование параметров устройства для резки сортового проката с тангенциальным движением инструмента.

#### **Научная новизна работы:**

1. Разработанные математические модели и алгоритмы на основе нетрадиционных функционалов позволившие получить полную информацию об основных показателях НДС для различных вариантов деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок, установить взаимосвязь НДС с условиями деформации.

2. Впервые данная численная оценка параметров НДС и интегральных характеристик процессов деформации абразивно-вулканитовых композиций, позволившая определить рациональные значения силовых, кинематических, геометрических и текстурных параметров для обработки давлением сплошных цилиндрических и кольцевых заготовок, а также теоретически обосновать наиболее

неблагоприятные с точки зрения вероятности нарушения сплошности участки деформируемой заготовки.

3. Разработанный дискретно-локальный вариант минимизации невязок при удовлетворении переопределенной системы соответствующих уравнений, который может быть классифицирован как новый метод приближенного определения полей скоростей и напряжений, позволяющий сократить время расчета и повысить стабильность расчетной процедуры.

4. Разработанная методика конструирования непрерывного и дифференцируемого по всему объему деформируемого тела поля скоростей, позволяющая определять напряженное и деформированное состояние цилиндрической заготовки при закрытом прессовании.

5. Получены новые знания в области разделения сортового проката плоскими клиновыми ножами с тангенциальным движением, необходимые для обоснованного назначения исполнительных размеров инструмента и конструкции исполнительного механизма ножниц, обеспечивающих их универсальность и стабильность процесса резки.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Разработаны новые способы и устройства для производства абразивного инструмента на вулканитовой связке, защищенные 35 патентами РФ на изобретения. Экономический эффект от внедрения разработок составил более 85 млн. руб. в ценах 2009 года за счет предотвращения большого количества безвозвратного брака, расширения номенклатуры выпускаемого инструмента, сокращения энергозатрат, предотвращения непроизводительного расхода исходных материалов, уменьшения потребностей в механической обработке.

2. Создана новая более экономичная, быстропереналаживаемая конструкция ножниц для резки проката круглого сечения, отличающаяся простотой устройства, эксплуатации и обслуживания, обеспечивающая получение качественных мерных заготовок. Технические решения защищены 2 авторскими свидетельствами и 12 патентами РФ на изобретения и полезные модели.

3. Разработано новое устройство для измерения технологических усилий и предотвращения преждевременных поломок, вызванных перегрузками. Экономический эффект за счет сокращения простоев, вызванных внеплановыми ремонтами и затрат на их проведение составил 230 руб. на 1 тонну продукции.

4. Полученные научные знания позволяют обоснованно проектировать новые, и совершенствовать существующие технологии получения заготовок из плоского композиционного и сортового металлического проката.

5. Теоретические положения о способах деформации, результаты экспериментальных исследований новых разработок позволяют дать углубленные и более широкие знания при обучении и подготовке специалистов в области обработки материалов давлением.

### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Разработанные математические модели определения наряду деформированного состояния при осадке абразивно-вулканитовых заготовок, позволяют создавать новые и совершенствовать существующие технологии производства абразивного инструмента. Полученная численная оценка параметров напряженно-деформированного состояния и интегральных характеристик процесса деформации абразивно-вулканитовых композиций позволяет определить рациональные значения силовых, кинематических, геометрических и текстурных параметров для обработки давлением. Реализуемость в производстве предложенных новых способов и устройств для получения заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке из композиционного плоского проката, мерных заготовок из металлургического проката и сплавов, устройств для измерения и контроля технологических усилий, с достижением реального экономического эффекта.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается корректной постановкой задач, использованием основополагающих законов механики сплошной среды и теории обработки материалов давлением, использованием современных методов экспериментальных исследований и методик обработки данных, полученных опытным путем. апробация разработанных возможных алгоритмов определения НДС на основе не традиционных функционалов, которые показали возможность их практического использования. Результаты расчетов имеют удовлетворительную сходимость с экспериментально полученными данными. Приведенные в диссертации выводы и рекомендации теоретически и экспериментально обоснованы.

### **Реализация работы.**

Конструкторско-технологические разработки внедрены в ЗАО «Уральская кузница», г. Чебаркуль (Челябинская область); ЗАО «Росси», г. Челябинск.

### **Апробация работы.**

Работа обсуждалась на научно-технических семинарах кафедры М и ТОМД Южно-Уральского государственного университета, объединенном семинаре кафедры Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. Основные результаты исследований и конструкторско-технологических разработок доложены на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях: «Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века», г. Магнитогорск, 1996 г.; «Совершенствованию процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства», г. Нижний Новгород 1997 г.; «Современные технологии в машиностроении», г. Пенза, 1997 г.; «Проблемы пластичности в технологии», г. Орел, 1998 г.; «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы», г. Волжский, 2002 г.; «Научно-технический прогресс в металлургии», г. Темиртау, Республика Казахстан в 2003 и 2011 г. г.; «Прогрессивные методы и

технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением», г. С-Петербург, 2005 г.; «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов», г. С-Петербург, 2005 г.; «Кузнецы Урала 2005», г. Екатеринбург, 2005 г.; «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», г. Екатеринбург, 2013 г., на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (1990 – 2013 гг.).

**Публикации.** Результаты работы изложены 74 печатных работах. Из них 16 научных публикаций в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, в трех монографиях, одном учебном пособии, допущенном Министерством образования и науки, в 2-х авторских свидетельствах и 47 патентах.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов, заключения, приложений и изложена на 262 страницах текста, содержит 111 рисунков, 2 таблицы и список использованных литературных источников из 215 наименований.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность проблемы совершенствования способов и устройств для получения заготовок из сортового и плоского проката, повышения их качества и снижения себестоимости, сокращения расхода материалов и энергии, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна и практическая значимость полученных результатов, представлена структура диссертации и основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрено современное состояние теории и практики в области получения заготовок обработкой материалов давлением.

Выполнен анализ известных способов и устройств для получения заготовок из абразивно-вулканиковых композиций, а также металлов и сплавов обработкой давлением.

Результаты анализа свидетельствуют, что при всем многообразии известных способов получения мерных заготовок из сортового проката приоритетным остается способ резки сдвигом отрезаемой части металла относительно другой за счет приложения к указанным частям равных, но противоположных по знаку усилий.

Значительный вклад в создание и развитие теории, технологии и оборудования по безотходному разделению сортового проката внесли отечественные ученые Е.А.Попов, К.Н.Богоявленский, А.З.Журавлев, П.Е.Кислый, В.Г.Кононенко, В.Т.Мещерин, В.П.Романовский, В.А.Ско-роход, С.С.Соловцов, В.А.Тимощенко, Е.М.Третьяков и др.

Преимущества и недостатки, технические возможности, диапазон применения тех или иных схем резки сдвигом, оценивались с использованием классификации, составленной на основе траектории

смещения разделяемых частей относительно друг друга и степени ограничения перемещения металла в процессе разделения.

Применительно к процессам разделения сортового проката за счет поступательного перемещения разделяемых частей в двух направлениях с одновременным вращением установлено, что они являются новыми, практически не изученными и не исследованными.

Существующие на сегодняшний день технологии получения заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке из плоского композиционного проката обработкой давлением, основаны на использовании оснастки и оборудования, заимствованных из резинотехнической промышленности, которые не соответствуют особенностям абразивного производства.

Имеющиеся научно-практические исследования процессов обработки давлением в этой области связаны с изучением реологии абразивно-вулканитовых композиций, процессов прокатки листовых заготовок и процесса смещения – приготовления абразивно-вулканитовой композиции в валковых смесителях. Значительный вклад в изучение, исследование и совершенствование этих процессов внесли работы В.А.Рыбакова, В.В.Авакяна, А.С.Гуревича, В.Н. Бакуля и др.

Разделительные и формообразующие процессы, лежащие в основе технологий получения заготовок для отрезных, шлифовальных и полировальных кругов на вулканитовой связке теоретически и экспериментально остаются еще недостаточно изученными и исследованными.

**Вторая глава** посвящена разработке алгоритмов на основе не традиционных функционалов для определения НДС в заготовках, получаемых посредством формообразующих операций обработки материалов давлением.

При определении НДС деформируемого материала приоритет отдается вариационным методам.

В основе известных вариационных принципов лежат функционалы, представляющие на кинематически возможных скоростях и (или) статически допустимых напряжениях невязку при удовлетворении основного энергетического уравнения (базового функционала). Процедура минимизации функционалов на основе вариационных уравнений представляет собой определение варьируемых параметров, обеспечивающих удовлетворение основного энергетического уравнения с минимальной ошибкой. В результате достигается приближенное решение.

В связи с тем, что традиционные функционалы представляют по своей сути некоторую невязку в результате неудовлетворения каких-либо уравнений из состава замкнутой системы, в работе предложено несколько вариантов алгоритмов определения НДС на основе минимизации нетрадиционных функционалов, представляющих невязки при удовлетворении тех конкретных уравнений, которые не удалось удовлетворить при разработке математической модели.



Приведем в качестве примеров некоторые из них.

В одном из предлагаемых алгоритмов решение задачи сводится к минимизации функционала невязки при удовлетворении физических уравнений, использование которых при определении компонентов девиатора напряжений не обеспечивает их удовлетворение в целом

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V [T(r, z, a_k) - T(r, z, \beta_k)]^2 dV \rightarrow \min,$$

где  $a_k$  – неизвестные параметры функциональных рядов для напряжений;

$\beta_k$  – неизвестные параметры функциональных рядов для скоростей;

$T(r, z, a_k)$  – интенсивность касательных напряжений, определяемая на основе статически допустимых напряжений;

$T(r, z, \beta_k)$  – интенсивность касательных напряжений, определяемая на основе кинематически возможного поля скоростей и определяющего физического уравнения;

Другой вариант, в отличие от предыдущего, предусматривает из физических уравнений определение касательных и нормальных напряжений с точностью до гидростатического давления.

НДС, определенное по рассматриваемому алгоритму, будет точно удовлетворять всем уравнениям кроме дифференциальных уравнений равновесия. Последнее удовлетворяется приближенно, причем на среднем интегральном уровне, когда в целом обеспечивается равновесие тела, а дифференциальные уравнения равновесия в произвольных точках тела не выполняются. В рассматриваемом случае физические уравнения удовлетворяются точно, в том числе и на локальном уровне.

Предложен алгоритм, позволяющий снять трудности при прогнозировании напряженного состояния, вызванные тем, что напряжения определяются не функциями скоростей, а их частными производными.

Результат решения задачи в этом варианте алгоритма будет точно удовлетворять дифференциальным уравнениям равновесия, физическим уравнениям и статическим граничным условиям.

