

Министерство образования и науки Российской Федерации
Южно-Уральский государственный университет
(Национальный исследовательский университет)

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

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Научный консультант
доктор технических наук,
профессор Шеркунов В.Г.

Челябинск – 2014

О Г Л А В Л Е Н И Е

	Стр.
ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ОБРАБОТКОЙ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ.....	16
1.1. Анализ производства заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке из плоского композиционного проката.....	16
1.2. Способы и устройства для получения кольцевых заготовок кругов из композиционного плоского проката	19
1.3. Аналитический обзор теоретических и экспериментальных исследований процессов получения заготовок из абразивно- вулканитовых композиций обработкой давлением.....	29
1.4. Анализ известных способов и устройств для получения мерных заготовок из сортового проката.....	35
1.5. Аналитический обзор теоретических разработок и экспериментальных исследований в области получения заготовок из сортового проката	50
1.6. Постановка цели и задач исследований.....	59
2. РАЗРАБОТКА НЕ ТРАДИЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА НДС.....	60
2.1. Состояние вопроса и постановка задачи.....	60
2.2. Нетрадиционные функционалы и алгоритмы определения напряженного и деформированного состояний.....	64
2.3. Возможные пути совершенствования алгоритмов.....	79
2.3.1. Поэтапная минимизация невязок.....	80
2.3.2. Дискретно-локальный метод минимизации невязок.....	83
2.3.3. К вопросу о целесообразности использования гипотезы о несжимаемости.....	84
2.4. Апробация возможных алгоритмов определения НДС.....	85
2.4.1. Критерии оценки алгоритмов.....	85

2.4.2. Замкнутая система уравнений осесимметричной задачи.....	86
2.4.3. Известный алгоритм определения НДС, использующий нестандартный прием.....	88
2.4.4. Аprobация алгоритма с функционалом невязки при удовлетворении физических уравнений (вариант 2).....	92
2.4.5. Аprobация алгоритма с функционалом невязки при удовлетворении граничных условий (вариант 4).....	95
2.5. Выводы по главе.....	97
3. НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АБРАЗИВНО-ВУЛКАНИТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ.....	99
3.1. НДС сплошной цилиндрической заготовки при открытой осадке.....	100
3.2. НДС полой цилиндрической заготовки при осадке с оправкой.....	104
3.3. НДС полой цилиндрической заготовки при осадке в пресс-форме.....	113
3.4. Допрессовка.....	116
3.4.1. Методика конструирования непрерывного и дифференцируемого поля скоростей при сложных граничных условиях.....	120
3.4.2. Напряженное и деформированное состояние при допрессовке сплошной цилиндрической заготовки из сжимаемого материала.....	123
3.5. К алгоритму расчета конечного формоизменения.....	127
3.6. Выводы по главе.....	133
4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ НА ВУЛКАНИТОВОЙ СВЯЗКЕ ИЗ ПЛОСКОГО ПРОКАТА.....	134
4.1. Общие проблемы совершенствования процессов получения заготовок из плоского проката для производства абразивных кругов на вулканитовой связке.....	134
4.2. Повышение технологической эффективности и качества производства кольцевых заготовок абразивных кругов.....	138
4.2.1. Механизация нанесения талька на листовую заготовку.....	139

4.3. Совершенствование ножевых штампов для получения кольцевых заготовок.....	141
4.4. Применение многогранных плоских и объемных заготовок в производстве абразивных кругов.....	147
4.5. Последовательное открытое и закрытое прессование в одной пресс-форме высоких пакетных заготовок	153
4.6. Перспективные способы и устройства для прессования заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке.....	160
4.7. Выводы по главе	168
5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ И ПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ.....	169
5.1. Исследование процесса получения плоских кольцевых заготовок.....	172
5.2. Исследование процесса открытой осадки многослойных заготовок.....	174
5.3. Исследование процесса осадки многослойных заготовок в закрытых пресс-формах.....	180
5.3.1. Исследование процесса прессования заготовок с модифицированными контактными условиями.....	195
5.4. Выводы по главе.....	202
6. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ НОЖНИЦ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НОЖЕЙ И ШТАМПОВ ДЛЯ РЕЗКИ СОРТОВОГО ПРОКАТА, СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСИЛИЙ ДЛЯ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	206
6.1. Сравнительное обоснование преимуществ схемы резки с усложненной траекторией относительного перемещения проката и отделяемой части.....	206
6.2. Совершенствование ножниц для резки проката плоскими ножами с поступательным перемещением разделяемых частей в двух направлениях с одновременным вращением.....	208

6.3. Разработка устройств для измерений усилий технологических операций выполняемых на прессах.....	218
6.3.1. Новые конструкции механических усилителей деформации.....	219
6.3.2. Расчет исполнительных размеров чувствительных элементов измерителя.....	221
6.4. Выводы по главе.....	224
7. РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖНИЦ И ИЗМЕРИТЕЛЕЙ УСИЛИЙ.....	226
7.1. Расчетное обоснование конструкции режущего инструмента и исследование влияния его на параметры резки, форму и размеры получаемых заготовок.....	227
7.2. Экспериментальное обоснование конструкции режущего инструмента и исполнительного механизма ножниц с тангенциальным движением ножей.....	232
7.3. Выводы по главе.....	236
8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ.....	237
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	239
ПРИЛОЖЕНИЕ.....	261

ВВЕДЕНИЕ

Анализ современного состояния технологий обработки материалов давлением, используемых в заготовительном производстве, показывает, что их дальнейшее развитие непосредственно связано с решением проблем повышения качества заготовок, получаемых из сортового и плоского проката, снижения себестоимости, сокращения расхода материалов и энергии.

Разделительные и формообразующие операции обработки материалов давлением лежат в основе получения кольцевых и сплошных заготовок из плоского композиционного проката для производства абразивных кругов (отрезных, шлифовальных и полировальных) на вулканитовой связке.

Современное отечественное производство абразивного инструмента характеризуются высокой материалоемкостью и трудоемкостью операций. Выпускаемая продукция обладает не высокой конкурентоспособностью. Имеющиеся проблемы в значительной мере объясняются недостаточным научным обеспечением процессов обработки давлением абразивно-вулканитовых композиций.

Исторически сложилось так, что основное внимание уделялось и уделяется разработке составов абразивных композиций, обеспечивающих повышение эксплуатационных характеристик получаемых из них изделий. Эта задача решается довольно успешно.

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

При этом проблемы связанные с получением качественных исходных кольцевых заготовок способами обработки давлением из плоского композиционного проката остаются не решенными.

Получению высоких абразивных кругов сопутствует недопустимое количество брака связанного с потерей сплошности, завышенными допусками на геометрические размеры, неоднородностью свойств по объему изделия и др.

Проблемы производства отрезных кругов в первую очередь связаны с использованием не приемлемых для этого способов и устройств, которые были заимствованы из резинотехнической отрасли. В результате низкая точность геометрических форм и размеров, коэффициент использования материала, производительность, большое количество ручного труда, неудовлетворительная экология и неоправданно большие затраты на механическую обработку.

Таким образом, вопросы изучения и исследования разделительных и формообразующих операций, разработки новых прогрессивных способов и устройств, обеспечивающих получение качественных заготовок, для производства абразивного инструмента из плоского проката представляющего собой структурно неоднородную композицию являются актуальными.

Применительно к кузнечному заготовительному производству, составляющему основу заготовительной базы машиностроения, наиболее эффективными являются безотходные способы получения мерных заготовок из сортового проката обработкой давлением.

Современное развитие теории, технологии и оборудования в области разделения сортового проката связано с такими именами отечественных ученых как А.И.Целиков, К.Н.Богоявленский, П.Е.Кислый, В.Г.Кононенко В.Т.Мещерин, Е.А.Попов, В.П.Романовский, С.С.Соловцов, В.А.Скороход, В.А.Тимощенко, Е.М.Третьяков и др.

При всем их многообразии механических схем резки трудно выделить такие, которые были бы лишены в той или иной мере недостатков, среди которых: неудовлетворительное качество торцов, получаемых при резке заготовок, недостаточная геометрическая точность, низкая производительность,

высокая металло- и энергоемкость, стоимость, а также сложность установок для разделения сортового проката.

Решению этих проблем может способствовать разработка способов, объединяющих в себе преимущества характерные для существующих различных механических схем резки и создание для их реализации новых экономичных, универсальных, быстропереналаживаемых устройств, простых в эксплуатации и обслуживании.

Это особенно актуально для мелкосерийного и серийного многономенклатурного производства заготовок диаметром до 100 мм и толстостенных труб, имеющих широкое применение, когда использование дорогостоящих и достаточно затратных в обслуживании типовых сортовых кривошипных ножниц для резки сортового проката становится не рентабельным и экономически не выгодным.

Получение мерных заготовок в отрезных штампах ограничено диаметром разделяемого проката, который не превышает 40 мм. При всем многообразии их конструкций наибольшее распространение получили только штампы с поступательным перемещением ножей, не отличающиеся высокой надежностью и долговечностью.

Штампы с вращательным движением применяются редко, а со сложным движением имеют пока только экспериментальное исполнение.

Штампы с дифференцированным зажимом при известных достоинствах обладают чрезмерной сложностью конструкции, трудоемкостью изготовления и обслуживания, что является частой причиной отказа от их применения в пользу более простых и надежных в работе штампов со снижением в приемлемых пределах качества получаемых заготовок. Кроме этого, такие штампы требуют использования прессов с большим номинальным усилием из-за повышенных затрат на преодоление трения, которое в свою очередь приводит к износу контактных поверхностей рабочих частей ножей.

Применение кривошипных прессов общего назначения для резки заготовок в штампах в основном открытого типа, обладающих низкой

жесткостью, приводит к существенному снижению их долговечности и сопровождается преждевременными поломками, вызываемыми действием значительных динамических нагрузок, особенно при работе на автоматических ходах.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

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 получить информацию о напряженном и деформированном состояниях;

4. Выполнить расчетно-экспериментальное обоснование нового устройства с тангенциальным движением режущего инструмента для получения заготовок из сортового проката и устройств для измерения технологических усилий;

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

Научная новизна работы заключается в следующем:

- в разработке математических моделей и алгоритмов расчета на основе не традиционных функционалов, позволивших получить полную информацию об основных показателях НДС для различных вариантов деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок, проанализировать взаимосвязь НДС с условиями деформации.

- в впервые данной численной оценке параметров НДС и интегральных характеристик процессов деформации абразивно-вулканитовых композиций позволившей определить рациональные значения силовых, кинематических, геометрических и текстурных параметров для обработки давлением сплошных цилиндрических и кольцевых заготовок, теоретически обосновать наиболее неблагоприятные с точки зрения вероятности нарушения сплошности участки деформируемой заготовки.

- в разработке дискретно-локального варианта минимизации невязок при удовлетворении переопределенной системы соответствующих уравнений, который может быть классифицирован как новый метод приближенного определения полей скоростей и напряжений при обработке материалов давлением, позволяющий сократить время расчета и повысить стабильность расчетной процедуры.

- в определении напряженного и деформированного состояния цилиндрической заготовки при закрытом прессовании на основе разработанной методики конструирования непрерывного и дифференцируемого по всему объему деформируемого тела поля скоростей.

- в получении новых знаний в области разделения сортового проката плоскими клиновыми ножами с тангенциальным движением, необходимых для обоснованного назначения исполнительных размеров инструмента и конструкции исполнительного механизма ножниц, обеспечивающих их универсальность и стабильность процесса резки.

Практическая ценность работы. Результаты исследований являются готовыми к практическому использованию и заключаются:

- в разработке новых способов и устройств для производства абразивного инструмента на вулканитовой связке, защищенных патентами на изобретения РФ, позволяющих предотвратить возникновение брака и непроизводительные расходы сопутствующих материалов, расширить номенклатуру выпускаемого инструмента, сократить материальные и энергозатраты, уменьшить потребности в механической обработке, повысить производительность и улучшить условия труда;

- в создании новой универсальной, быстропереналаживаемой, простой в эксплуатации и обслуживании, конструкции ножниц для резки сортового проката круглого сечения, обладающей не высокой металло- и энергоемкостью, защищенной рядом патентов РФ на изобретения и полезные модели;

- в разработке конструкций и методики расчета исполнительных размеров устройств для измерения технологических усилий на механических и гидравлических прессах и предотвращения перегрузок при выполнении технологических операций;

- в получении теоретических положений о способах деформации, результатов экспериментальных исследований новых разработок, позволяющих дать углубленные и более широкие знания при обучении и подготовке специалистов в области обработки материалов давлением.