При сложной геометрии деформируемого объема в некоторых случаях может оказаться эффективным требование к функциональным рядам ограничить выполнением граничных условий, а условие несжимаемости удовлетворять приближенно на основе минимизации следующего функционала невязки

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V \xi_{ii}(r, z, a_k, \beta_k)^2 dV \rightarrow \min.$$

Минимизация данного функционала в общем случае будет осуществляться совместно с минимизацией каких-либо других функционалов, представленных в предыдущих вариантах.

Для решения математических проблем, связанных с минимизацией нетрадиционных функционалов предлагается, как вариант, поэтапная минимизация невязок, суть которой заключается в поэтапном удовлетворении равенства частных производных: часть параметров может быть определена на первом этапе минимизацией функционала невязки при удовлетворении равенства частных производных, например, второго порядка на втором этапе – минимизацией функционала невязки при удовлетворении равенства, например, смешанных производных и т.д., а на заключительном этапе оставшиеся параметры могут быть найдены минимизацией функционала невязки при удовлетворении равенства непосредственно самих функций.

Для решения проблем, обусловленных неквадратичностью функционалов, предложен дискретно-локальный метод минимизации невязок.

Современные программные средства компьютерной математики обеспечивают возможность приближенного решения переопределенных систем уравнений (число уравнений больше числа неизвестных). Имеется возможность замены процедуры интегрирования и минимизации функционалов решением конечного числа (превышающего число неизвестных) алгебраических уравнений, представляющих невязки при удовлетворении соответствующих уравнений в конкретных точках деформируемого тела. Для этого область деформирования разбивается равномерной прямоугольной сеткой. Для каждого узла сетки записывается уравнение невязки, например, при удовлетворении физического уравнения. В результате получаем систему уравнений вида

$$T(r_i, z_j, a_k) - T(r_i, z_i, \beta_k) = 0,$$

где  $r_i$  и  $z_i$  – координаты узловых точек.

Эффективность предлагаемого приближенного метода может быть оценена непосредственным расчетом невязок в произвольных, не совпадающих с узловыми, точками тела после нахождения коэффициентов.

Проверка возможных алгоритмов определения НДС осуществлялась на примере осадки сплошной цилиндрической заготовки в условиях прилипания на контакте с инструментом и образованием бочки, которая в зависимости от условий деформации может быть как одинарной, так и двойной (рис. 1). Материал заготовки характеризуется не линейно вязкими свойствами.

При оценке алгоритмов учитывали точность результатов решения, время расчета и стабильность вычислительной процедуры. Точность результатов оценивалась величиной невязок удовлетворения замкнутой системы уравнений и граничных условий.

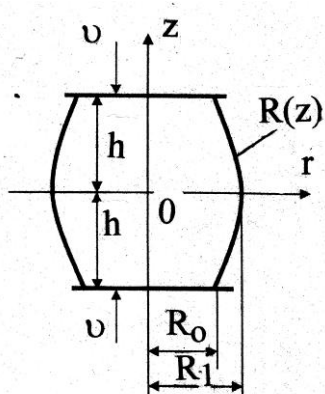


Рис. 1. Схема осадки цилиндрической заготовки

**Третья глава** посвящена математическому моделированию и анализу напряженного и деформированного состояний процессов осадки сплошных и полых цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых смесей.

В основу математических моделей и алгоритмов положен описанный в предыдущей главе вариант алгоритма с минимизацией невязок при удовлетворении переопределенной системы уравнений, отвечающий за выполнение граничных условий.

Напряжения задавались с помощью функций  $\varphi(r, z, a)$ , которая представляла полином 9-й степени по аргументам  $r$  и  $z$ . Связь между коэффициентами полинома находилась методом неопределенных коэффициентов на основе удовлетворения бигармонического уравнения.

При заданных напряжениях из физических уравнений определяли компоненты тензора скоростей деформаций. Из геометрических уравнений находили скорости перемещения с точностью до неизвестных функций  $f(z)$  и  $f(r)$ , которые были определены из условия симметрии деформации. В итоге было получено поле напряжений и поле скоростей, включающие семь неизвестных коэффициентов.

Таким образом, на этапе задания поля напряжений и поля скоростей были удовлетворены точно дифференциальные уравнения равновесия, условие совместности скоростей деформаций, физические и геометрические уравнения. Не были удовлетворены граничные условия для скоростей  $v_r$  при  $z \pm h$  и  $v_z = \pm h$ , а также условие на свободном контуре для напряжений. Задача свелась к нахождению семи коэффициентов  $a_j$ , при которых наилучшим образом удовлетворялись бы указанные выше граничные условия.

Минимизация функционала была заменена дискретно-локальной минимизацией невязок при удовлетворении переопределенной системы алгебраических уравнений.

**НДС сплошной цилиндрической заготовки.** Получена полная информация о напряженном и деформированном состоянии сплошных цилиндрических заготовок при открытой осадке в условиях прилипания на контакте с инструментом, фрагменты которой представлены на рисунках.

Под относительным нормальным напряжением (рис. 1) следует понимать отношение фактического напряжения к среднему нормальному напряжению, которое имело бы место при однородной деформации.

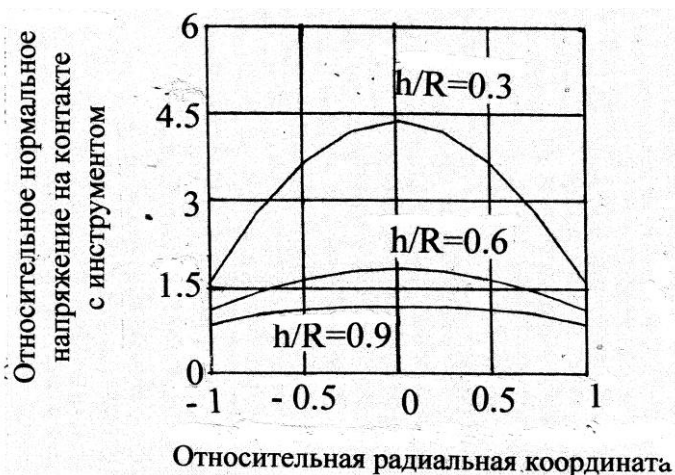


Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений на контакте с инструментом

отношения их высотных и радиальных размеров. Кинематику течения материальных частиц при наличии прилипания характеризует векторное поле (рис. 4).

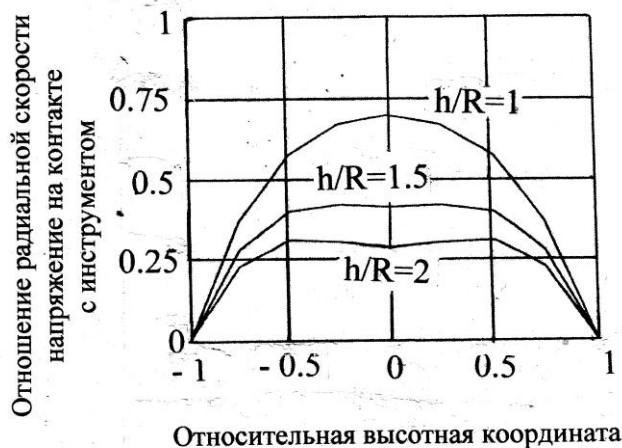


Рис. 3. К анализу формоизменения при осадке сплошного цилиндра

(по модулю) не высокое значение по сравнению с другими участками заготовки. Это обстоятельство свидетельствует о повышенной вероятности разрушения материала заготовки на указанном выше участке. Опыт производства высоких заготовок для абразивных кругов на вулканитовой связке подтверждает этот вывод.

**НДС полой цилиндрической заготовки при осадке с оправкой.** В основу определения НДС положен тот же алгоритм и та же функция напряжений, что и при осадке сплошной цилиндрической заготовки (предыдущий параграф). Отличие состояло в том, что вместо условия  $v_r = 0$  при  $r = 0$  принято  $v_r = 0$  при  $r = r_0$  ( $r_0$  – радиус оправки).

Под относительным нормальным напряжением (рис. 2) следует понимать отношение фактического напряжения к среднему нормальному напряжению, которое имело бы место при однородной деформации.

Качественный характер полученных зависимостей не противоречит существующим. Рис. 3 подтверждает известные положения о характере бочкообразования при сжатии цилиндров в зависимости от

На основании полученных карт линий уровня основных показателей напряженного и деформированного состояния для четверти заготовки было установлено, что независимо от отношения размеров цилиндра наибольшее значение интенсивности скоростей деформаций сдвига имеет место на центральном участке бокового контура. Вместе с тем на указанном участке среднее нормальное напряжение  $\sigma$  имеет



Рис. 4. Векторное поле скоростей перемещения материальных частиц при осадке сплошного цилиндра в условиях прилипания на контакте с инструментом ( $h/R = 0,5$ )

ражения трения невязка при удовлетворении условия (1) снижается, экспоненциально приближаясь к нулю.



Рис. 5. Характер изменения касательных напряжений на контакте с оправкой ( $h/R_0=0,3$ ;  $r_0/R_0=0,5$ )

Напряжения трения на контакте с оправкой учитывались на средне интегральном уровне

$$\frac{1}{h_0} \int_0^h \sigma_{rz}(r_0, z) dz = -\tau, \quad (1)$$

где  $\tau$  — среднее напряжение трения на контакте с оправкой.

Этим условием дополнили переопределенную систему уравнений.

На рис. 5, 6 представлены фрагменты результатов расчета. Анализ показал, что с увеличением среднего значения напряжения трения невязка при удовлетворении условия (1) снижается,

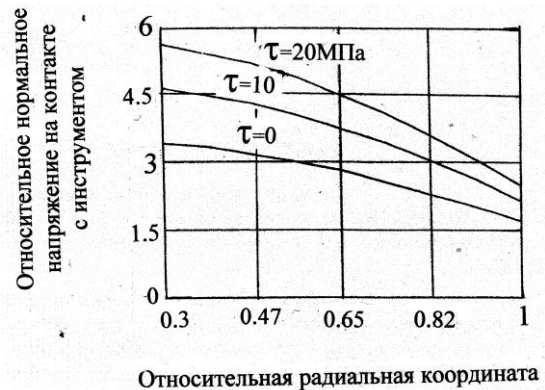


Рис. 6. Эпюры нормальных касательных напряжений при осадке полого цилиндра с оправкой ( $h/R_0=0,3$ ;  $r_0/R_0=0,5$ )

**НДС полой цилиндрической заготовке при осадке в пресс-форме.** Принципиальная схема процесса показана на рис.7. На контакте с пресс-формой действуют напряжения трения  $\tau$ , средние значения которых известны. Функция  $f(z)$  в выражении для скорости  $v_r$  определялась для условия  $v_r = 0$  при  $r = R_k$ . Контур  $R(z)$  полагали заданным.

Вместо условия (1) систему уравнений дополнили условием равенства средне интегрального значения касательного напряжения на контакте с контейнером заданному среднему значению напряжения трения.

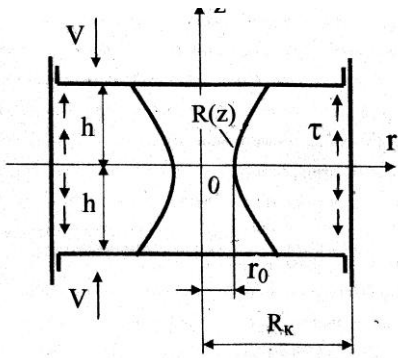


Рис.7. Схема осадки полой цилиндрической заготовки в пресс-форме

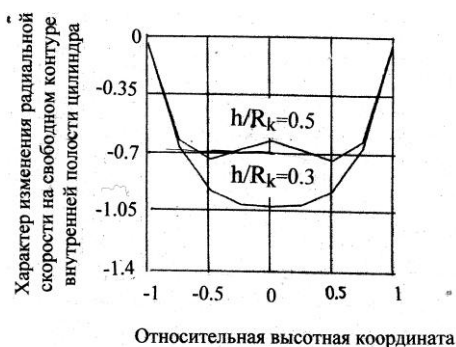


Рис. 8. К анализу формоизменения свободного контура внутренней полости ( $\tau = 20$  МПа;  $r_0/R_k = 0,5$ )

Анализ невязок при удовлетворении статических и кинематических граничных условий, как и в предыдущих задачах, показал приемлемую точность расчетов.

Фрагменты результатов расчета НДС представлены на рис. 8–10. На конечной стадии прессования например, сплошного цилиндра появляется контакт деформируемого цилиндра с контейнером (рис.10), в результате чего на поле скоростей и напряжений накладываются дополнительные ограничения.

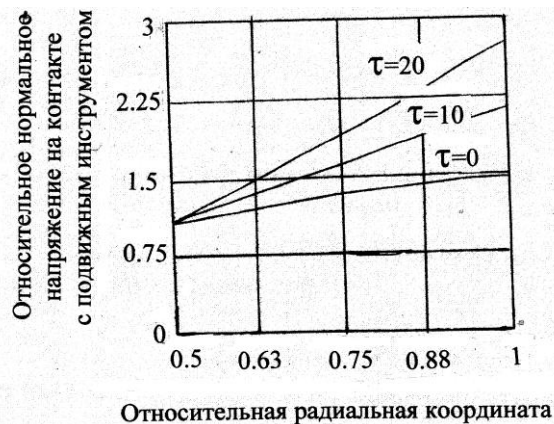


Рис. 9. Эпюры нормальных напряжений на контакте с подвижным инструментом ( $h/R_k = 0,3$ ;  $r_0/R_k = 0,5$ )

В этом случае задача конструирования функциональных рядов для искомых параметров существенно усложняется, особенно для несжимаемого материала.

Традиционно в подобных ситуациях используют разрывные решения. При этом в пределах отдельных блоков поля скоростей задаются обычно линейными зависимостями. По границам блоков обеспечивают непрерывность лишь нормальной составляющей поля скоростей. Для остальных составляющих поля скоростей, а также их частных производных (скоростей деформаций) по границам блоков допускается разрыв. Понятно, что при указанных допущениях нельзя получить удовлетворительные результаты по полю скоростей требуется стыковка на границах блоков всех составляющих поля скоростей и их частных производных по всем аргументам. Столь жесткие требования объясняются тем, что напряжения пропорциональны частным производным функций скоростей по независимым аргументам системы координат. Следует также иметь в виду, что разрывные варианты решения допускаются не для всех в реологическом отношении сред.

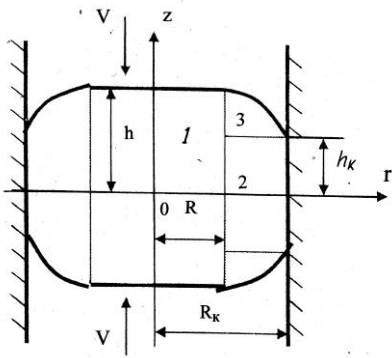


Рис.10. Принципиальная схема допрессовки

При разработке нетрадиционной методики конструирования непрерывных полей скоростей и напряжений, в том числе и по производным требуемого порядка, в задачах со сложными граничными условиями, когда традиционно используют разрывные решения, были положены приемы, используемые для интерполяции функции, заданной в ряде точек. Кривая образуется путем создания ряда кубических полиномов, проходящих через наборы из

трех смежных точек. Кубические полиномы затем состыкуются друг с другом, чтобы образовать единую непрерывную и дифференцируемую кривую. При этом линейные полиномы обеспечат стыковку лишь самих функций, квадратные – стыковку функций и первых производных, а кубические – функций, первых и вторых производных. Эти положения и были использованы для описания полей скоростей и напряжений в задачах со сложными граничными условиями.

Как и в разрывных решениях, область деформации разбивалась на блоки с характерными для каждого блока граничными условиями (рис.10). Для одного из блоков с наиболее четко выраженными граничными условиями с точностью до варьируемых параметров задавалось поле скоростей, удовлетворяющее граничным условиям.

Для других блоков, имеющих общие границы, задаются частные производные составляющих поля скоростей по одной из координат функциональными рядами с неизвестными функциями от другой координаты, например

$$\xi_{2rr}(r, z) = \frac{dV_{2r}}{dr} = f_1(z) + f_2(z) \cdot r^2 + \dots$$

Из условия непрерывности частных производных на границе блоков определялась часть функций, затем компоненты поля скоростей, после чего из условия равенства соответствующих скоростей по границам блоков находили еще ряд функций.

В блоке 1 (рис. 10) поле скоростей описывали зависимостями

$$V_{1r}(r, z, a_1, a_2, a_3) = V \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \left( a_1 \frac{r}{R} + a_2 \frac{r^3}{R^3} + a_3 \frac{r^5}{R^5} \right),$$

$$V_{1z}(r, z, b_1, b_2, b_3) = V \left( 1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \left( b_1 \frac{r}{R} + b_2 \frac{r^2}{R^2} + b_3 \frac{r^4}{R^4} \right),$$

удовлетворяющими граничным условиям.

На основе предложенной выше методики получили непрерывное и дифференцируемое поле скоростей для всего объема деформируемого тела с точностью до 6-ти неизвестных коэффициентов.

Из физических уравнений для сжимаемого материала находили напряжения  $\sigma_{ij}(r, z, a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3)$ . Параметры  $a_i$  и  $b_i$  определяли, минимизируя невязки при удовлетворении равенства нулю нормального напряжения на свободном от нагрузок контуре контуре  $R(z)$ , блока 3 и при удовлетворении дифференциальных уравнений равновесия. При этом использовали дискретно-локальный вариант минимизации. Система уравнений, представляющих невязки при удовлетворении указанных выше условий, включала 46 уравнений, записанных для узловых точек деформируемого тела.

На рис. 11 в качестве примера показан характер изменения скоростей течения материала вдоль радиальной координаты ( $z = 0.1h$ ). На границе 1-го и 2-го блоков (вертикальная линия) скорости и их производные, как следует из рисунка равны.

Рис. 12 характеризует нормальные напряжения на контакте с пресс-формой. Наиболее нагруженным является центральный участок пресс-формы.

Рис. 13 показывает характер распределения касательных напряжений на контакте с пресс-формой, являющихся по существу напряжениями трения покоя. Величина напряжений значительно ниже напряжений трения скольжения, что оправдывает взятое за основу условие прилипания на контакте с пресс-формой.

Интенсивность касательных напряжений при допрессовке распределена по объему заготовки крайне неравномерно. Анализ показал, что с точки зрения вероятности разрушения (расслоения) при допрессовке в неблагоприятном напряженном и деформированном состояниях находятся участки заготовки, прилегающие к боковому контуру.

Все это необходимо знать для качественного анализа причин расслоения и для разработки режимов деформации, которые бы снизили либо полностью исключили вероятность расслоения.

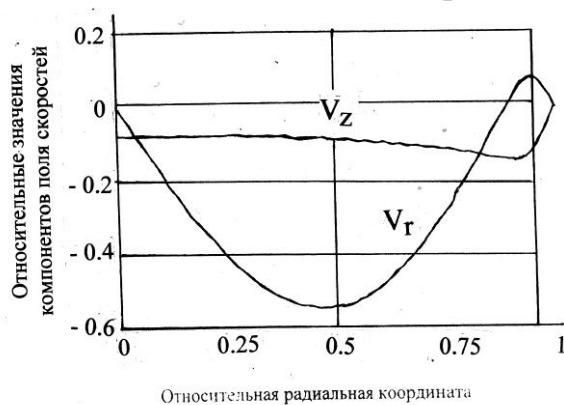


Рис. 11. Иллюстрация непрерывности поля скоростей по границе блоков

**К алгоритму расчета конечного формоизменения.** При обработке многослойной заготовки необходима информация о геометрии и расположении межслойных границ после обработки.

В результате перехода материала с бокового контура на контакт с инструментом межслойные границы могут также выйти на контакт



с инструментом (рис. 14). Все это необходимо знать для качественного анализа причин расслоения и для разработки режимов деформации, которые бы снизили либо полностью исключили вероятность расслоения.

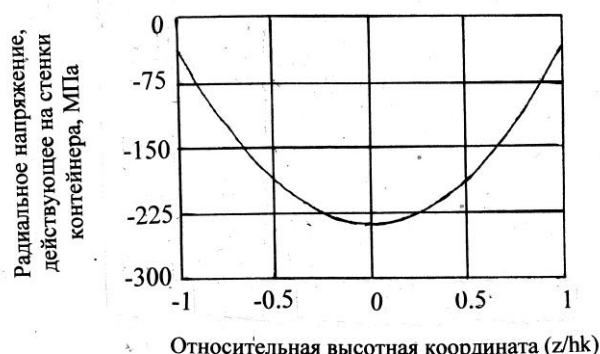


Рис. 12. К анализу напряженного состояния при допрессовке сплошного цилиндра



Рис. 13. К анализу напряженного состояния при допрессовке сплошного цилиндра

При конструировании координатных функций для скоростей в задачах, предусматривающих анализ конечного формоизменения, важно, чтобы поле скоростей позволяло описать переход материала со свободного контура под инструмент.

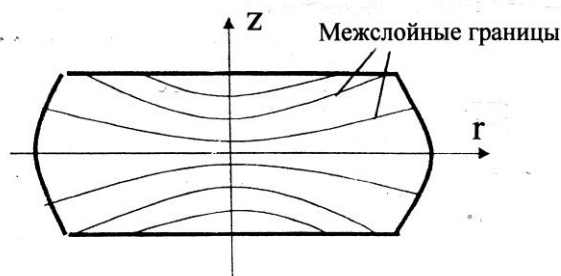


Рис. 14. К анализу механизма формирования контактной поверхности

Для реализации расчета параметров формоизменения на следующем этапе деформации принимали  $R_{oj} = R_{oj+1}$ ,  $R_{1j} = R_{1j+1}$ .