Реализация результатов работы.

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

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 Межгосударственной научно-технической конференции «Проблемы развития металлургии Урала на рубеже XXI века», г. Магнитогорск, 1996 г.; на научно-

технической конференции «Совершенствованию процессов и оборудования кузнечно-штамповочного производства», г. Нижний Новгород 1997г; на научно-технической конференции «Современные технологии в машиностроении», г. Пенза, 1997 г.; на международной научно-технической конференции «Проблемы пластичности в технологии», г. Орел, 1998 г.; на международной научно-технической конференции «Процессы абразивной обработки, абразивные инструменты и материалы», г. Волжский, 2002 г.; на Международных научно-технических конференциях «Научно-технический прогресс в металлургии», г. Темиртау, Республика Казахстан в 2003 и 2011 г.г.; на Международной научно-технической конференции «Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением», г. С-Петербург, 2005 г.; на Международной научно-технической конференции «Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов», г. С-Петербург, 2005 г.; на 1 – ой Российской научно-технической конференции «Кузнецы Урала 2005», г. Екатеринбург, 2005 г.; на седьмой международной научно-технической конференции «Инновационные технологии в металлургии и машиностроении», г. Екатеринбург, 2013г., на ежегодных научно-технических конференциях Южно-Уральского государственного университета (1990 – 2013 г.г).

Основные положения диссертации опубликованы в 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.

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.

Структуру диссертации и взаимосвязь ее отдельных разделов поясняет граф, изображенный на рис.01.

БЛОК – СХЕМА ВЗАИМОСВЯЗИ РАЗДЕЛОВ ДИССЕРТАЦИИ



Рис. 01. Блок-схема взаимосвязи разделов диссертации

Блок 1 включает анализ современного состояния производства, теоретических и экспериментальных исследований в области получения заготовок обработкой материалов давлением. Приводится оценка известных способов и устройств для получения мерных заготовок из металлов и сплавов, а также из абразивно-вулканитовых композиций обработкой давлением. Рассмотрены общие проблемы совершенствования производства заготовок. Проанализированы известные теоретические и экспериментальные

работы, посвященные изучению процессов получения заготовок обработкой материалов давлением. Итогом выполненного аналитического исследования явились формулировка цели и задач исследования.

Блок 2 посвящен теоретическому исследованию процессов получения заготовок из металлов и композиционного плоского проката. Выполнен анализ известных схем процессов резки сортового проката на мерные заготовки, а также процессов получения цилиндрических заготовок в условиях как свободного, так и стесненного течения материала. Определено напряженно-деформированное состояние проката в очаге деформации при его разделении плоскими клиновыми ножами с тангенциальным движением, а для получения заготовок из композиционного плоского проката для различных схем нагружения и граничных условий. Разработан новый подход к конструированию функционала, минимизация которого позволяет определить формоизменение заготовки в процессе деформирования. Итогом этой части работы явились научно-обоснованные рекомендации по разработке основных узлов деформирующего оборудования, совершенствования процессов разделения, использования наиболее рациональных схем обработки давлением при получении продукции необходимого сортамента.

В блоке 3 приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтвердили результаты и выводы, полученные при реализации математических моделей и позволили научно обоснованно подойти к решению вопросов совершенствования существующих, а также созданию новых способов, технологической оснастки, технологии и оборудования, разработке системы измерений и контроля технологических усилий для прессового оборудования.

Результаты исследования процессов получения сплошных и полых заготовок, как из сортового, так и композиционного плоского проката приведенные в теоретическом и экспериментальном разделах диссертации, использованы в технологических блоках 4 и 5. В блоке 4 приведены разработки направленные на усовершенствование существующих технологий и

оборудования, а в блоке 5 – новые технические решения (способы, устройства, инструмент, технологии, оборудование), предложенные автором и внедренные в производство.

В диссертации обобщены материалы исследований, выполненные автором в Южно-Уральском-государственном университете (ЧПИ, ЧГТУ) за период 1988 – 2013 г.г.

Автор с искренней благодарностью отмечает помощь в работе над диссертацией, оказанную ему сотрудниками кафедры «Машины и технология обработки материалов давлением» ЮУрГУ, лаборатории вулканитового инструмента ОАО «УралНИИАШ» и промышленных предприятий: ЗАО «Уральская кузница», ЗАО «Росси».

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ В ОБЛАСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК ОБРАБОТКОЙ МАТЕРИАЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Среди множества технологических операций во многих отраслях промышленности в цикле изготовления разнообразных деталей получение заготовок является неотъемлемой частью. Точность и качество получаемых заготовок во многом определяет эффективность последующих технологических переделов.

При получении исходных заготовок обработкой давлением для дальнейшей технологической переработки используются две операции – разделительная и формообразующая, содержащие разнообразные способы и схемы.

Для получения мерных заготовок из металлов и сплавов используется операция резки.

В абразивной отрасли промышленности при изготовлении отрезных кругов на вулканитовой связке исходной заготовкой служат кольцевые полуфабрикаты, получаемые высечкой из предварительно прокатанных листов из абразивно-вулканитовых композиции различного состава. Заготовки шлифовальных и полировальных кругов различной высоты получают прессованием кольцевых заготовок предварительно собранных в пакет.

1.1. Анализ производства заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке из плоского композиционного проката

В современном отечественном производстве абразивного инструмента из абразивно-вулканитовых композиций большая часть технологической оснастки, оборудования была заимствована из других отраслей промышленности, в основном из резино-технической, а некоторая была разработана впервые.

Начавшиеся применяться технологии, технологическая оснастка и оборудование для производства заготовок из абразивно-вулканитовых композиций не имели достаточной теоретической и экспериментальной обоснованности. Качество заготовок и выход годной продукции оставляли желать лучшего.

С началом перехода на работу по системе качества, соответствующей требованиям международных стандартов ИСО 9000 стало необходимым решать проблемы совершенствования производства и повышения качества выпускаемых абразивных кругов на вулканитовой связке [1 – 3].

Для повышения качества инструмента выпускаемого на основе абразивно-вулканитовых композиций необходимо улучшить показатели его работоспособности по назначению, надежности, по экономному использованию сырья, технологичности получения заготовок абразивных кругов.

Повышение указанных показателей качества может быть достигнуто в первую очередь за счет совершенствования существующей технологии всех переделов изготовления инструмента, модернизации технологической оснастки, а также за счет разработки и освоения новых прогрессивных процессов обработки абразивно-вулканитовых композиций давлением и технологической оснастки для их осуществления [4 – 8].

Прежде всего, это относится к поточно-механизированным линиям, включающим как обычные прокатные клетки дуо, так и клетки трио специальной конструкции, прессовое оборудование для разделительных операций и гидравлические установки для формообразующих.

В конце 90-х годов прошлого столетия впервые начали проводиться всесторонние теоретические и экспериментальные исследования, посвященные технологии приготовления исходных абразивно-вулканитовых композиций, получения из них листового проката, кольцевых полуфабрикатов и цилиндрических заготовок [9 – 17].

Выполненные теоретические и экспериментальные исследования в большей степени были связаны с процессами получения абразивно-

вулканитовых композиций и получения из них способами прокатки листовых заготовок [2,3,7]. Процессы прессования цилиндрических заготовок для шлифовальных и полировальных кругов из собранных в пакет предварительно вырубленных плоских кольцевых заготовок теоретически и экспериментально остаются еще недостаточно изученными и исследованными [18]. Необходимо также научно-практическое обоснование по совершенствованию разделительных процессов при получении плоских кольцевых заготовок.

Существенным недостатком используемого в настоящее время процесса высечки для получения кольцевых заготовок наружными диаметрами от 80 до 500 мм и высотами от 0,6 до 53 мм, реализуемого на ножевых штампах (рис.1.1), является наличие большого припуска, который составляет от 5 до 9 мм. Кроме того, вырубленные кольцевые заготовки имеют большое количество дефектов по наружным диаметрам в виде заусенцев, разрывов, овальности, и других макронарушений. На рис.1.2 показаны дефекты, собранных в пакет вырубленных кольцевых заготовок, предназначенных для прессования заготовки абразивного круга.



Рис.1.1. Высечка кольцевых заготовок ножевым штампом



Рис.1.2. Пакет из кольцевых заготовок для прессования

Указанные недостатки кольцевых заготовок, а также их разновысотность и неоднородность свойств приводят к низкому качеству заготовок и готовых кругов по показателям назначения, надежности инструмента, экономичности использования сырья и технологичности разделительного процесса. Если показатели назначения, надежности, экономичности использования сырья для получения заготовок тесно связаны с аналогичными показателями качества проката, то показатели качества заготовок по их технологичности определяются особенностями используемого способа разделения и технологической оснастки. Применяемая в настоящее время операция высечки для получения кольцевых заготовок из плоского проката не технологична. Процесс трудоемок из-за низкой точности заготовок, высока потребность в механической обработке после вулканизации.

1.2. Способы и устройства для получения кольцевых заготовок абразивных кругов из композиционного плоского проката

При получении кольцевых заготовок для производства отрезных, шлифовальных и полировальных кругов используются заготовительные разделительные и формообразующие операции.

Из известных разделительных операций [19 – 22] используется операция высечки, осуществляемая ножевыми штампами, а формообразующих – операция закрытого прессования.

При производстве кольцевых заготовок для отрезных, низких шлифовальных и полировальных кругов операция высечки является финишной в цикле технологических операций связанных с обработкой давлением.

Исходными заготовками для получения высоких шлифовальных и полировальных кругов служат пакеты, собранные также из отдельных кольцевых заготовок, вырезанных из предварительно прокатанных листов. Количество и высота отдельных кольцевых заготовок в пакете, подвергаемого впоследствии операции закрытого прессования, зависит от требуемой высоты готового абразивного круга.

Проведенные в течение ряда лет исследования производства абразивного инструмента на вулканитовой связке и полученные статистические данные [2 – 4, 23] показывают, что среди процессов обработки давлением используемых для получения отрезных, шлифовальных и полировальных кругов доминирующей операцией, определяющей качество, геометрическая точность изделий, затраты на механическую обработку, расход сырья и в конечном итоге себестоимость является операция высечки кольцевой заготовки из плоского проката ножевыми штампами.

Для отрезных кругов эта операция из используемых операций связанных с обработкой давлением является финишной. Далее полученные кольцевые полуфабрикаты подвергаются вулканизации и поступают на участок механической обработки для придания им окончательных размеров. Таким образом от операции высечки будут зависеть не только все последующие затраты связанные с механической обработкой, количество выхода годной продукции, себестоимость, но также качество и абразивные свойства готовых отрезных кругов.

Однако существующая практика показывает, что применяемая разделительная операция и конструкция ножевых штампов для

обрабатываемого материала далеки от совершенства. Они не обеспечивают должного качества и геометрической точности получаемых кольцевых полуфабрикатов. Применяемая технология и оснастка обуславливает необходимость назначения плюсового припуска равного 5 мм на наружный диаметр кругов независимо от его величины. Этот припуск компенсирует отклонения в размерах в результате эластического восстановления размеров листов по длине и ширине после прокатки и даже после вырубки, отклонения при вырубке (допускаемые отклонения составляют ± 2 мм) и отклонения в размерах наружного диаметра кругов при вулканизации. Одновременная высечка нескольких заготовок (от 2-х до 8-ми) с целью повышения производительности приводит к образованию заусенцев, вырывов на боковых поверхностях кольцевых полуфабрикатов. К этим же недостаткам приводит также интенсивное затупление ножей в процессе работы. Отмеченные недостатки наряду с другими приводят к перерасходу исходной массы и повышенным затратам на механическую обработку.