Для определения геометрии заготовки в произвольный момент деформации использовалась пошаговая процедура расчета.

Процесс деформации разбивался на  $n$  этапов, в рамках которых абсолютная высотная деформация составляла

$$\delta t = \frac{\delta h}{v},$$

где  $\Delta h = h_0 - h_1$  – абсолютная высотная деформация, необходимая для получения заданной конечной высоты заготовки  $h_1$ .

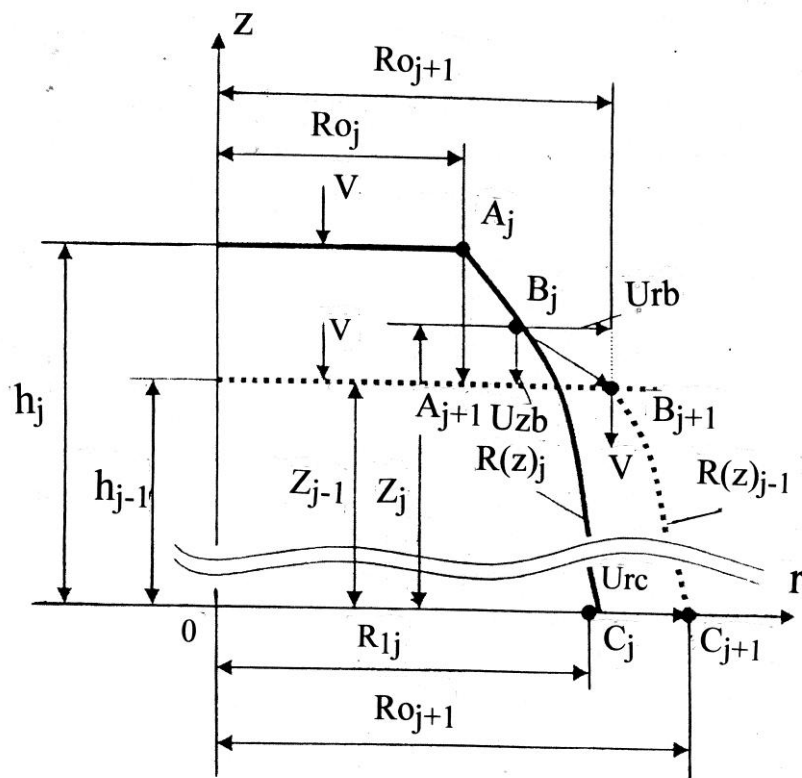


Рис. 15. К анализу формирования контактной поверхности и бокового контура

На каждом этапе определялось поле скоростей и напряжений, после чего осуществлялась коррекция параметров свободного контура  $R(z)$  и контактной поверхности  $R_0$  (рис. 15). Таким образом, получали информацию для реализации расчета параметров следующего этапа деформации.

**В четвертой главе** представлены разработки новых способов и устройств для получения заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке из плоского проката.

Существенными недостатками используемого в настоящее время процесса получения кольцевых заготовок наружными диаметрами от 80 до 500 мм и высотами от 0,6 до 53 мм, реализуемого на ножевых штампах, является наличие большого припуска, который составляет от 5 до 9 мм, и заусенцев на наружном и внутреннем диаметрах получаемой кольцевой заготовки, завышенное допусковое отклонения на высоту в пределах одной заготовки. Низкая точность получаемых кольцевых заготовок вызывает необходимость большой механической обработки. Получение бракованных заготовок связано с их недопустимой овальностью или возникновением разрывов на поверхности. Наибольший объем производства приходится на круги прямого профиля с отверстием тип 1, прямого профиля с отверстием и односторонней выточкой (тип 5), прямого профиля с отверстием и двухсторонними выточками (тип 7) и прямого профиля без отверстия (тип П) (рис. 16).

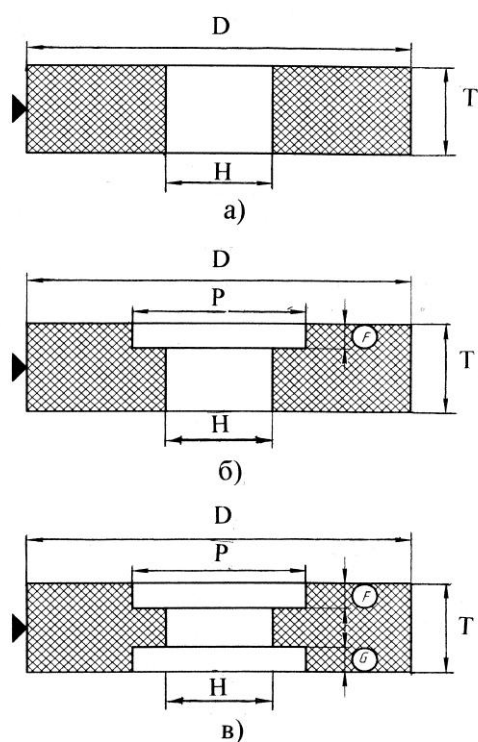


Рис.16. Круги, выпускаемые из абразивно-вулканитовых композиций по ISO 525 – 86 и ГОСТ2424 – 83 типов 1 (а), 5 (б) и 7 (в)

Отрезные круги типа 1 в России выпускаются наружным диаметром 80...500 мм и высотой 0,6...4,0 мм.

Для повышения технологической эффективности и качества производства кольцевых заготовок абразивных кругов были разработаны новые способы и устройства.

В существующих технологиях изготовления отрезных абразивных кругов с двухсторонним поднутрением с уменьшающейся высотой от периферии к центру, предусмотренных ГОСТом 21963–82 типов ПП и П высотой до 13 мм основным недостатком является высокая трудоемкость, вызванная необходимостью отдельного выполнения в разных штампах операции вырубки и формования требуемой поверхности абразивного круга.

Предложена новая конструкция штампа совмещенного действия (рис.17), обеспечивающая повышение производительности практически

в два раза при существенном сокращении себестоимости изготовления и эксплуатационных затрат в сравнении со штампами, используемыми в существующей технологии.

Разработана новая конструкция отрезного круга 1 (рис. 18) содержащего армирующий элемент 2 на высоте  $H/2$ , где  $H$  – высота круга, обладающего повышенными режущими способностями, механической прочностью и долговечностью.

Активная адсорбция воздуха и других газообразных включений на контактных поверхностях кольцевых заготовок при пакетном прессовании и герметизация воздуха в пределах объема пресс-формы в результате затекания облоя в имеющиеся зазоры становится одной из причин образования пузырчатости и расслоев в прессованных заготовках. Кроме этого, использование плоских кольцевых заготовок предопределяет наличие большой контактной поверхности формирующего инструмента и обрабатываемой заготовки, что требует создания больших давлений для преодоления сил сопротивления деформированию и сил трения с самого начала прессования.

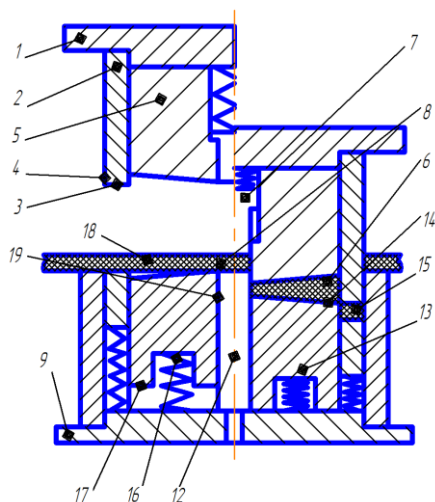


Рис. 17. Конструкция штампа совмещенного действия

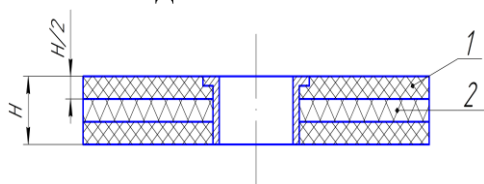


Рис. 18. Устройство нового абразивного круга

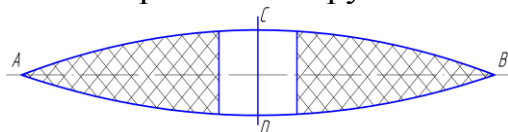


Рис. 19. Эскиз заготовки абразивного круга

Для устранения отмеченных недостатков предлагается вырубать заготовку с поперечным сечением выполненным в виде эллипса, большая ось которого  $AB = D$ , а малая ось  $CD = (1,5 \dots 2,0)H$ , где  $D$  – диаметр вырубленной заготовки,  $H$  – высота прокатанной пластины (рис. 19), для чего разработан соответствующий штамп.

Применение заготовки в виде эллипса, позволяет производить первоначальную открытую осадку пакета собранного из таких заготовок последовательно от центра к периферии, что способствует беспрепятственному вытеснению воздуха с контактных поверхностей заготовок. При этом также сводится к возможному минимуму поверхность контакта между инструментом и заготовкой круга в процессе прессования (минимальная площадь контакта в начале прессования и максимальная в конце).

Для реализации на практике результатов, полученных при теоретических и экспериментальных исследованиях процессов последовательного открытого и закрытого прессования в одной пресс-форме

высоких пакетных заготовок, были разработаны соответствующие способы и устройства.

Практически, устранить бочкообразование при осадке пакета из кольцевых заготовок, полученных из абразивно-вулканитовой массы, становится возможным за счет изменения направления вектора активных сил трения, на контактных поверхностях инструмента с пакетом. В итоге получаем повышение качества и прочности абразивного инструмента при уменьшении энергозатрат на операцию прессования, а также сокращение брака готовых изделий.

В этом направлении было разработано несколько вариантов технических решений.

Один из вариантов реализации этого направления предусматривает значительное снижение сил трения на поверхностях контакта верхней и нижней рабочих плит с прессуемым пакетом за счет установки прокладок из фторопласта – 4, имеющего коэффициент трения  $0,08 \dots 0,15$ . Исследования данного способа и полученные результаты подробно описаны в экспериментальной главе настоящей работы.

Для совмещения операций вырубки, пакетирования и прессования заготовок предложено устройство, предусматривающее оснащение его нижней формовочной плиты индивидуальным гидроприводом (рис. 20). Пресс-форма обеспечивает вырубку кольцевых заготовок 11 из листа 2 на съемной вырубной матрице 3 и последовательную подпрессовку каждой последующей вырубленной заготовки к предыдущей пока не спрессуется пакет заданной высоты. После завершения прессования снимается вставка 4, убирается съемная вырубная матрица 3, в гидроцилиндры 9 подается жидкость под давлением и осуществляется выталкивание спрессованного пакета.