Качество пакетов, подготавливаемых к прессованию, также определяется качеством составляющих его кольцевых полуфабрикатов (состояние боковой и торцевых поверхностей, степень овальности и т.д.).

Эластическое восстановление размеров листов после чистовой прокатки, как было отмечено выше, разное в направлениях длины и ширины. Причем это восстановление продолжается и после вырезки из листов кольцевых полуфабрикатов. В результате кольцевые полуфабрикаты как по наружному, так и по внутреннему диаметрам получают овальность.

Овальность отдельных кольцевых полуфабрикатов приводит к ступенчатости боковых поверхностей собранных из них пакетов, которая становится причиной неоднородной деформации при прессовании и способствует возникновению расслоений на заготовках.

Операция высечки производится специальными ножевыми штампами, установленными на пневматических или ручных прессах [24].

Наиболее широкое применение получили пневматические прессы простого действия усилием до 60 кН.

Конструкция технологической оснастки обычно регламентируется стандартом предприятия, выпускающим абразивные круги [25]. На рис.1.3 приведена конструкция применяемого ножевого штампа.

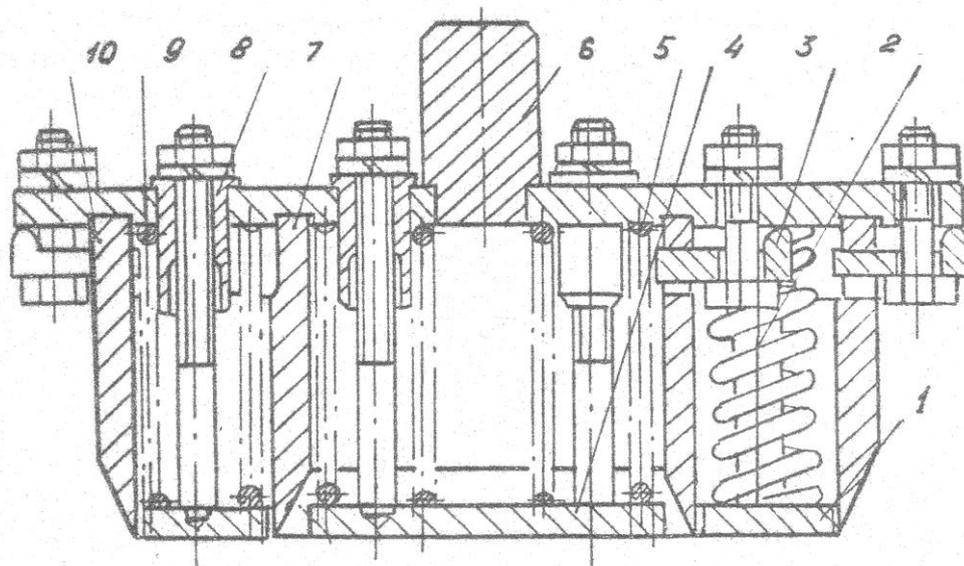


Рис.1.3. Конструкция ножевого штампа

Штамп содержит два режущих элемента 7 и 10, выполненных в виде встроенных одно в другое колец с заостренными режущими кромками. Режущие элементы жестко смонтированы посредством прижимов 3 на оправке 6. В полости, образованной режущими элементами, встроены подпружиненный упругими элементами 5 и 9 относительно оправки 6 выталкиватель 1 вырубленной заготовки. В полости ножа 7 также встроены выталкиватель высечки 4. Выталкиватели посредством стержней 2 связаны с направляющими втулками 8.

В зависимости от диаметра и высоты круга, предварительно прокатанные пластины подают под вырубной штамп по одной или укладывают одну на другую. Во избежание слипания пластин их пересыпают тальком. Количество одновременно вырубаемых кольцевых полуфабрикатов должно соответствовать указаниям, приведенным в таблице нормалей на заготовки.

Кажущаяся эффективность в простоте операции высечки и конструкции ножевого штампа привела к тому, что уже не один десяток лет используется один способ, один тип штампа и один тип прессы.

Однако детальное обследование используемой технологии, применяемой оснастки и оборудования, проведение контрольных мероприятий по качеству и геометрической точности получаемых кольцевых заготовок позволили вскрыть на первый взгляд не видимые, но укоренившиеся недостатки и выявить ряд проблем.

В подавляющем большинстве применяемых типоразмеров штампов малоэффективна и ненадежна работа выталкивателей из-за отсутствия контроля и поддержания требуемого предварительного поджатия пружин выталкивателей и их технического состояния. Не соблюдается требование по обязательной протирке наружного диаметра ножей штампа перед каждой операцией, что приводит к налипанию образующейся при высечке заготовок из пластин абразивно-вулканиковой крошки на инструмент, ухудшающему качество поверхности среза. Отсутствует постоянный контроль размеров получаемых кольцевых заготовок на соответствие нормам на данной операции. Перечисленные недостатки относятся к прямому нарушению технологических инструкций, низкому уровню культуры производства. В принципе такие проблемы решаются жестким администрированием технологического процесса. Но эффективнее может быть решение, если исключить или свести к минимуму влияние человеческого фактора на нарушение технологических режимов.

Недостатки применяемого способа.

Высечка заготовки при жестком упоре ножей в жесткую подложку уложенную на столе прессы приводит к интенсивному затуплению режущих кромок. Ходоограничители отсутствуют и поэтому величина усилия, с которым ножи упираются в подложку, а значит и степень интенсивности затупления всецело зависит от квалификации рабочего.

В результате образуется недопустимый заусенец, снижается качество и геометрическая точность получаемых заготовок. Невозможность гарантированного обеспечения требуемой точности заготовок повлекло за собой увеличение припуска на последующую механическую обработку и как следствие завышенный расход абразивно-вулканитовой массы.

Образующийся при высечке кольцевых заготовок отход в виде облоя возвратный и составляет 40...50% массы проката. Отходы примерно в равной пропорции смешиваются со свежей кусковой абразивно-вулканитовой массой и вновь поступают на операцию прокатки. Попытки использования только отходов без добавления свежей массы для получения отрезных кругов показали, что качество кругов при этом снижается. Куски отходов перед прокаткой уже имеют плотность готовых кольцевых полуфабрикатов. Адгезия кусков при прокатке понижена, поскольку их поверхность покрыта тальком. Кольцевые заготовки, полученные только из отходов, имеют практически удвоенное содержание талька и не только на поверхности, но и в объеме заготовки. Это приводит к изменению химического состава абразивного инструмента, что сказывается на его свойствах и качестве.

Исходная предварительно прокатанная пластина обладает высокой эластичностью и пластичностью. Поэтому получение из нее кольцевой заготовки высечкой с упором ножей в упругую подложку, на которой располагается пластина, будет обязательно сопровождаться искажением геометрической формы, особенно при затупленных ножах. Не предусмотрен также автоматический съём наружного облоя с инструмента.

В результате анализа выявленных недостатков используемого способа можно прийти к главному заключению. Способ высечки абсолютно не приемлем для получения кольцевых заготовок из плоского проката полученного из абразивно-вулканитовой композиции.

В случае замены операции высечки на операцию вырубki представится возможность устранить остро стоящую проблему по разновысотности получаемых заготовок, особенно важную для отрезных кругов, которая

возникает при прокатке пластин и достигающую нескольких десятков процентов от номинальной высоты круга, если ввести операцию калибровки, совместив ее при этом с операцией вырубки [25]. К настоящему времени эта проблема остается не решенной.

В технологическом цикле производства цельных заготовок шлифовальных и полировальных абразивных кругов кольцевого типа (тип 1 ГОСТ 2424 – 83) с наружным диаметром от 80 мм до 500 мм, высотой от 6 до 80 мм (и более для сверхвысоких кругов) из кольцевых полуфабрикатов собранных в пакеты в число основных операций входят: предварительное прессование из пакета исходной заготовки, окончательное прессование заготовки и выпрессовка заготовки из пресс-формы. Эти операции выполняются на участке поточно-механизированной линии (рис.1.4), содержащей устройство для предварительного прессования из кольцевых полуфабрикатов, собранных в пакеты открытой осадкой между двумя плитами на пневматическом прессе, гидравлический пресс колонного типа с пресс-формой для окончательного прессования, оснащенной механизмом перемещения и выталкивающим цилиндром.

Усилие предварительного прессования составляет 0,1...0,2 от усилия окончательного прессования. В процессе предварительного прессования имеет место в основном эластическая деформация. Эта операция позволяет частично удалить атмосферные газы, находящиеся на контактных поверхностях кольцевых полуфабрикатов, а возникающие силы когезии позволяют получить целостную исходную заготовку, что позволяет транспортировать и загружать ее в пресс-форму.

Операция окончательного закрытого прессования должна обеспечить получение из предварительно спрессованного пакета заготовки высокого круга, в которой на всех контактных поверхностях отдельных кольцевых полуфабрикатов имеет место полное схватывание. В процессе окончательного прессования атмосферные газы и смазка в виде мыльной эмульсии, покрывающая внутренние поверхности пресс-формы должны быть удалены с

поверхностей контакта отдельных кольцевых полуфабрикатов. Но, этому препятствуют заусенцы, заполняющие зазоры между верхней и нижней рабочими плитами, корпусом пресс-формы и оправкой (рис.1.4).



Рис.1.4. Прессованная заготовка после извлечения из пресс-формы



Рис.1.5. Прессовка после извлечения из пресс-формы

Герметизация внутреннего объема пресс-формы, препятствующая выходу атмосферных газов, становится одной из слагаемых в ряде причин приводящих

к возникновению расслоев, как после извлечения прессовки из пресс-формы (рис.1.5), так и после вулканизации (рис.1.6) [26, 27].



Рис.1.6. Прессовка после вулканизации

Анализ существующих технологий получения заготовок для шлифовальных и полировальных кругов и наблюдения за производственным процессом позволили установить две основные причины расслоенных дефектов:

- действие на прессовку боковых усилий от стенок пресс-формы после снятия усилия прессования;

- действие на части прессовки, одна из которых уже вышла из пресс-формы, а другая еще находится в пресс-форме, разных по знаку радиальных напряжений.

Величина боковых усилий, действующих на заготовку, определяется прежде всего реологическими свойствами прессуемого материала, а также кинематическими и силовыми граничными условиями в очаге деформации и может достигать 80% от усилия прессования [28]. Эти боковые усилия после снятия усилия прессования вызывают пластическое формоизменение и приводят к возникновению осевых растягивающих напряжений в заготовке.

В процессе выталкивания заготовки часть ее, вышедшая из пресс-формы, получает значительные эластические деформации, т.е. диаметр этой части заготовки превышает диаметр пресс-формы. В результате на эту часть заготовки действуют радиальные растягивающие напряжения. Вторая часть заготовки, находящаяся в пресс-форме, подвергается радиальным сжимающим и осевым растягивающим напряжениям. Плоскостью возникновения расслоев при выпрессовке является плоскость стыка первой и второй частей заготовки, в которой совершается скачек радиальных напряжений от сжимающих к растягивающим.

Технология прессования заготовок для высоких кругов осуществляется двумя способами: по величине хода пресс-шайбы прессы или по давлению прессования пакетной заготовки. Минимальное количество кольцевых заготовок в пакете равно 6, максимальное – 23. От их количества зависит вероятность возникновения расслойных дефектов. В пакете из 23 кольцевых полуфабрикатов вероятность возникновения расслоев в 4,5 раза выше по сравнению с пакетом из 6 заготовок [29].

Анализ деформационных режимов прессования заготовок показал, что с увеличением высот пакетов величина относительных обжатий снижается, что нельзя считать рациональным. Например, для кругов высотой до 120 мм и минимальным отношением высоты к диаметру относительное обжатие доходит до 18,6% , а при обжатии самых высоких пакетов диаметрами 300 мм и более обжатие составляет 10%.

Возникающие расслойные дефекты являются в основном следствием неравномерной осадки пакетов кольцевых заготовок.

Режимы обжатий должны быть разными для низких и толстостенных и тонкостенных заготовок умеренной высоты, поскольку характер их формоизменения принципиально отличен.

Установлено, что используемые величины абсолютных обжатий кольцевых пакетов разной высоты и разных наружных и внутренних диаметров не оптимальны. Обжатия не учитывают условий трения на контакте, значений

показателей формы пакетов и количество кольцевых заготовок в каждом пакете. Для разработки оптимальных режимов обжарки на основе установления их связи с показателями формы пакетов и количеством кольцевых заготовок необходимо проведение опытно-промышленных исследований.

Анализ литературных источников, имеющийся производственный опыт различных предприятий показал, что прессование на основе зависимости удельного усилия от диаметра кольцевого пакета не имеет ни теоретического, ни экспериментального обоснования. Существующие режимы прессования нуждаются в пересмотре.

1.3. Аналитический обзор теоретических и экспериментальных исследований процессов получения заготовок из абразивно-вулканитовых композиций обработкой давлением

Основательно теоретическими и экспериментальными исследованиями в области производства абразивного инструмента из абразивно-вулканитовых композиций начали заниматься лишь в 90-х годах прошлого века. Хотя первые публикации, посвященные вопросам проектирования и технологии изготовления абразивного инструмента, вышли в свет в начале второй половины прошлого века [30 – 34]. Проведенные исследования и полученные результаты создали предпосылки для дальнейшего научно-технического развития в этой области.

Большой вклад в исследования внесли ученые Южно-Уральского государственного университета и УралНИИАШ (г. Челябинск) [2,3, 9 – 11,13 – 16, 18,29, 35, 36].

Первые научные работы в основном касались поиска оптимального состава абразивных смесей (исходных материалов для обработки давлением). В настоящее время в качестве связки используется композиция синтетического высокомолекулярного бутадиенового каучука (до 70%) с различными наполнителями для повышения прочностных и эксплуатационных свойств готового инструмента.

К параметрам абразивного зерна также предъявляются определенные требования. В зависимости от назначения абразивного инструмента составляются исходные композиции различного состава [2, 37, 38].

Проблема нахождения оптимального состава абразивно-вулканитовой композиции отечественными разработчиками решена достаточно успешно [39 – 41]. Состав смеси в настоящее время не является «узким» местом при производстве абразивного инструмента. Основные трудности имели и имеют место в технологии и технологической оснастке изготовления изделий методами обработки давлением из абразивно-вулканитовых композиций.

Анализ существующего производства абразивного инструмента и первоначальные теоретические и экспериментальные исследования процессов обработки давлением абразивно-вулканитовых композиций показали, что для получения достоверных результатов необходимо учитывать специфику реологии последних.

В связи с этим были выполнены исследования реологических свойств абразивно-вулканитовых смесей и разработки определяющих физических уравнений [8, 42]. В работах [15, 36] исходная среда (абразивно-вулканитовая композиция) была классифицирована как гетерогенная некомпактная упруговязкая, сопровождающаяся в процессе обработки деформационным и скоростным упрочнением, значительной как мгновенной, так и долговременной (эластичностью) упругой деформацией.

Исходя из этой предпосылки, были предложены оригинальные методики и экспериментальное оборудование для исследования реологических свойств абразивных смесей на вулканитовой связке [43 – 45]. На основе пластометрических исследований была впервые получена информация о сопротивлении деформации различных марок абразивных смесей.

Традиционная обработка пластометрических результатов не дает зависимость сопротивления деформации от времени, которая для сред, обладающих упруго-вязкими свойствами, имеет существенное значение. В основе предложенной методики вывода определяющих физических уравнений

лежат пластометрические кривые зависимостей интенсивности нормальных напряжений σ_n , интенсивности линейных деформаций ε_n и скоростей деформаций $\dot{\xi}_n$ от времени τ .

Различные марки абразивных смесей отличаются структурой: объемной долей, формой и дисперсностью абразивных зерен.

В работе [46] выполнено теоретическое обобщение различных марок абразивных смесей как структурно-неоднородного материала с различными параметрами структуры. Разработана методика определения сопротивления деформации структурно-неоднородного материала с вязкой основой и жесткими недеформируемыми включениями, которые могут иметь различные объемную долю, форму и дисперсность.

Практическая значимость гипотез состоит в возможности обобщения результатов теоретического анализа, полученных на основе математических моделей для простых форм включений, на случай любых форм включений.

Известны работы, в которых эффективные реологические характеристики определяют на основе анализа взаимодействия элементов структуры, но для материалов с регулярной (однородной) по объему структурой [47 – 55]. При этом представительный элемент среды объективно отражает структуру среды в целом, что значительно упрощает задачу.

Ситуация с абразивными смесями намного сложнее, поскольку абразивные зерна имеют неправильную форму, произвольным образом ориентированы в системе отсчета и по отношению друг к другу. Можно полагать, что в процессе деформации их ориентация и взаимное расположение будут изменяться, согласуясь с законом наименьшего сопротивления при течении материальных частиц. Все сказанное не позволяет считать имеющиеся разработки по определению сопротивления деформации структурно-неоднородных материалов с вязкой основой и недеформируемыми включениями произвольной формы завершенными и достаточно надежными.

Реологические характеристики абразивно-вулканитовых композиций полученные в работах [36, 46] позволили выполнить математическое

моделирование процессов обработки давлением абразивно-вулканитовых композиций.

Исследования процесса продольной прокатки листовых заготовок прямоугольного сечения [9, 10] выявили возможность существования в очаге деформации трех зон: традиционной зоны отставания на входе в валки; нетрадиционной зоны отставания на выходе из валков и зоны опережения между зонами отставания. При прокатке в валках с различными окружными скоростями, кроме указанных зон, имеют место две смешанные зоны.

В работе [36] не учитывается возможность прилипания на контактной поверхности абразивной смеси к валкам. Вместе с тем вероятность прилипания абразивной смеси достаточно велика, что, в частности подтверждается не свойственными традиционным представлениям значения кулоновского трения. По данным работы [11] коэффициенты трения достигают значений, соизмеримых с единицей. Наличие скольжения в этом случае делало бы процесс прокатки более энергоемким по сравнению с прокаткой в условиях прилипания, что противоречило бы закону наименьшего сопротивления.

В работе [29], на основе предложенных конструкторско-технологических решений [56, 57], приводится теоретическая оценка вероятности расслоения кругов в случае изготовления их из рулонной заготовки.

Оценка напряженного состояния вращающегося круга была выполнена методом сил теории упругости [58]. Получены зависимости, позволяющие оценить напряженное состояние вращающихся абразивных кругов в процессе эксплуатации.

Анализ результатов расчетов показал, что в зависимости от массы круга и скорости его вращения максимальные радиальные напряжения могут быть соизмеримы с пределом прочности материала круга на разрыв. Это обстоятельство накладывает повышенные требования к прочности сцепления заготовки.

Установлено, что расслоение будет происходить при радиальных напряжениях меньше, чем предел прочности материала на разрыв.

Таким образом, для абразивных кругов, изготовленных из рулонной заготовки, надежность сцепления компонентов заготовки оказывает непосредственное влияние на возможные эксплуатационные характеристики.

Однако, задача по определению напряженно-деформированного состояния применительно к стадии намотки исходной полосы из абразивно-вулканитовой композиции, силовых характеристик самого процесса, обеспечивающих необходимое и достаточное сцепление наматываемых слоев, не решалась. В то же время осуществление на практике данного способа и устройства представляют из себя сложную техническую проблему.

В работе [29] были также рассмотрены возможные варианты деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок. Варианты были представлены двумя группами. В первую группу вошли схемы деформации с осевым односторонним или двухсторонним сжатием, во вторую с радиальным сжатием.

Отмечается, что возможность выбора вариантов деформации нуждается в критериях их оценки. На этапе слабой изученности механизма сцепления и расслоения компонентов критерием выбора способов может служить неоднородность деформации по объему. При этом важно, чтобы математические модели всех сравниваемых вариантов были разработаны в рамках единого подхода и одинаковых допущений.

На этой основе с целью выявления характера взаимодействия инструмента с деформируемым материалом по заданному кинематически возможному полю скоростей из физических уравнений были определены касательные напряжения непосредственно у контактной поверхности. Для расчета средних напряжений, с которыми сравнивались приконтактные касательные напряжения – напряжения трения покоя использовались опытные данные работы [36].

Используя имеющуюся опытную информацию о коэффициентах трения скольжения [59] и расчетные значения средних нормальных напряжений (σ_c) при осадке с прилипанием были определены приближенные значения напряжений трения скольжения

$$\tau_s = f\sigma_c.$$

Полученные результаты дают основание полагать, что при непосредственном взаимодействии инструмента с деформируемым материалом напряжения трения покоя будут ниже напряжений трения скольжения на всей контактной поверхности, а при использовании в качестве промежуточной среды материалов с низким коэффициентом трения имеет место противоположная картина.

В связи с этим предлагается для первого случая принимать прилипание на контактной поверхности, а для второго случая скольжение.

Проведенное сравнение полученных результатов показало, что возможные варианты процессов деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок существенно отличаются степенью неоднородности деформации и энергоемкостью.

Опираясь на полученные результаты можно заключить, что окончательные выводы по вариантам деформации возможны лишь на основе более обстоятельных теоретических и экспериментальных исследований. В частности, прогнозирование расслоения заготовок вряд ли можно без информации о поле напряжений.

Проведенный анализ основных научных разработок посвященных процессам обработки давлением абразивно-вулканитовых смесей, показал, что наибольший объем выполненных исследований приходится на последние 10 – 15 лет. Исследованы реологические свойства среды, созданы и реализованы математические модели процессов смешения абразивного материала и вулканитовой связки во вращающихся валках, процесса прокатки листовой заготовки в клетях «дуо» и «трио». Использование полученных результатов в промышленности позволила в известной степени усовершенствовать существующие процессы, связанные с производством абразивных кругов на вулканитовой связке. Однако, обращает на себя внимание тот факт, что еще не

нашли должного теоретического, экспериментального исследования и обоснования разделительные и формообразующие операции, используемые при получении исходных заготовок абразивных кругов на заключительных этапах заготовительного технологического передела. Эти операции особенно важны, поскольку именно они определяют в итоге качество готовой продукции.

1.4. Анализ известных способов и устройств для получения мерных заготовок из сортового проката

По технологическому признаку все известные способы получения мерных заготовок из сортового проката можно разделить на две группы. Одна группа объединяет способы получения мерных заготовок, основанные на процессах механической резки, сопровождающиеся образованием отходов в виде стружки, металлических опилок и т.д. Другая – способы безотходного разделения сортового проката, основанные на процессах обработки металлов давлением.

Из способов входящих в первую группу в настоящее время в производстве используется резка на пилах, скоростная и обычная резка на металлорежущих станках, плазменная резка. В последние годы получила широкое распространение резка на лентопильных станках. Получаемые заготовки на таких станках отличает высокое качество поверхности среза и точность размеров, имеется возможность разрезать прокат большого сечения (350 мм и более). К недостаткам данного способа следует отнести низкую производительность и наличие отходов в виде мелких стальных опилок. Область применения этого способа ограничивается единичным и мелко серийным производством при высоких требованиях к качеству поверхности среза.

Плазменная резка, получившая применение в конце прошлого века, отличается высокой производительностью, но вследствие больших потерь

металла при сгорании и дефектов торцов от нагрева имеет ограниченное использование.

Холодная ломка проката [60] практически перестала применяться на производстве.

Вторая группа способов при всем своем многообразии в подавляющем большинстве предусматривают получение мерных заготовок путем сдвига отрезаемой части металла относительно другой. Эти способы исключают стружкообразование и обеспечивают получение относительно ровной плоскости среза [61]. Производительность таких способов более чем в 2 раза выше перечисленных ранее.

Безотходность, производительность, экономичность и возможность получения заготовок в соответствии с предъявляемыми требованиями по качеству поверхности среза и точности геометрических размеров предопределили явное преимущество в применении и дальнейшем развитии способов представленных во второй группе.