Теоретический хронометраж предложенного процесса прессования показал, что время прессования может сократиться как минимум в четыре раза в сравнении с существующей технологией.

Также разработаны новые конструкции пресс-форм для получения малых абразивных камней (МАКи) из абразивно-вулканитовых порошковых композиций на пресс-автоматах.

**В пятой главе** приводятся результаты экспериментально-аналитических исследований новых процессов и оснастки для получения кольцевых полуфабрикатов и прессованных заготовок абразивных кругов прессованных заготовок абразивных кругов.

Объектом исследований стали новые разработки способов и устройств, направленные на повышение геометрической точности и механической прочности получаемых заготовок, устранение разновысотности кольцевых заготовок, расслойных дефектов и пузырчатости, возникающих при прессовании высоких абразивных кругов из многослойных кольцевых заготовок, снижение трудоемкости, улучшение условий труда, повышение качества готового абразивного инструмента.

Цель исследований – установление существующих закономерностей при выполнении разделительных и формообразующих операций необходимых для выбора обоснованных режимов обработки и назначения исполнительных размеров технологической оснастки.

Исследования проводились в лабораторных и промышленных условиях.

В результате исследований процесса получения плоских кольцевых заготовок были установлен характер и величины силового нагружения при выполнении операции высечки кольцевых заготовок ножевым штампом на пневматическом прессе. Определено влияние на качество получаемых заготовок используемого способа и конструкции штампа.

Проведенные измерения получаемых заготовок показали, что остро стоит проблема устранения разновысотности вырезаемой заготовки, которая возникает при прокатке пластин и составляет нескольких десятков долей миллиметров от номинальной высоты круга. Этого можно избежать, если ввести операцию калибровки, которую целесообразно совместить с вырубкой вместо высечки. Это предложение было использовано при

разработке штампов совмещенного действия, которые наряду с разделительными операциями включали и формообразующие при получении заготовок для высоких кругов.

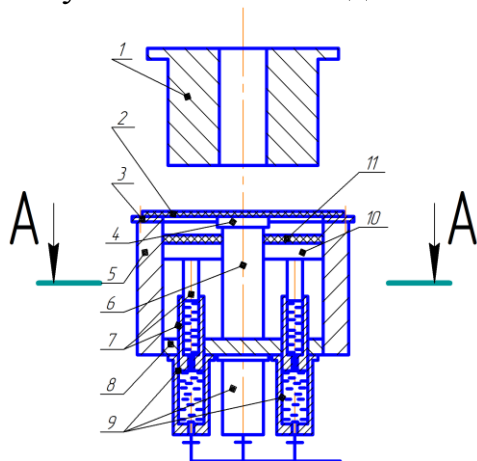


Рис. 20. Пресс-форма с гидрориводом нижней формовочной плиты в исходном положении

использованием образцов высотой ( $h_0$ )  $\approx 100$  и  $53...55$  мм, с наружным диаметром ( $d_n$ )  $\approx 155...157$  мм и  $85$  мм соответственно. Материал заготовок – абразивно-вулканитовые смеси марок СТ и ГС.

Для определения влияния контактного трения на параметры процесса осадку образцов осуществляли: между сухими гладкими стальными плитами; между стальными плитами, рабочие поверхности которых покрывались: мыльным раствором, гидрофобизирующей жидкостью, посыпались тальком; на рабочие поверхности устанавливались прокладки из фторопласта. Схема замера образцов приведена на рис. 21.

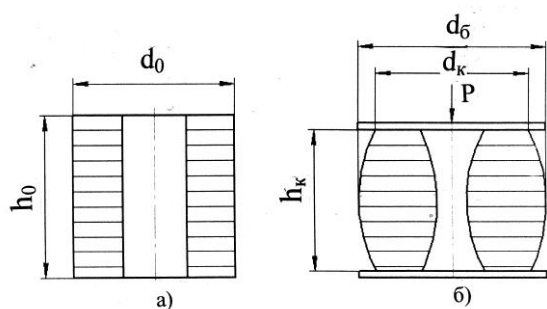


Рис. 21. Схема замера образцов: а – в исходном состоянии; б – после осадки

Исследования показали, что наибольшее бочкообразование имеет место при осадке многослойной заготовки между сухими металлическими плитами в результате неравномерности деформации по объему заготовки и наличия труднодеформируемых участков в месте контакта плит с кольцевыми заготовками (рис. 22). При этом, начиная с относительной деформации  $14...16\%$  на боковой поверхности многослойной заготовки образуются трещины, а при дальнейшем увеличении степени деформации – разрывы, которые не заживают и после окончательного прессования.

На рис. 23 четко видно труднодеформируемые зоны и то, что основная деформация происходит за счет центральных слоев заготовки, где возникающие значительные напряжения приводят к возникновению разрывов на боковой поверхности.

В существующем технологическом процессе возможности применения различных смазок резко ограничены из-за требований к чистоте и качеству поверхностей прессуемых заготовок абразивных кругов. Допущенные к применению в абразивной промышленности в качестве смазок водно-мыльный раствор и гидрофобизирующая жидкость не оказывают существенного для практики влияния на уменьшение неравномерности деформации и бочкообразования.

Наилучшие результаты имели место при осадке образцов между металлическими плитами рабочие поверхности, которых были покрыты листовым фторопластом, обладающим коэффициентом трения в пределах 0,08...0,15.

Существенное снижение коэффициента трения на контактной поверхности металлических плит и осаживаемой заготовки способствовало значительному уменьшению неравномерности деформации. Бочкообразование практически отсутствовало (рис. 24).



Рис. 22. Образец, осаженный между сухими металлическими плитами с относительной деформацией  $\delta = 15\%$

состояния рабочей поверхности плит приводит к образованию «незалечивающихся» разрывов на боковой поверхности, глубина которых превышает припуск на механическую обработку, т.е. возникает неисправимый брак.

С учетом эластических свойств прессованных полуфабрикатов абразивных кругов предлагается получать кольцевые заготовки из предварительно прокатанных пластин на вырубном штампе, у которого наружный диаметр  $D_1$  назначается равным  $(0,8...0,85)D_2$ , где  $D_2$  – внутренний диаметр пресс-формы для формования круга, а диаметр внутренней режущей кромки  $d_1 = (1+\delta_1)d_0$ , где  $\delta_1$  – коэффициент эластического восстановления диаметра отверстия;  $d_0$  – диаметр отверстия готового круга.

Такой характер формоизменения многослойной заготовки свидетельствует об однородном напряженном и деформированном состоянии прессовки. В результате представляется возможным увеличить относительную деформацию до 22...24% без нарушения сплошности боковой поверхности заготовки.

Также было установлено, что большая деформация при свободной осадке независимо от

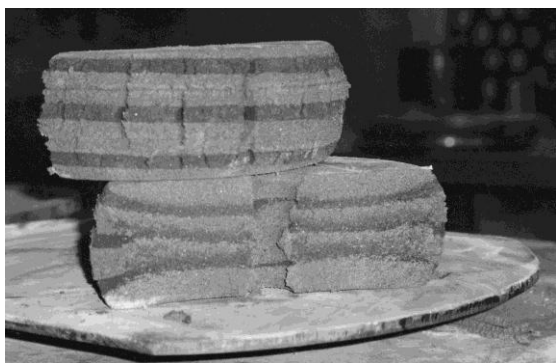


Рис. 23. Боковая поверхность с разрывами и сечение образца, осажденного между сухими металлическими плитами

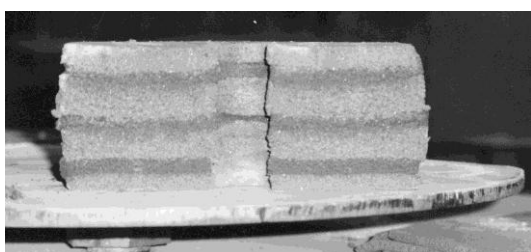


Рис. 24. Сечение образца, осажденного между металлическими плитами с покрытием из фторопласта

прессования по схеме всестороннего сжатия. Использование пресс-формы и исходной заготовки с исполнительными размерами в соответствии с приведенными выше зависимостями в сравнении с существующей технологией и конструкцией пресс-формы позволило: уменьшить неоднородность деформации по объему, улучшить равноплотность круга по высоте, снизить в среднем на 10...15% усилие прессования и на 5...7% усилие выталкивания, за счет снижения бокового давления стенки матрицы на прессовку. Это в свою очередь способствовало уменьшению касательных напряжений на границе вышедшей части заготовки из пресс-формы и находящейся в ней, которые являются одной из причин возникновения расслоев.

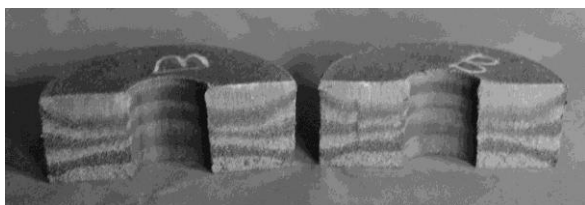


Рис.25. Прессованная заготовка в разрезе

Прессование пакета, набранного из кольцевых заготовок, необходимо осуществлять в пресс-форме с внутренним диаметром  $D_2 = D(1 - \delta)$ , где  $D$  – диаметр готового круга;  $\delta$  – коэффициент эластического восстановления круга по наружному диаметру.

Приведенные зависимости, имеющие экспериментальное подтверждение, обеспечивают получение необходимого положительного эффекта от открытой предварительной осадки многослойной заготовки в пределах объема кольца матрицы пресс-формы, исключая, при этом, зарождение брака.

На рис. 25 приведен образец в разрезе, полученный после полного цикла прессования в одной пресс-форме между формовочными плитами покрытыми фторопластом с использованием предварительной открытой осадки и окончательного

Измерения опытных кругов после вулканизации показали следующие результаты: наружный диаметр 101,1...101,4 мм; высота 34,7...36,7 мм; внутренний диаметр 20,0...20,6 мм.



В соответствии с ГОСТом готовый абразивный круг после механической обработки должен иметь следующие размеры: наружный диаметр  $100 \pm 2,0$  мм; высота 30 мм; диаметр отверстия  $20^{+0,2}$  мм (кл. А) и  $20^{+0,3}$  мм (кл.Б).

Сравнение абсолютной величины эластического восстановления кругов по высоте полученных прессованием через фторопластовые прокладки и по существующей технологии показало, что в первом случае эта величина в среднем меньше на 40%.

Достигнутое равномерное распределение деформации по объему заготовки позволило уменьшить искажение геометрической формы кругов при их эластическом восстановлении после прессования, в частности предотвратить образование выпуклости на верхней поверхности круга.