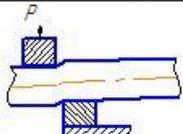
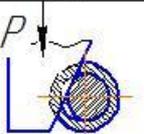
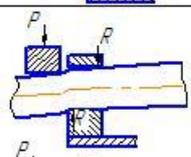
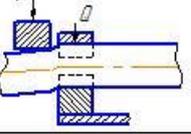
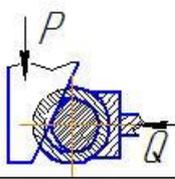
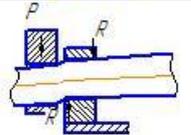
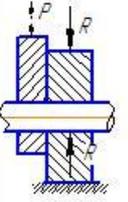
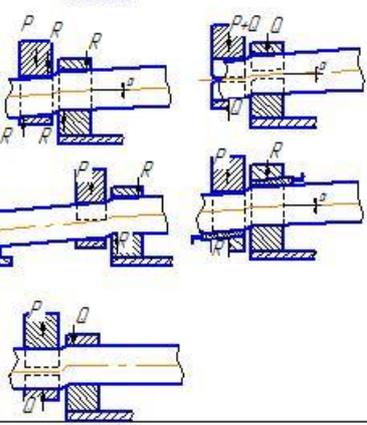
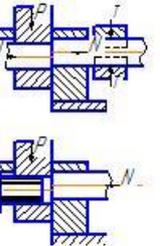
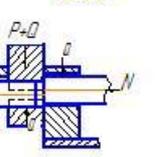
Анализ известных способов и схем безотходного разделения сортового проката сдвигом выполнен с использованием классификации (табл. 1.1), составленной на основе траектории смещения разделяемых частей относительно друг друга и степени ограничения перемещения металла в процессе разделения [62].

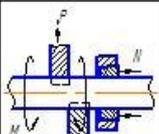
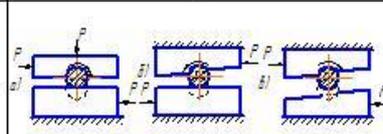
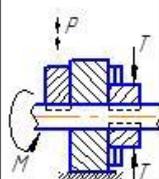
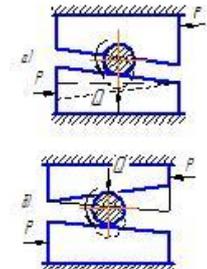
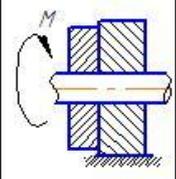
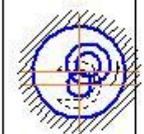
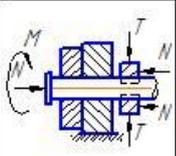
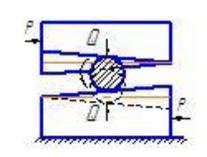
В работах [63 – 66] механические схемы разделения рассматривают в зависимости от степени ограничения течения металла: открытая резка, не полная открытая резка, не полная закрытая и закрытая резка.

Способ, основанный на поступательном перемещении разделяемых частей в одном направлении (п. 1.1, табл.1.1), который реализован в схемах 1.1 – 4.1 (табл.1.1), достаточно хорошо исследован и освещен в научно-технической литературе [67].

Классификация способов и механических схем разделения сортового проката

СДВИГОМ

№	Способы и механические схемы разделения проката сдвигом	Характер относительного перемещения разделяемых частей		
		Поступательное в одном направлении	Поступательное с одновременным вращением	Поступательное в двух направлениях
		1	2	3
1	Открытая без прижима			
2	Неполная открытая 2.1 с пассивным поперечным прижимом			
	2.2 с активным поперечным прижимом			
3	Неполная закрытая 3.1 с пассивным поперечным прижимом			
	3.2 с активным поперечным прижимом			
4	Закрытая с осевым сжатием 4.1 с пассивным поперечным прижимом			
	4.2 с активным поперечным прижимом			

№/п/п	Способы и механические схемы разделения проката сдвигом	Характер относительного перемещения разделяемых частей			
		По спирали	Радиально-ротационное	Радиально-эксцентриковое	Поступательное в двух направлениях с одновременным вращением
		4	5	6	7
1	Открытая без прижима				
2	Неполная открытая 2.1 с пассивным поперечным прижимом 2.2 с активным поперечным прижимом				
3	Неполная закрытая 3.1 с пассивным поперечным прижимом 3.2 с активным поперечным прижимом				
4	Закрытая с осевым скатом 4.1 с пассивным поперечным прижимом 4.2 с активным поперечным прижимом				

Открытая схема резки (поз.1.1, табл.1.1) не ограничивает перемещение штанги и отрезаемой заготовки в вертикальной плоскости. В результате в очаге деформации происходит свободный пластический изгиб отрезаемой части и растяжение, что приводит к повороту штанги и значительному искажению формы отрезаемой заготовки. Качество получаемых заготовок очень низкое и в современном промышленном производстве этот способ не используется (можно встретить в строительстве при разделке арматуры, где не предъявляются требования к геометрической точности заготовок).

Неполный открытый способ (схемы 2.1 табл.1.1) обеспечивает поперечный зажим разрезаемой штанги и тем самым ограничивает ее поворот и пластическое течение в очаге деформации, но при этом у отделяемой части остается возможность поворота. При разделении мягких металлов имеет место значительная утяжка и волнистость, на торце нередко возникают задиры, вырывы и другие дефекты, угол скоса торца достигает 10° , задний торец искажается больше, чем передний [62]. Применение способа ограничивается получением заготовок длиной не менее диаметра сечения для металлов средней и повышенной твердости, когда не предъявляются высоких требований к геометрической точности [68]. Получение точных заготовок этим способом возможно из низкоуглеродистого стального проката при высокой скорости (> 40 м/с) перемещения рабочего инструмента [69 – 71], но это потребует создания специальных не простых по конструкции ножниц.

Неполная закрытая резка (схемы 3.1, табл.1.1) исключает изгиб прутка и отрезаемой заготовки. Ограничение изгиба и уменьшение растягивающих напряжений в очаге деформации способствуют меньшим искажениям формы в сравнении с выше приведенными.

Благодаря этому неполная закрытая резка получила самое широкое распространение в заготовительном производстве. В большинстве конструкций ножниц для резки сортового проката реализована эта схема, которая позволяет получать заготовки длиной от $0,7$ поперечного сечения.

Применяемый в способе поперечный зажим может быть пассивным или активным.

Ножницы с пассивным зажимом широкого распространения в отечественном машиностроении не получили.

При активном зажиме, поперечные силы, могут быть постоянными по величине в течение процесса разделения, или изменяющимися по определенному закону (дифференцированный или следящий зажим). Это позволяет обеспечить более высокую геометрическую точность получаемых заготовок. При неполной закрытой резке имеют место последовательно протекающие и накладывающиеся друг на друга упругая деформация, пластическая и разрушение, в результате действия, которых происходит формоизменение заготовки.

Исследования [72] показали, что при неполной закрытой резке на качество полученных заготовок непосредственно влияет наличие поперечного и осевого зазоров, а также величина усилия поперечного прижима.

Поперечный зазор присутствует в механической схеме резки с пассивным поперечным прижимом (втулочные штампы) и всегда отрицательно влияет на качество резки. С его увеличением возрастает неоднородность напряженного состояния в очаге деформации, что становится причиной увеличения волнистости поверхности среза. При резке заготовок на сортовых кривошипных ножницах этот параметр устраняется за счет зажима прутка в ножах.

При неполной закрытой схеме резки, как с пассивным, так и активным прижимом большое влияние на качество отрезаемых заготовок оказывает осевой зазор между ножами. От его величины зависит качество поверхности среза и перпендикулярность торца заготовки. Оптимальная величина осевого зазора зависит от материала разрезаемого прутка и условий резки. Хорошее качество торца обеспечивается постоянством относительного осевого зазора по всему сечению разрезаемой штанги.

При закрытой резке с осевым сжатием (схема 4.1, табл.1.1) практически отсутствуют поперечный и осевой зазор. В этих условиях разделение осуществляется за счет сдвига без образования поверхности разрушения, благодаря созданию напряженного состояния всестороннего сжатия, величина которого превышает предел текучести разрезаемого материала. Данный способ позволяет получать точные по форме и объему заготовки из прутков круглого сечения выполненных из некоторых цветных металлов и сплавов длиной до 0,1 диаметра.

Отсутствие поперечного и осевого зазора значительно увеличивает контактные напряжения, действующие на инструмент. Это приводит к снижению стойкости инструмента. Силы трения, позволяющие создать осевое сжатие в плоскости разделения, препятствуют получению длинных заготовок. Превышение осевых усилий почти вдвое усилия резки резко ограничивает диаметр разрезаемых прутков даже на мощном оборудовании. Вследствие высокого контактного трения в зоне реза происходит схватывание металлов заготовки и ножей, образуются задиры и налипание. Положительные результаты получены только при резке заготовок ограниченного диаметра из пластичных сплавов на основе меди и алюминия ограниченного диаметра. Для резки стальных заготовок этот способ не применяется.

Отрезка заготовки клиновым ножом от прутка размещенного во втулке посредством сдвига с одновременным ее вращением (схемы 1.2 – 2.2, табл.1.1) ограничивается небольшими диаметрами, при этом качество поверхности среза несколько выше в сравнении с разделением только за счет сдвига.

При поступательном перемещении разделяемых частей в двух направлениях и знакопеременном характере прикладываемого усилия резки (схема 3.3, табл.1.1) окончательное отделение отрезаемой заготовки происходит при меньшем (на 10...15%) усилии в сравнении со статическим его приложением, а заготовки имеют меньшую относительную утяжку и смятие. Однако, имеются ограничения как по материалу проката пригодного для разделения таким способом, так и по размерам получаемых заготовок. Способ

обладает не высокой производительностью и требует применения специальных виброустановок [73,74].

Способы, предусматривающие перемещение разделяемых частей по спирали (схемы 3.4, 4.4, табл.1.1) [62] позволяют значительно уменьшить деформации исходного сечения прутка вблизи торца. Для осуществления этого способа требуется достаточно сложное в изготовлении, наладке и обслуживании оборудование. Результаты по исследованию данного способа не найдены.

Разделение исходного материала сдвигом за счет радиально-ротационного перемещения разделяемых частей (схемы 1.5 – 3.5, табл.1.1) по мнению разработчиков [62] обладают достаточной гибкостью. Их применение считается целесообразным в мелкосерийном и серийном производстве. Предусмотрена возможность получения заготовок с фаской на одном либо на обоих концах, либо без фасок.

В первом случае для получения заготовки к исходному прутку, неподвижно зафиксированного зажимом, прикладывают импульсное сдвигающее усилие. В результате на торце прутка, защемленном в неподвижной втулочной матрице, образуется сферический выступ, а на противоположном – соответствующая сферическая лунка.

Во втором случае к прутку, зафиксированному в ноже-матрице, прикладывается пульсирующее перемещающееся в радиальном направлении сдвигающее усилие посредством режущего элемента, выполненного в виде втулки. Возникающий при этом изгиб разделяемых частей ограничен пределами радиального зазора между разделяемым прутком, поверхностью режущего элемента и матрицы. Отрицательное влияние на качество получаемой заготовки наличия радиального зазора известно. Также требуется точная предварительная настройка режущего устройства и ее поддержание в процессе эксплуатации, жесткий контроль состояния режущего инструмента и т.д. При изменении материала разрезаемого прутка возникает необходимость переналадки не только инструмента, но в данном случае самого устройства.

Устройства, реализующие данный способ содержат несколько исполнительных механизмов с независимыми приводами, совершающих разные по характеру движения и создающие разные по способу приложения технологические усилия для выполнения только одной операции без совмещения с какими-либо другими. Устройства по своему исполнению и обеспечению согласованной работы нескольких исполнительных механизмов сложны. Сопоставление качества получаемых заготовок и связанных с этим затрат отсутствует. Экономическая эффективность не определена. Отсутствует оценка конкурентоспособности устройства с известными и более простыми устройствами, обеспечивающим получение заготовок близким по качеству к данному способу.

Но, можно отметить, что совершенствование способов получения мерных заготовок за счет усложнения траектории относительного перемещения прутка и отделяемой части в процессе резки при использовании достаточно простых схем разделения и устройств является одним из перспективных направлений.

Заготовки, получаемые за счет эксцентрично установленного режущего инструмента с возможностью перемещения в радиальном направлении (схема 3.6, табл.1.1) имеют вполне удовлетворительное качество при резке прутков из пластичных марок сталей диаметром до 60 мм, длиной больше диаметра.

Объединению преимуществ характерных для разных схем и повышению показателей геометрической точности получаемых заготовок могут способствовать схемы резки, основанные на поступательном перемещении разделяемых частей проката в двух направлениях с одновременным вращением (схемы 1.7 – 3.7), в частности, с использованием плоских ножей схема 3.7 (табл.1.1), которая обеспечивает неполную закрытую резку с активным поперечным прижимом усилием равным усилию резки [74].

Эта схема резки построена на усложнении траектории относительного перемещения прутка и отделяемой части начало исследованию, которой было положено в работах [74 – 79].

Под воздействием усилия $P_{пр}$ со стороны привода плоские клиновые ножи 1 и 2 (рис.1.7) совершают встречное движение, при котором происходит их сближение к центру разрезаемого прутка 3. В результате совместного сближения ножей и вращения прутка происходит постоянное смещение по его периметру прикладываемого усилия реза P_p со стороны кромок 4, 5 ножей 1, 2. В процессе резки прутка режущие кромки 4, 5 ножей 1, 2 внедряются в него, а выступы 6, 7 осуществляют поперечный зажим самого прутка и отрезаемой от него заготовки с усилием Q .

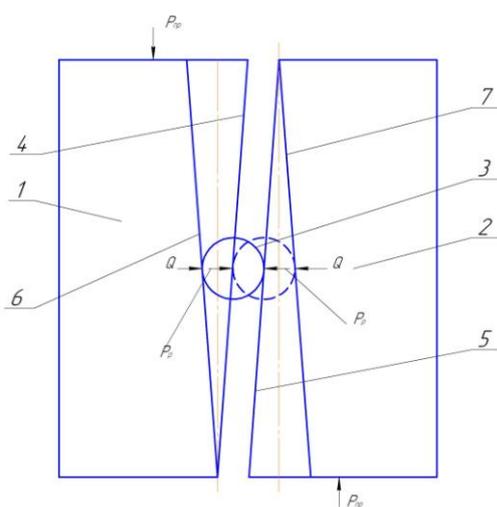


Рис.1.7. Принципиальная схема резки

В то же время этот процесс разделения проката на мерные заготовки можно также отнести к разновидности поперечной прокатки в валках переменного радиуса, когда за счет сил трения на контактной поверхности в очаг деформации вовлекаются все новые частицы заготовки, а за счет нормальных сил происходит смещение разделяемых частей относительно друг друга [80]. Академик А.И.Целиков в 60-х годах прошлого столетия указывал на возможность использования поперечной прокатки для получения заготовок в заготовительном кузнечном производстве. Однако, до настоящего времени, в данном направлении этот процесс остается не достаточно изученным.

К положительным особенностям приведенной схемы, которые следуют из предварительного анализа можно отнести следующее. Наличие поперечного зажима стабилизирует положение прутка и отрезаемой от него заготовки, что способствует получению ее с плоскими и перпендикулярными к ее оси торцами. В то же время постоянное перемещение точки контакта режущих кромок двух подвижных ножей относительно поверхности разрезаемого прутка в результате его вращения обеспечивает разделение прутка с меньшим усилием за счет непрерывного дискретного надрезания по всему периметру в плоскости реза вплоть до окончательного отделения отрезаемой части. Эта особенность приложения нагрузки препятствует образованию значительной утяжки, угла скоса торца и его волнистости.

Данная схема резки имеет достаточные резервы для развития и создания на ее основе различных вариантов исполнения.

Эффективность способов разделения проката непосредственно связана с реализующими их устройствами, которые достаточно многообразны по своему исполнению.

Рассмотрим известные устройства для разделения металлов и сплавов на мерные заготовки, получивших наибольшее распространение в отечественном и зарубежном заготовительном производстве.

В различных отраслях металлообрабатывающей промышленности для получения мерных заготовок из проката диаметром, не превышающим 60 мм, используются отрезные штампы [67 – 69, 71, 81]. По кинематике ножей отрезные штампы разделены на три группы: с поступательным, с вращательным и сложным движением ножей. Наибольшее распространение получили конструкции с поступательным перемещением ножей, в которых реализован не полностью закрытый способ с активным зажимом [69]. Штампы с вращательным движением применяются редко, а со сложным движением имеют пока лишь экспериментальное исполнение.

Разнообразие отрезных штампов с поступательным перемещением ножей в основном связано с применением различных механизмов зажима [69].

Получение заготовок более высокого качества представляется возможным в случае использования штампов с дифференцированным зажимом [69]. Принципиальное отличие таких штампов состоит в том, что усилие зажима прутка изменяется пропорционально усилию отрезки, за счет использования различных механизмов (клиновых, рычажных, кулачковых).

При известных достоинствах таких штампов общим и существенным для них недостатком является чрезмерная сложность конструкций и трудоемкость обслуживания. Это в ряде случаев является причиной отказа от их применения. Кроме того для таких штампов характерны повышенные затраты энергии на преодоление трения, которое в свою очередь приводит к интенсивному износу контактных поверхностей.

Современные конструкции отрезных штампов позволяют осуществлять совмещение формообразующей и разделительной операции [82 – 84]. При этом учитываются особенности механических свойств разделяемого материала и технических требований к заготовкам.

Применение кривошипных прессов общего назначения, как правило, открытого типа, обладающих низкой жесткостью, для резки заготовок в штампах приводит к существенному снижению их долговечности и сопровождается преждевременными поломками, вызываемыми действием значительных динамических нагрузок, особенно при работе на автоматических ходах.

Наибольшее распространение в отечественной и мировой практике получили ножницы с активным поперечным зажимом разрезаемого прутка по обе стороны от плоскости реза [85 – 89], поскольку они обеспечивают получение мерных заготовок более высокого качества в сравнении с другими известными способами резки сдвигом. Кроме того, возможно осуществление одноручевой и многоручевой резки проката в широком диапазоне изменений поперечных сечений исходной заготовки. Ножницы с постоянным зажимом выпускают отечественные специализированные предприятия по выпуску кузнечно-прессового оборудования, за рубежом фирмы Pels (Erfurt), Eumuco

(Германия), Fiser (Италия) выпускает ножницы с гидравлическим приводом, Lamberton (Англия) и др. [90, 91].

В то же время, некоторые иностранные фирмы выпускают ножницы с комбинированным зажимом: активным с постоянным усилием, прикладываемым к штанге и пассивным к отрезаемой заготовке [91].

В целом по конструктивному исполнению и технологическим возможностям отечественные и зарубежные конструкции ножниц принципиально мало отличаются друг от друга. Наибольшее распространение получили ножницы с механическим приводом [91]. Освоен выпуск кривошипных ножниц и автоматизированных комплексов на их базе для резки круглого, квадратного и полосового проката [85 – 89].

Сравнительно недавно разработанные отечественные конструкции ножниц, согласно технической характеристики, должны обеспечивать получение мерных заготовок отвечающих следующим требованиям: наименьшие колебания объема заготовок до $\pm 1\%$ от заданного, получение чистых, перпендикулярных оси заготовки торцов с отклонением не более $2...3^\circ$ и минимальными размерами торцового радиального заусенца, не более $0,01d$ – диаметра заготовки [89]. Однако, на самом деле заявленные показатели в производственных условиях не достигаются в полном объеме.

Важным фактором в получении качественных заготовок является правильность выбора и установки режущего инструмента, в частности обеспечение оптимального осевого зазора.

Высокая сложность настройки современных ножниц не позволяет даже в условиях серийного производства обеспечить стабильность режимов деформации, что становится причиной появления различных дефектов. В качестве примера можно привести следующее. Нарушение технологии резки штанг в холодном состоянии приводит к образованию торцовых или поперечных трещин, а увеличенный осевой зазор приводит к образованию вырывов на торцах.

Отклонение процесса резки от оптимальных режимов приводит к увеличению технологического усилия резки, что отрицательно сказывается не только на стойкости инструмента, но и надежности ножниц.

Смена инструмента, даже при используемой в последнее время частичной механизации, остается трудоемкой. Такая ситуация приводит к снижению производительности дорогостоящего оборудования и увеличению себестоимости, что делает нецелесообразным применение такого оборудования в условиях мелкосерийного и единичного производства.

Получению заготовок хорошего качества длиной до $0,8d$ способствуют ножницы с дифференцированным зажимом в случае оптимальной настройки. Однако, их высокая сложность настройки становится основной причиной резки заготовок в условиях совершенно не соответствующих оптимальным, независимо от объема производства.

Таким образом затраты на создание более совершенной, но в то же время и более сложной конструкции ножниц пока не позволяют использовать в полной мере заложенные в конструкцию преимущества.

Следует также отметить, что, не смотря, на тихоходность сортовых кривошипных ножниц при выполнении технологической операции они испытывают значительные динамические нагрузки.

Динамические нагрузки становятся одной из основных причин, вызывающей повышенный уровень шума и вибраций ножниц, а также целого ряда преждевременных поломок и разрушений деталей ножниц, в том числе и не воспринимающих технологическое усилие.

Необходимо наладить контроль с использованием технических средств за соблюдением технологии резки и диагностику оборудования, включая измерение силовых параметров процесса резки [92], взаимосвязанных с системой включения ножниц, исключив при этом возможность вмешательства в работу этих устройств рабочих. Эта работа требует проведения соответствующих экспериментальных исследований и сбора необходимой статистической информации, что позволит усовершенствовать известные

технические средства диагностики и контроля, адаптировать их к данным процессам.

В новых устройствах для резки сортового проката перспективно использование схем резки, которые обеспечивают предотвращение возникновения динамических нагрузок.

Обобщая выше изложенную информацию к основным недостаткам существующих сортовых ножниц можно отнести:

- высокую стоимость, металло-, энергоёмкость и сложность конструкций;
- узкую специализацию режущего инструмента и прижимов по размеру разрезаемых штанг, высокую трудоёмкость смены инструмента;
- значительную утяжку и большой угол скоса торцов отрезаемых заготовок от штанг из пластичных сталей и сплавов;
- ограниченные возможности получения коротких заготовок;
- отсутствие системы диагностики и контроля технического состояния ножниц, что приводит к поломкам вызываемых разовыми или систематическими перегрузками;
- недостаточную защищенность конструкций от воздействия динамических нагрузок, вызываемых сколом заготовки, приводит к преждевременному выходу из строя узлов и деталей ножниц, в том числе и не воспринимающих технологическую нагрузку, увеличивает затраты на межремонтное обслуживание;
- неэффективность применения в мелкосерийном и единичном производстве.

Исследования и разработки в области безотходного разделения стального проката, выполненные в 80 – 90 годах прошлого столетия показали, что увеличение скорости деформирования до 2,0...5,0 м/с при разделении проката позволяет повысить геометрическую точность получаемых заготовок. Наибольший эффект получен при резке проката из низкоуглеродистых сталей [67]. В то же время, при резке заготовок из титанового сплава и латуни улучшения качества не наблюдалось [61].

Ряд устройств, для высокоскоростной резки, в основном круглого мелкосортного проката из конструкционных, инструментальных, жаропрочных сталей и некоторых алюминиевых сплавов, основан на использовании энергии взрыва пороховых зарядов или газовых сред, сжатого воздуха [93 – 98]. Оборудование с применением взрывчатых веществ развития в промышленных условиях по известным причинам не получило. В качестве машины-орудия для импульсной резки применяют копры [97, 98]. При импульсной резке отходы ничтожно малы. Работа копра может быть автоматизирована.

В настоящее время внедрение скоростной резки сдерживается отсутствием промышленного оборудования.

Обобщая изложенное можно сказать, что подавляющее большинство известных разработок направлено на устранение двух основных недостатков имеющих место при резке сдвигом – косой срез и смятие торцов. Эти дефекты затрудняют последующую штамповку, а для механической обработки требуется предусматривать припуск на торцовку.