Расслои, пузырчатость и микротрещины, как после прессования, так и после вулканизации отсутствовали. Исследованный способ также показал, что время выдержки прессовки под давлением можно ограничить до 5 с и прессование осуществлять без подогрева.

На рис.26 приведен образец круга, полученный прессованием из 2-х предварительно осажённых пакетов. Перед окончательным прессованием пакеты были собраны по схеме представленной на рис. 27.

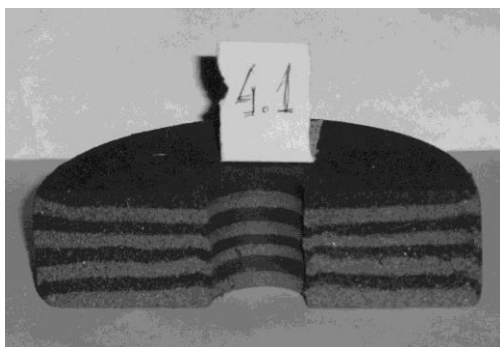


Рис. 26. Заготовка абразивного круга после прессования из двойной заготовки с переворотом

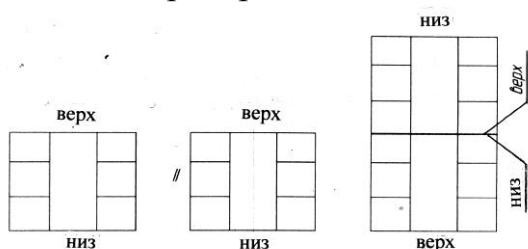


Рис. 27. Схема сборки пакета перед окончательным прессованием

Плотность по сечению такого круга находится в пределах  $2,56 \dots 2,63$  г/см<sup>3</sup>, а слои, равно как и линии контакта кольцевых заготовок, после прессования остались, практически, параллельны и одинаковой толщины. Благодаря умеренной высоте заготовок уровень нормальных напряжений на всех межслойных границах становится близким друг к другу, что обеспечивает равномерность деформации по всему объему заготовки.

Для кругов умеренной высоты повышению равномерности распределения деформации по объему заготовки, равноплотности по сечению и низкий дисбаланс круга способствует прессование и одинарной пакетной заготовки с переворотом после предварительного прессования (рис. 28).

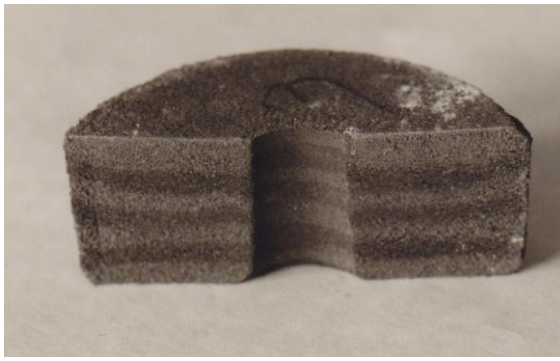


Рис. 28. Образец, полученный прессованием из одинарной пакетной заготовки по схеме: предварительное прессование – переворот на  $180^\circ$  – окончательное прессование

дефектам прессованных заготовок.

В существующей технологии одним из постоянно присутствующих дефектов, в результате неоднородного состояния прессовки и высоких эластических свойств исходной смеси, является выпуклость верхнего торца заготовки, образующаяся после прессования и вулканизации.

Следует считать, что максимум выпуклости соответствует максимальной величине нормального осевого напряжения, действующего при прессовании на поверхности контакта прессовки с верхней формовочной плитой. Устранить описанный недостаток представляется возможным путем за счет выполнения рабочей поверхности верхней формовочной плиты в виде выпуклого сегмента (рис. 29).

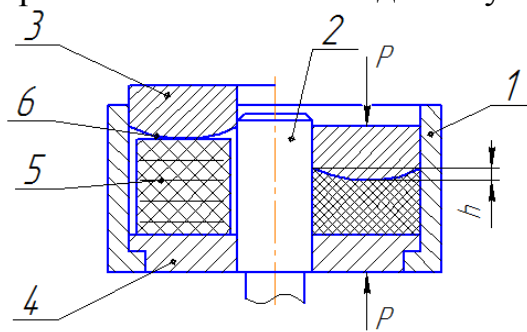


Рис. 29. Пресс-форма с сегментной верхней формовочной плитой:

1 – корпус; 2 – оправка; 3 – сегментная верхняя формовочная плита; 4 – нижняя формовочная плита; 5 – пакет из кольцевых заготовок; 6 – рабочая поверхность сегментной формовочной плиты со стрелой  $h$

Недостаток при прессовании с переворотом – снижение производительности. В процессе прессования заготовок абразивных кругов в закрытых пресс-формах на поверхностях контакта исходной заготовки с формовочными плитами, а также с боковыми поверхностями оправки и кольцевой матрицы возникают силы трения большой величины. Касательные силы трения приводят к неоднородности напряженного и деформированного состояния прессовки, появлению растягивающих напряжений и, как следствие,

В результате такого решения появляется составляющая вектора силы трения, уменьшающая вектор нормального давления. При этом уменьшается и составляющая вектора силы трения в горизонтальной плоскости. Уменьшение усилия прессования, в свою очередь, уменьшит боковое давление прессовки на кольцевую матрицу пресс-формы, облегчит выталкивание прессовки по завершению прессования.

В результате исследований были получены численные значения эластического восстановления высот проката от относительного обжатия для разных составов смесей.

Наибольшее влияние величина обжатия оказывает на относительное эластическое восстановление проката из смесей, предназначенных для мягких полировальных кругов и наименьшее для проката из смесей, предназначенных для отрезных кругов.

Из производственной практики известно, что эластическое восстановление зависит не только от состава компонентов смесей, но особенно от процентного содержания в смесях каучука и серы, от зернистости шлифовального материала, от величины относительного обжатия, температуры подогрева, времени нагружения.

Проведенные специальные исследования позволили установить зависимости эластического восстановления образцов по высоте от температуры, зернистости шлифматериала и времени выдержки под давлением.

Так, было установлено, что эластическое восстановление высоты образцов с различной зернистостью шлифматериала при одних и тех же температурах нагрева и времени выдержки под давлением практически мало отличается.

На основании полученных результатов экспериментальных исследований получена зависимость для определения необходимой величины стрелы  $h$  сегментной поверхности верхней формовочной плиты пресс-формы в зависимости от величины эластического восстановления  $\delta$  по высоте прессуемых кругов

$$h = (0,3 \dots 0,5) \delta, \text{ мм.}$$

Описанный выше способ был опробован в промышленных условиях при производстве шлифовальных кругов марки СТ (рис. 30). Из двадцати

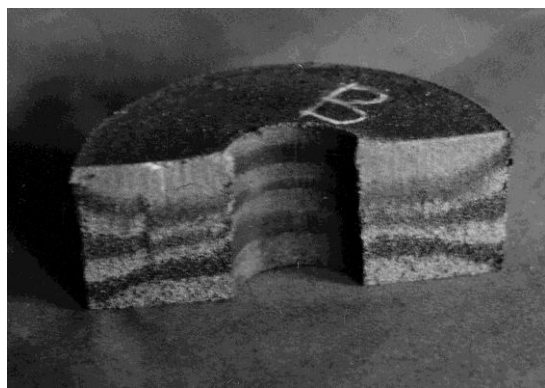


Рис. 30. Опытно-промышленный круг

полученных опытно-промышленных кругов после вулканизации на двенадцати кругах верхний торец был плоским, на восьми выпуклость верхней торцевой поверхности не превышала  $0,03 \dots 0,04$  мм. Для определения плотности полученных кругов фрагменты их серединной части разрезали на 12 кубиков и затем измеряли их плотность до, и после вулканизации.

Полученные результаты определения плотности по сечению шлифовального круга марки СТ представлены графически на рис. 31.

Из представленных результатов видно, что заготовки, изготовленные по предложенным технологиям, имеют практически равноплотную структуру.

Этому способствовало и то, что в результате развитой радиальной деформации хаотично ориентированные абразивные зерна, подчиняясь

закону наименьшего сопротивления, располагались параллельно своей длинной осью радиусу заготовки.

Для сравнения, максимальный перепад значений плотности заготовок полученных по существующей технологии после прессования составлял: по высоте не менее  $0,8 \text{ г/см}^3$ , по диаметру не менее  $0,2 \text{ г/см}^3$ . Неоднородность деформации по объему заготовки приводила к возникновению остаточных напряжений, которые явились одним из основных провоцирующих факторов возникновения расслоев.

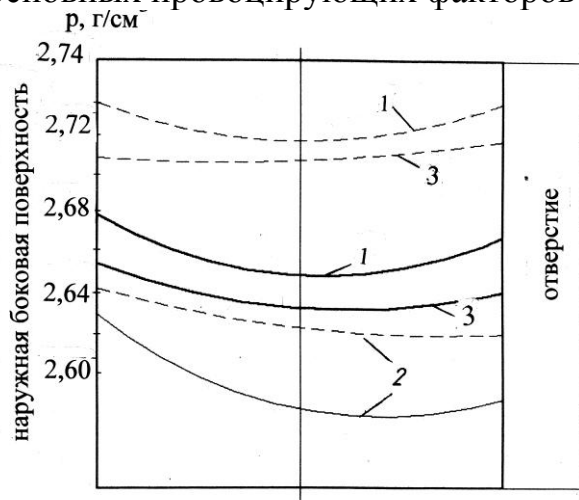


Рис. 31. Распределение плотности по сечению круга:

— до вулканизации; ---- — после вулканизации; 1, 2, 3 — верхняя, средняя и нижняя части круга, соответственно

в которой возникающие при резке распорные усилия будут взаимно уравновешиваться. Тем самым создаются более благоприятные условия нагружения, повышается жесткость инструментального узла.

В конструкции ножниц предусмотрены устройства для регулировки осевого зазора между ножами и расстояния между ними при изменении диаметра разрезаемого проката.

На рис. 34 приведены общие виды ножей. Также выполнены разработки предусматривающие совмещение разделительной и формообразующей операции в одном устройстве за счет выполнения рабочих частей ножей с соответствующим профилем.

Для механических и гидравлических прессов разработаны новые конструкции механических усилителей деформаций (рис. 35), для измерения технологических усилий. Устройства представляют собой пластины с чувствительным элементом, оснащенным тензодатчиками привариваемые к станинам прессов, которые не требуют предварительного натяга и использования промежуточных соединительных деталей и регулирующих устройств.

**Шестая глава** посвящена разработке конструкции совершенствованию ножниц с тангенциальным движением режущего инструмента, и средств измерения технологических усилий для прессового оборудования. Проведенные исследования опытно-промышленной конструкции ножниц (рис. 32) показали ее работоспособность и позволили определить пути дальнейшего развития и адаптации к производственным условиям.