В работе [62] отмечается, что причиной этих дефектов является несимметричность деформации относительно оси заготовки при разделении в одном направлении. И там же справедливо указывается на перспективность решения этой проблемы за счет усложнения траектории относительного перемещения прутка и отделяемой части при использовании простейших схем разделения и простого оборудования. Это направление остается наименее разработанным и изученным и, по мнению авторов, работающих в этом направлении, перспективным.

1.5. Аналитический обзор теоретических разработок и экспериментальных исследований в области получения заготовок из сортового проката

Изучение и совершенствование разделительных процессов ведется на основе единой теории, устанавливающей закономерности и взаимосвязь пластического этапа и этапа разрушения [99 – 102].

Основу общей теории разделительных процессов составляют дифференциальные и интегральные методы вычисления [103].

Дифференциальными методами анализируются процессы энергосилового контактного взаимодействия элементарных объемов твердого тела в очагах деформации и напряженно-деформированного состояния.

Интегральные методы позволяют анализировать процессы энергосилового контактного взаимодействия инструмента с деформируемой заготовкой [104].

Используемые методы взаимно компенсируют и дополняют друг друга. Дифференциальный метод предпочтительнее в тех случаях, когда разрешимы математические затруднения, стоящие на пути интегрирования дифференциальных уравнений, а интегральные методы целесообразны, когда анализ и оптимизация процесса не могут быть выполнены дифференциальными методами.

При математическом моделировании разделительных процессов используются деформационная теория и теория пластического течения [105 – 110]. Экспериментально установлено, что для простого нагружения обе теории совпадают. Теория пластического течения позволила при шаговом анализе фиксировать момент перехода отдельных частей тела из упругого состояния в пластическое, и наоборот [111].

Так, в частности, при изучении этапа разрушения использовался критерий, предложенный В.Л. Колмогоровым [99], согласно которому условие деформирования металла без разрушения имеет вид

$$\psi = \int B(\tau)[H(\tau)/\lambda_p]d\tau < 1,$$

где H , B , λ_p – функции, описывающие связывающие напряженно-деформированное состояние и пластические свойства разрезаемого металла.

На основе использования зависимости можно прогнозировать глубину внедрения ножей в разрезаемый металл к моменту разрушения, а также определять параметры механической схемы и силового режима для осуществления процесса разделения пластическим сдвигом без разрушения [76, 77, 112].

Многообразие современных теорий пластичности, анализирующих процессы деформирования твердого тела дифференциальными методами, может быть разделено на две группы. Первая группа объединяет теории упруго-пластических деформаций, в основе которых лежат уравнения, определяющие связь между напряжениями и деформациями. Вторую группу образуют теории пластических течений, базирующиеся на уравнениях определяющих связь между напряжениями и скоростями деформаций.

Обе группы теорий предоставляют возможность построения замкнутых систем, в общем, нелинейных дифференциальных уравнений, определяющих процессы упруго-пластичного деформирования твердых тел.

Для определения общего случая пространственного упруго-пластического деформирования твердых тел используется замкнутая система, состоящая из восемнадцати нелинейных уравнений с восемнадцатью неизвестными [104]. В состав этой системы входят: три дифференциальных уравнения равновесия; шесть уравнений Коши или шесть уравнений неразрывности (условий Сен-Венана); шесть физических уравнений, отражающих конкретные свойства упруго-пластически деформируемого тела; три уравнения, определяющие интенсивность напряжений, деформаций и функциональную связь между ними.

С математической точки зрения эта система полностью определяет общее состояние пространственного упруго-пластичного деформирования твердого тела. Однако наличие большого количества нелинейных дифференциальных уравнений ограничивает возможность их решения в общем виде. Практически система имеет решение лишь в частных случаях, относящихся к одно или двумерным задачам (плоские, осесимметричные). Например, приведенная

система может быть использована при математической обработке данных, полученных экспериментально-теоретическим методом визиопластичности [113], используемого для определения деформированного и напряженного состояния в стационарных процессах плоского или осесимметричного течения. Такой подход был использован для анализа напряженного деформированного состояния в очаге деформации при не полностью закрытой отрезки сдвигом [114].

На основе экспериментальных исследований, выполненных методом визиопластичности, определялась функция перемещения частиц металла вдоль оси.

Аналогичные исследования были выполнены для не полностью закрытой отрезки с активным поперечным зажимом.

Подобные исследования отличаются достаточно высокой трудоемкостью. В работе В.Л.Колмогорова [115] высказывается замечание, что использование в исследованиях метода визиопластичности для определения напряженного состояния может сопровождаться существенными погрешностями, связанными с необходимостью обеспечения аппроксимации опытных данных о скоростях течения с высокой точностью. При этом, опытное определение приращений и координат узловых точек, содержит некоторую ошибку.

Применительно к схемам резки со сложной траекторией относительного перемещения прутка и отделяемой части (например, сдвиг с одновременным вращением) применение такого метода становится невозможным в виду не стационарности процессов с объемной механической схемой деформации. Кроме этого для математической обработки потребуется получение очень большого объема экспериментальных данных.

Применение метода муар [115] вместо обычных делительных сеток дает лучшую информацию о поле приращений перемещений или скоростей течения частиц в очаге деформации. Однако, как и в предыдущем случае, метод представляет определенные технические сложности, которые затрудняют

получение стабильных и объективных результатов с достаточной степенью точности.

По известным причинам поляризационно-оптический метод [116], используемый при физическом моделировании процессов обработки материалов давлением, не приемлем для исследования процесса резки сортового проката.

В классе трехмерных задач применяется метод расчета деформирующих усилий по приближенным уравнениям равновесий и условию пластичности [116 – 118].

Одно из положений этого метода предусматривает сведение задачи к осесимметричной или плоской. В случае сложной формы деформируемого тела необходимо разбить его на ряд объемов, на которые можно наложить условия осесимметричной или плоской задачи.

Для комбинированных схем нагружения, например, когда разделяемые части проката перемещаются поступательно в двух направлениях с одновременным вращением (см. схему на рис.1.1) не представляется возможным корректное разбиение процесса на ряд частей, на которые можно наложить условия двумерной задачи, поскольку в данном процессе имеют место два нестационарных, неоднородных циклических очага упруго-пластической деформации с объемными механическими схемами.

При анализе процессов обработки материалов давлением используются также методы верхней и нижней оценки [118], сопротивления материалов пластическим деформациям [119 – 124], баланса работ. Практика показала, что эти методы позволяют получить корректный результат при решении объемных задач, которые характеризуются стационарностью и возможностью сведения механической схемы деформации к двумерной задаче.

Так, например, при анализе резки сортового проката с использованием метода верхней оценки процесс резки разделяется на четыре стадии, каждой из которых соответствует единственно возможное поле скоростей.

Такой анализ позволяет разобраться с механизмом образования утяжины и формы поверхности среза, но картина деформированного состояния в зоне реза представляется достаточно приближенной.

В разделе 1.1 настоящей работы отмечалось, что схемы разделения проката, основанные на относительном поступательном перемещении разделяемых частей в двух направлениях с одновременным вращением можно также отнести к разновидности поперечной прокатки в валках переменного радиуса, когда за счет сил трения на контактной поверхности в очаг деформации вовлекаются все новые частицы заготовки, а за счет нормальных сил происходит смещение разделяемых частей относительно друг друга. Обоим процессам свойственны такие общие признаки как объемная механическая деформация, неоднородность напряженно-деформированного состояния в очагах деформации, локальность этих очагов и контактных поверхностей. Имеются признаки подобия в кинематических схемах движения инструмента и деформируемой заготовки.

При исследовании процессов поперечной прокатки в валках переменного радиуса используются интегральные методы.

Для энергосилового анализа таких процессов А.И. Целиковым разработан общий метод, который также как и некоторые выше изложенные методы предусматривают разбиение их на несколько этапов [125]: расчет площади контакта инструмента с деформируемой заготовкой; расчет энергосиловых характеристик исследуемого процесса, определяемых в виде аналитических функций от площади контакта, характеристик инструмента, деформируемой заготовки, средних контактных давлений и коэффициентов трения; сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными, на основании которого вычисляют средние контактные давления и коэффициенты трения в конкретных случаях.

Анализ процесса поперечной прокатки показывает, что энергосиловое взаимодействие инструмента с заготовкой достаточно сложное и при математическом моделировании требуется введение определенных упрощений.

Общий метод, разработанный А.И.Целиковым, был использован при построении математической модели для определения геометрии и кинематики очага деформации при резке сортового проката на ножницах с тангенциальным движением инструмента [78, 126]. Процесс разделения проката, основанный на относительном поступательном перемещении разделяемых частей в двух направлениях с одновременным вращением не стационарный, поскольку в каждый момент времени очаг деформации, а, следовательно, и все кинематические, геометрические и энергосиловые параметры изменяются.

Были выделены три стадии протекания процесса. На первой стадии площадь контакта между деформирующим инструментом и разделяемым металлом локализована в линию. По мере внедрения ножей возникает пластическая деформация местного характера – деформация смятия, вызванная тем, что в математической модели была принята схема разделения проката с зазором между ножами, что приводит к увеличению площади контакта за счет увеличения ее ширины. Дальнейшее развитие пластической деформации приводит к срезу в плоскости действия ножей.

Опасное состояние материала для сложного напряженного состояния, согласно энергетической теории прочности, наступает при достижении удельной потенциальной энергией некоторого предела. Для деформации пластичных материалов

$$\sigma = P / F_{\text{тек}} \leq [\tau],$$

где P – усилие, действующее со стороны ножей на металл; $F_{\text{тек}}$ – текущая площадь раздела металла; $[\tau] = 0,6[\sigma]$, здесь $[\sigma]$ – допустимое напряжение на растяжение.

При составлении баланса энергии и его составляющих использовалось основное энергетическое уравнение, представляющее математическую запись закона сохранения энергии, согласно которому подводимая для осуществления процесса энергия полностью тратится в очаге деформации.

Проведенное математическое моделирование позволило получить информацию о взаимосвязи геометрических и физико-механических характеристик заготовки и инструмента с кинематическими и энергосиловыми параметрами процесса. Полученная информация является первой и пока единственной применительно к исследованной схеме резки.

Для анализа разделительных процессов хорошо развит и широко используется метод линий скольжения [62, 68, 72, 79, 100, 127–131]. Полученные результаты расчета при использовании этого метода имеют экспериментальное подтверждение [62, 128, 131].

Из-за наличия этапа разрушения, при котором происходит зарождение и развитие трещины, анализ напряженного состояния выполняют для пластического этапа отрезки [100]. Принимаемые допущения: задача рассматривается как плоская; трение не учитывается или считается постоянным; упрочнение металла не учитывается; предложенные поля линий скольжения не отвечают граничным условиям в скоростях.

Применительно к процессу разделения сдвигом, в том числе основанным на относительном поступательном перемещении разделяемых частей в двух направлениях с одновременным вращением (рис.1.1), можно полагать, что форма и размеры границ разделения течения металла сохраняются неизменными на каждом элементарном этапе и скачком перемещаются в новое положение при переходе к следующему этапу. Форма сетки линий скольжения зависит от механической схемы резки.

Использование метода линий скольжения позволило на основе выявленных общих закономерностей деформирования заготовки рассмотреть общие картины развития пластического течения и различные стадии процесса разделения металла в условиях открытой резки, не полностью закрытой и закрытой, резки клиновыми ножами, ротационного разделения сдвигом. Установить закономерности разрушения заготовки и формирования поверхности среза, выполнить теоретическое обоснование управления процессами резки с целью получения качественных заготовок [68]. Но при этом

проведенный анализ также показал, что процессы разделения сортового проката за счет поступательного перемещения разделяемых частей в двух направлениях с одновременным вращением являются новыми, практически не изученными и не исследованными.

В целом по результатам анализа можно отметить, что задачи теоретического исследования процессов безотходного разделения исходного материала на мерные заготовки не зависимо от выбранного способа сводятся к определению следующих характеристик:

- кинематики относительного движения инструмента и разделяемого материала;
- изменений геометрической формы заготовок;
- интегральных сил и моментов, действующих на инструмент и разделяемый материал;
- средних контактных напряжений;
- энергозатрат на осуществление процесса.