Размещение ножей 1, 2 (рис. 33) в каретках 3, 4, образующих кассету, позволило создать замкнутую силовую систему,



Рис. 32. Общий вид ножниц с гидростанцией

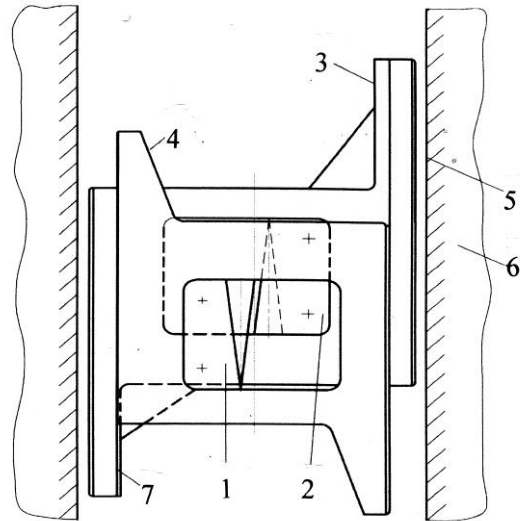


Рис. 33. Конструкция направляющих

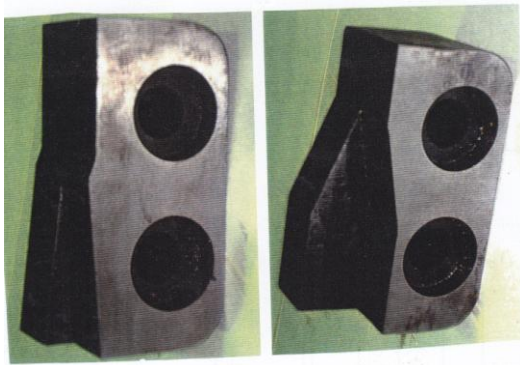


Рис. 34. Конструкции ножей с углами наклона режущих и прижимных кромок 5° (а) и 17° 40' (б)

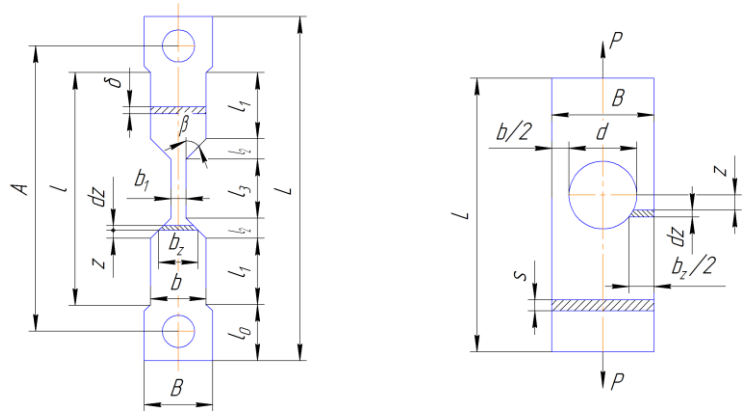


Рис. 35. Конструкции механических усилителей деформации

**В седьмой главе** приводится расчетное и экспериментальное обоснование конструктивных параметров ножниц для резки сортового проката и измерителей технологических усилий.

При разделении сортового проката на мерные заготовки за счет сдвига отрезаемой части имеет значение соотношение формы и размеров режущего инструмента и разрезаемой штанги (прутка).

Из общеизвестной зависимости по определению напряжения смятия в зоне контакта ножей была определена возможная ширина поверхности смятия проката в зоне реза

$$l_k = \frac{P}{\sigma_{см} b_n}$$

Здесь  $l_k$  – ширина поверхности смятия;  $P$  – усилие резки;  $\sigma_{см}$  – напряжение смятия;  $b_n$  – ширина ножа.

Полученные зависимости (рис. 36) показывают, что минимально возможную контактную поверхность смятия можно получить при ширине ножей в пределах 50...60 мм. Дальнейшее увеличение ширины ножей не оказывает заметного влияния на уменьшение поверхности смятия проката в зоне реза.

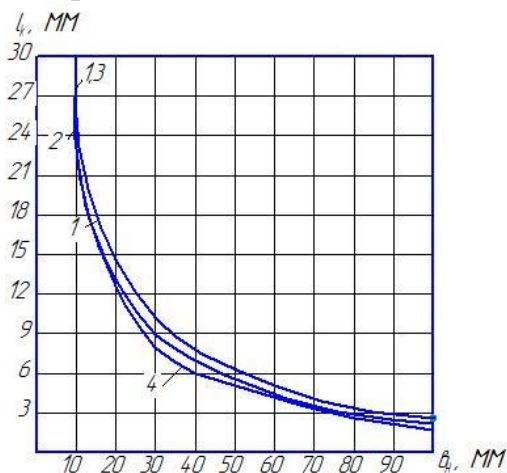


Рис. 36. К определению ширины площади контакта ножей с поверхностью разрезаемого проката из средне- и высоко углеродистых (1 – сталь 20, 2 – сталь 45, 3 – сталь 60) и легированных (4 – сталь 40ХН2МА) сталей

Согласно геометрии очага деформации (рис. 37) для исследуемой схемы вертикальное ( $h$ ) и горизонтальное ( $l_y$ ) перемещения ножей связаны между собой зависимостью

$$h = l_y \cdot \sin \alpha,$$

где  $\alpha$  – угол наклона режущей кромки ножа.

Приведенная зависимость позволяет определить величину рабочего хода ножей. Или решить обратную задачу – при заданном рабочем ходе и величине внедрения ножей в разделяемую штангу определить угол  $\alpha$ , обеспечивающий заданные параметры.

Расчетный анализ геометрии ножей показал, что, если тангенс угла наклона режущих кромок ножей и соответствующих им прижимных плоскостей будет равен  $1/\pi$  или  $17^\circ 40'$  представляется возможным осуществлять отрезку мерной заготовки при ходе каждого из ножей равным половине ее периметра без замены инструмента.

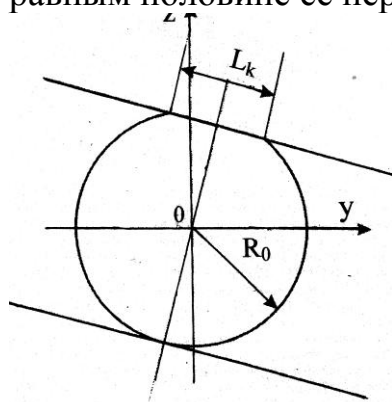


Рис. 37. Геометрия очага деформации

Сравнение результатов расчетов полученных с использованием приведенной выше формулы и по зависимости  $\operatorname{tg} \alpha = 1/\pi$  показало полное совпадение, что может свидетельствовать о достоверности описанного технического решения.

Результаты расчетов имеют экспериментальное подтверждение, полученное при разделении прутков ножами с различными углами наклона режущих и прижимных кромок ( $5^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $12^\circ$ ,  $17^\circ 40'$ ,  $22^\circ$ ,  $25^\circ$ ). Установлена величина рабочего хода ножей в зависимости от угла наклона их режущих кромок (рис. 38, 39) и кинематические

параметры режущего устройства, которые могут быть использованы при проектировании ножниц.

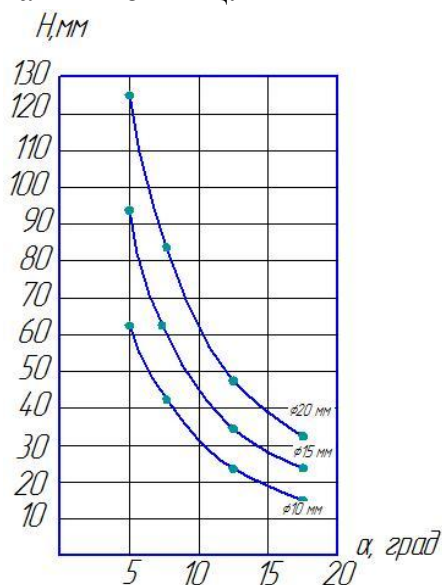


Рис. 38. Зависимости рабочего хода (Н) ножей от угла ( $\alpha$ ) наклона режущих кромок

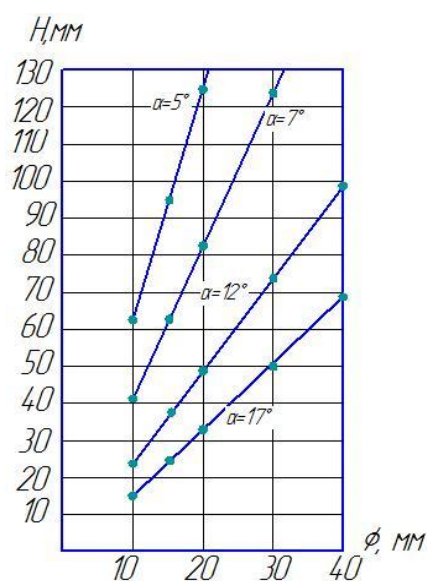


Рис. 39. Зависимость рабочего хода ножей от диаметра разрезаемой штанги

Экспериментальное определение напряжений испытываемых станиной ножниц подтвердили эффективность установки ножей в кассете посредством кареток.

Используя закон Гука, были получены зависимости для определения исполнительных размеров конструкций измерителей усилия.

Конструкции измерителей использовались в течение ряда лет в составе электронно-измерительных комплексов при определении действительных значений усилий на механических и гидравлических прессах при выполнении разделительных и формообразующих операций.

### Общие выводы

1. Разработаны математические модели и алгоритмы расчета НДС для различных вариантов осадки сплошных и полых цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций, позволяющие создавать и реализовывать на практике научно-обоснованные и наиболее эффективные технологические процессы, обеспечивающие получение качественных шлифовальных, полировальных и отрезных абразивных кругов на вулканитовой связке.

2. Предложена методика конструирования непрерывного и дифференцируемого по всему объему деформируемого тела поля скоростей для случая сложных граничных условий, когда традиционно используют разрывной вариант решения. На основе этого определено

напряженное и деформированное состояние заготовки на завершающей стадии прессования.

3. Впервые дана численная оценка параметров НДС и интегральных характеристик процесса деформации абразивно-вулканитовых композиций, позволившая определить рациональные значения силовых, кинематических, геометрических и текстурных параметров для обработки давлением цилиндрических заготовок.

4. Экспериментально подтверждены научные выводы, сделанные по результатам математического моделирования напряженного и деформированного состояния цилиндрических заготовок абразивных кругов, полученных обработкой давлением различными способами. В частности подтверждены причины, вызывающие расслои, разноплотность, разнотолщинность, неоднородность структуры, к которым в первую очередь следует отнести: значительное трение на контакте заготовки с инструментом, осуществление основной деформации заготовки за счет ее центральных слоев, недостаточную величину относительной деформации заготовки открытой осадки.

5. Выполненные конструкторско-технологические разработки, направленные на совершенствование производства заготовок для абразивных кругов на вулканитовой связке защищены 52 патентами на изобретения РФ.

6. Использование новых технических решений, защищенных 18 патентами РФ, позволило создать универсальную конструкцию ножниц с тангенциальным движением плоских клиновых ножей для разделения сортового проката круглого сечения, отвечающих требованиям к эксплуатации в производственных условиях. Ножницы отличается компактностью, низкая металло- и энергоемкость, возможность изготовления на любом предприятии машиностроительных и металлургических отраслей промышленности.

7. Экономический эффект за счет освоения новых технологий и технологической оснастки для производства абразивных кругов на вулканитовой связке составил более 85 млн руб. в ценах 2009 г. Сортамент выпускаемой продукции расширен на 14%.

8. Новые конструкции измерителей технологических усилий, предназначенные для механических и гидравлических прессов, обеспечивают стабильность, и точность измерений в течение длительного времени, позволяют предотвращать преждевременные поломки, вызванные перегрузками. Среднегодовой экономический эффект от использования измерителей на сортовых кривошипных ножницах в заготовительном цехе на ОАО «Уральская кузница» составил 230 руб. на 1 тонну продукции за счет сокращения простоев, вызванных преждевременными поломками и затрат на внеплановые ремонты.



### **Основные положения диссертации опубликованы в работах:**

1. Трусковский В.И. Оборудование для обработки давлением порошков и порошковых заготовок / Л.А.Барков, В.И.Трусковский, С.А.Мымрин, В.И.Пак, Э.А.Пирматов – Челябинск: Металл, 1992. – 296 с.

2. Трусковский В.И. Прессы-автоматы для обработки порошковых материалов / В.И.Трусковский, Л.А.Барков, В.К.Плотников. – Челябинск: Металл, 1994. – 304 с.

3. Трусковский В.И. Производство абразивных отрезных кругов на вулканитовой связке. Монография. Барков Л.А.; Павлов В.А.; Чаплыгин Б.А.; Дятлов В.Н.; Трусковский В.И.; Шеркунов В.Г. / Под ред. Чаплыгина Б.А. – Челябинск: Изд – во ЧГТУ, 1997. – 145 с.

4. Трусковский В.И. Производство вулканитовых абразивных кругов. Монография. Барков Л.А.; Чаплыгин Б.А.; Павлов В.А.; Дятлов В.Н.; Трусковский В.И.; Шеркунов В.Г. / Под ред. Павлова В.А. – Челябинск: Изд – во ЮУрГУ, 1998. – 332 с.

5. Трусковский В.И. Совершенствование процессов вырубki заготовок // Совершенствование процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства: Сб. тр. науч.-техн. конф. – Нижний Новгород, 1997. С. 50.

6. Трусковский В.И. Анализ технологии вырубki заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке. Трусковский В.И.; Павлов В.А.; Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Чаплыгина Б.А. – Челябинск: Изд – во ЧГТУ, 1997. С. 118 – 122.

7. Трусковский В.И. Исследование процессов прокатки вулканитовых абразивных масс на поточно-механизированной линии № 2 АО «Росси». Трусковский В.И.; Шеркунов В.Г.; Павлов В.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Чаплыгина Б.А. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. С.53 – 63.

8. Трусковский В.И. Аппаратура, методика и результаты замера энергосиловых параметров формования пластин для полировальных кругов / Дятлов В.Н.; Трусковский В.И.; Павлов В.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Чаплыгина Б.А. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. С.172 – 179.

9. Трусковский В.И. Экспериментальное исследование параметров прокатки вулканитовых абразивных смесей. Шеркунов В.Г.; Трусковский В.И.; Павлов В.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. научн. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. С. 54 – 60.

10. Трусковский В.И. Повышение качества и эффективности производства абразивных кругов на вулканитовой связке. Павлов В.А.; Трусковский В.И.; Гитенко С.Д. // Машины и технология обработки

материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. С. 67 – 72.

11. Трусовский В.И. Исследование процесса прокатки вулканитовых листов. Трусовский В.И.; Павлов В.А. // Машиностроитель. 2000, №12. С. 8 – 10. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

12. Трусовский В.И. Новый способ изготовления шлифовальных кругов на вулканитовой связке. // Станки и инструмент (СТИН). 2001, №2. С. 26 – 27. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

13. Трусовский В.И. Проблемы совершенствования производства и повышения качества вулканитового абразивного инструмента. Шеркунов В.Г.; Барков Л.А.; Трусовский В.И. // Вестник ЮУрГУ. Машиностроение. Выпуск 1, № 6, 2001. С.103 – 115. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

14. Трусовский В.И. Математическая модель напряженного деформированного состояния в очаге деформации при резке плоскими клиновыми ножами // Сб. науч. тр. «Абразивный инструмент и металлообработка» – Челябинск: Изд-во ЦНТИ. 2001. С.103 – 106.

15. Трусовский В.И. Эластические свойства прессованных полуфабрикатов абразивных кругов на вулканитовой связке. Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г.; Дятлов В.Н. // Механика и процессы управления. Серия: Технологии и машины обработки давлением. Екатеринбург: УрО РАН, 2003, с.130 – 133 **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

16. Трусовский В.И. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки сортового проката / В.И.Трусовский, Р.А.Закиров // Наука и технологии. Серия: Технологии и машины обработки давлением: Избранные труды Российской школы. – М.: РАН. 2005. С.129 – 134. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

17. Трусовский В.И. Математическое моделирование НДС проката в очаге деформации при резке плоскими клиновыми ножами. Закиров Р.А.; Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г. // Сб. научн. тр. 1-ой Российской научно-технической конференции «Кузнецы Урала 2005» – Екатеринбург. 2005. С. 153 – 156.

18. Трусовский В.И. Измеритель усилия пресса. // Вестник ЮУрГУ. Машиностроение. Выпуск 6. №1[41]. 2005. С. 185 – 186. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

19. Трусовский В.И. К определению геометрии и кинематики очага деформации при резке сортового проката на ножницах с тангенциальным движением инструмента. Шеркунов В.Г.; Трусовский В.И. // Труды VI Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии». – Алматы, РИК по учебной и методической литературе, 2011. С. 253 – 258.

20. Трусовский В.И. Измерители технологических усилий для кузнечно-прессовых машин // Контроль. Диагностика. 2012. №7. С. 68 – 72. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

21. Трусовский В.И. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб. Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г. // *Металлург.* №11. 2012. С.63 – 67. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

22. Трусовский В.И. К назначению угла плоских клиновых ножей для резки сортового проката с тангенциальным движением инструмента. Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г. // *Вестник МГТУ им. Г.И.Носова.* 2012. №3. С.21 – 24. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

23. Трусовский В.И. Совершенствование технологии прессования заготовок для шлифовальных и полировальных абразивных кругов на вулканитовой связке. // *Справочник. Инженерный журнал.* 2013. № 6. с. 10 – 16. **(рецензируемое издание из перечня ВАК).**

24. Трусовский В.И. Напряженное и деформированное состояние при осадке цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций (Сообщение 1). Судаков Н.В.; Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г. // *Известия ТулГУ. Технические науки.* Вып.6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч.2. С. 89 – 97. **(рецензируемое издание, рекомендуемое ВАК)**

25. Трусовский В.И. Напряженное и деформированное состояние при осадке цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций (Сообщение 2). Судаков Н.В.; Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г. // *Известия ТулГУ. Технические науки.* Вып.6. Тула: Изд-во ТулГУ, 2013. Ч.2. С. 98 – 105. **(рецензируемое издание, рекомендуемое ВАК)**

26. Трусовский В.И. Об эффективности открытой осадки пакетных заготовок при производстве абразивного инструмента на вулканитовой связке. // *Технология машиностроения.* 2014. № 1. С. **(рецензируемое издание, рекомендуемое ВАК).**

27. Truskovsky V.I. The New Device For Receiving Cut-To-Length Sections From Rolled Section And Justification Of Power Consumption For Division Process // III International Research And Practice Conference «European Science and Technology». Munich, Germany, 2012, p.268 – 275.

28. Truskovskii V.I., . Sherkunov V.G. Shears for cutting rolled shapes and thick-walled tubes. – *Metallurgist: Volume 56, Issue 11 (2013),* p. 848-853.

29. Патент № 2271900 РФ, МПК<sup>7</sup> В23D 15/02. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл. 20.03.2006, Бюл. № 8.

30. Патент № 116390 РФ, МПК<sup>7</sup> В23D 15/00. Ножницы для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл.27.05.2012, Бюл.№15.

31. Патент № 2283732 РФ, МПК<sup>7</sup> В23D 15/02. Ножницы для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И., Закиров Р.А. // Оpubл. 20.09.2006. Бюл. № 26.

32. Патент № 2149748 РФ, МПК<sup>7</sup> В24D 18/00. Поточно-механизированная линия для производства абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Чаплыгин Б.А., Павлов В.А. // Оpubл. 27.05.2000, Бюл. № 15.

33. Патент № 2219505 РФ, МПК<sup>7</sup> G01L1/06, В30В 15/28. Измеритель усилия прессы [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл. 20.12.2003, Бюл. №35.
34. Патент № 2138386 РФ, МПК<sup>7</sup> В24D 18/00. Пресс-форма для производства отрезных абразивных кругов [Текст] / Трусовский В.И., Павлов В.А., Барков Л.А // Оpubл. 27.09.1999, Бюл. № 27.
35. Патент № 2101165 РФ, МПК<sup>7</sup> В24D 18/00. Устройство для вырубki абразивных кольцевых заготовок на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Павлов В.А., Барков Л.А. // Оpubл. 10.01.1998, Бюл. № 1.
36. Патент № 116391 РФ, МПК<sup>7</sup> В23D 23/00. Устройство для резки прутков [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл.27.05.2012, Бюл. № 15.
37. Патент № 2155671 РФ, МПК<sup>7</sup> В24D 18/00. Способ формования абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Барков Л.А., Павлов В.А. // Оpubл. 10.09.2000, Бюл. № 25.
38. Патент № 2107609 РФ, МПК<sup>7</sup> В24D 18/00. Способ производства абразивного инструмента и устройство для его осуществления [Текст] / Барков Л.А., Трусовский В.И., Павлов В.А. // Оpubл. 27.03.1998, Бюл. № 9.
39. Патент № 2228255 РФ, МПК<sup>7</sup> В24D 18/00. Устройство для производства абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Дятлов В.Н., Трусовский В.И. // Оpubл. 10.05.2004, Бюл. № 13.