Знание этих характеристик позволит не только выработать систему управления процессом резки, но и доказательно установить и объяснить преимущества и недостатки того или иного способа резки.

Современный инструментальный набор для проведения теоретических исследований достаточно широк. Интенсивно развиваются численные методы решения уравнений, появляются новые программные продукты, позволяющие моделировать процессы обработки материалов давлением с учетом характерных особенностей их осуществления. Но, в то же время остается постоянно высоким интерес к созданию инженерных расчетных моделей для использования в производственных условиях при проектировании инструмента, элементов конструкции силовых агрегатов и др.

При выборе того или иного метода теоретического расчета следует исходить из того, что погрешность вычисления выбранного метода должна находиться в пределах погрешностей используемых современных методов измерений вычисленных характеристик.

1.6. Постановка цели и задач исследований

Целью работы является 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.

Для достижения указанной цели необходимо решить следующие задачи:

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 получить информацию о напряженном и деформированном состояниях;

4. Выполнить расчетно-экспериментальное обоснование нового устройства с тангенциальным движением режущего инструмента для получения заготовок из сортового проката и устройств для измерения технологических усилий;

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

2. РАЗРАБОТКА НЕ ТРАДИЦИОННЫХ ФУНКЦИОНАЛОВ И АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА НДС

2.1. Состояние вопроса и постановка задачи

Точное решение системы дифференциальных уравнений механики сплошной среды в рамках ограничений прикладной задачи, которое бы соответствовало действительному напряженному и деформированному состоянию, достигается лишь в простейших случаях, имеющих ограниченный практический интерес. В связи с этим приоритет отдается приближенным методам, которые при необходимости позволяют уточнять решение. К таким методам относятся вариационные, в основе которых лежит ряд принципов и соответствующих вариационных уравнений, эквивалентных исходной системе уравнений механики сплошной среды [132,133]. Широкую известность получили вариационные принципы Лагранжа, Журдена, Кастильяно, Маркова и, наконец, принцип виртуальных скоростей (перемещений) и напряжений В.Л.Колмогорова [134,135], из которого названные выше принципы вытекают как частные при упрощенной постановке задачи.

Использование прямых методов при реализации вариационных принципов позволяет уточнять решение путем добавления членов ряда последовательности координатных функций для искомых параметров. Однако при этом усугубляется проблема минимизации функционалов. Проблемы в основном обусловлены неквадратичностью функционалов, которая в свою очередь является следствием не линейной связи напряжений со скоростями деформаций в физических уравнениях, а также между скоростью скольжения и напряжениями трения в законах трения.

Для решения указанной проблемы исследователями предлагаются различные варианты алгоритмов и нестандартные приемы, в той или иной мере позволяющие преодолеть математические трудности и получить приближенное решение. Однако, пока не найдено оптимального формализованного алгоритма.

Хорошо зарекомендовавший себя вариационный принцип виртуальных скоростей и напряжений для одновременного определения напряженного и деформированного состояний [134] остается пока достаточно трудоемким. Заметим также, что принцип не обеспечивает точного удовлетворения физических уравнений.

Ряд оригинальных приемов использован в работах [136 – 140].

Широкое распространение, благодаря своей универсальности, получил метод гидродинамических приближений [141] и метод упругих решений [142 – 145]. Суть методов заключается в том, что процедура минимизации не квадратичных функционалов заменяется минимизацией последовательности квадратичных функционалов. Такой подход обеспечивает достижение результата, однако, ценой увеличения объема вычислений.

Значительно проще реализуются вариационные задачи по анализу только деформированного состояния, например, на основе определения поля скоростей. Относительная простота объясняется меньшим числом неизвестных, богатой (по сравнению с напряжениями) опытной информацией, что немаловажно для постановки задач в подходящем варианте, а также большим числом и наглядностью граничных условий. Основной недостаток рассмотренного подхода заключается в том, что информация о напряженном состоянии деформируемой несжимаемой среды может быть получена из физических уравнений лишь с точностью до неизвестного гидростатического давления.

Известные экспериментальные методы определения напряженного и деформированного состояний и являются по своей сути экспериментально-аналитическими. Эти методы сталкиваются в конечном итоге с теми же проблемами, что и теория. Прямые методы замера напряжений внутри объема тела пока не разработаны. Вместе с тем достаточно хорошо разработаны методы экспериментального исследования деформированного состояния. Накоплен богатый экспериментальный материал. В этой связи представляется актуальной задача определения поля напряжений по экспериментально

найденному полю скоростей либо деформаций, как с точки зрения получения теоретических результатов, так и с точки зрения возможности обработки опытной информации.

Решению затронутой проблемы посвящено достаточно много работ. Например, в работе [146] предложен алгоритм расчета компонентов тензора напряжений в произвольной, но фиксированной точке тела по известному деформированному состоянию. При этом, как отмечают авторы, уравнения равновесия и физические уравнения в выбранной точке удовлетворяются точно, а граничные условия приближенно. Такой подход в работе [146] обосновывается тем, что практически не всегда требуется информация о напряженном состоянии по всему объему тела.

В работе [113] на основе метода визиопластичности делается попытка определения напряжений по полю скоростей. При этом для определения гидростатического давления авторы используют лишь одно дифференциальное уравнение равновесия, а именно то, для которого имеются достаточно четкие граничные условия. В этой связи в работе [134] отмечается, что произвол в выборе одного из дифференциальных уравнений равновесия с целью его точного удовлетворения путем решения относительно гидростатического давления и игнорирование второго дифференциального уравнения равновесия, которое не может быть тождественно удовлетворено, не может быть оправданным. Там же предлагается приближенный, но вместе с тем обоснованный вариант определения гидростатического напряжения, предусматривающий минимизацию функционала невязки в удовлетворении дифференциальных уравнений равновесия.

Сделанные предложения по существу сводятся к минимизации функционала невязки при удовлетворении дифференциальных уравнений равновесия взамен минимизации традиционного функционала.

Можно еще назвать ряд еще назвать работы [147 – 149], посвященные затронутой проблеме, в которых на основе нестандартных приемов добиваются приближенных результатов.

Таким образом, анализ известных работ, посвященных определению поля напряжений по известному полю скоростей, показывает, что оптимальный и вместе с тем достаточно формализованный алгоритм определения напряжений по полю скоростей еще не найден.

В целом многообразии подходов, зачастую недостаточно обоснованных, при использовании вариационных методов для определения напряженного и деформированного состояний в краевых задачах обработки материалов давлением в определенной мере можно объяснить не достаточной прозрачностью сути функционалов и вариационных уравнений известных принципов.

В заключение уместно привести комментарии к вариационным принципам, приведенные в работе [150] А.Г.Залазинским.

1) Вариационный принцип Лагранжа заменяет статические граничные условия и дифференциальные уравнения равновесия. Поле напряжений, найденное по полю перемещений (деформаций), может не удовлетворять дифференциальным уравнениям равновесия и граничным условиям в напряжениях.

2) Вариационный принцип Журдена, предназначенный для анализа больших пластических деформаций, позволяет определить поле скоростей, по которому с использованием определяющих уравнений могут быть найдены напряжения. Последние также могут не удовлетворять дифференциальным уравнениям равновесия и граничным условиям в напряжениях.

3) Вариационный принцип Кастильяно вводится на основе статически возможного напряженного состояния, удовлетворяющего уравнениям равновесия и статическим граничным условиям. Влечет за собой необходимость выполнения условий совместности деформаций.

4) Функционал принципа виртуальных скоростей и напряжений является как бы невязкой в удовлетворении определяющих уравнений.

Замечания В.Л. Колмогорова относительно минимизации нетрадиционного функционала, комментарии А.Г. Залазинского, а также

имеющие место в задачах ОМД отступления от классической постановки вариационной задачи послужили поводом для обобщений, касающихся существования функционалов и разработки на этой основе предложений по альтернативным функционалам и возможным алгоритмам определения напряженного и деформированного состояний в задачах обработки материалов давлением.

2.2. Нетрадиционные функционалы и алгоритмы определения напряженного и деформированного состояний

В основе данного раздела лежат следующие принципиальные и вместе с тем достаточно очевидные обобщения.

1. Все известные вариационные принципы используют в качестве функционала основное энергетическое уравнение (ОЭУ), представляющие на действительном НДС равенство нулю суммы мощностей (работ) внешних и внутренних сил и соответствующее (в смысле уравнений Эйлера) замкнутой системе уравнений механики сплошной среды. В дальнейшем этот функционал будем называть базовым.

2. На приближенном НДС, заданном конечным числом членов функциональных рядов с неизвестными (варьируемыми) коэффициентами, базовый функционал в общем случае представляет невязку при удовлетворении ОЭУ.

3. Вариационные уравнения, минимизируя невязку базового функционала, обеспечивают приближенное решение краевой задачи.

4. В зависимости от вариационного принципа минимизированная невязка при удовлетворении ОЭУ по существу является некоторой интегрированной (обобщенной) невязкой при удовлетворении, по меньшей мере, одной определенной группы уравнений, которые не были удовлетворены на этапе конструирования функциональных рядов. При этом минимизированная

невязка является усредненной по объему деформируемого тела и недифференцированной по отдельным уравнениям.

Проиллюстрируем отмеченные положения на примере реализации известных вариационных принципов в краевых задачах с медленным изотермическим течением несжимаемых сред.

Замкнутая система уравнений для указанных условий включает статические, кинематические граничные условия.

В известных работах, например, в работе [151] показано, что решение вариационных уравнений в зависимости от вариационного принципа тождественно решению тех или иных дифференциальных уравнений и удовлетворению статических либо кинематических граничных условий.

Вариационные принципы Лагранжа и Журдена, которые реализуются на основе кинематически возможного поля перемещений и скоростей перемещений, заданных с точностью до варьируемых параметров и удовлетворяющих геометрическим соотношениям и соответствующим граничным условиям, тождественны приближенному удовлетворению оставшейся группы уравнений, т.е. уравнений равновесия, физических уравнений и граничных условий в напряжениях. Очевидно, что функционалы принципов по своей сути являются функционалами некоторой усредненной по объему и недифференцированной по конкретным уравнениям невязки при удовлетворении перечисленной группы уравнений и статических граничных условий. Отсюда следует вывод, что поля перемещений и скоростей, определенные на основе рассматриваемых принципов, обеспечивают равновесие деформируемого объема и заданную физическую связь напряжений с деформациями либо со скоростями деформаций в целом для объема тела, т.е. на усредненном интегральном уровне. На локальном уровне дифференциальные уравнения равновесия и физические уравнения не удовлетворяются. Такое состояние деформируемого тела можно классифицировать как квазидопустимое в статическом и физическом отношениях.

Вариационный принцип Кастильяно реализуется на основе статически допустимых напряжений, заданных с точностью до варьируемых параметров и удовлетворяющих дифференциальным уравнениям равновесия и граничным условиям в напряжениях. Уравнения Эйлера, вытекающие из функционала принципа, тождественными физическим уравнениям, уравнениям совместности деформаций и кинематическим граничным условиям. Становится очевидным, что функционал принципа Кастильяно по своей сути является функционалом некоторой невязки, усредненной по объему и недифференцированной по конкретным уравнениям. Поле напряжений, определенное на основе принципа, обеспечивает удовлетворение физических и геометрических уравнений на среднем интегральном уровне. На локальном уровне эти уравнения не удовлетворяются. Таким образом, деформируемому телу обеспечивается квазидопустимое состояние в кинематическом отношении.

Принцип виртуальных скоростей (перемещений) и напряжений реализуется на заданных кинематически возможных полях скоростей и статически допустимых полях напряжений с точностью до варьируемых параметров. При этом заданные поля скоростей и напряжений удовлетворяют статическим и кинематическим уравнениям, а также соответствующим граничным условиям. Не удовлетворены только физические уравнения. Отсюда следует очевидный вывод, что функционал принципа по своей сути является функционалом невязки, усредненной по объему и недифференцированной по физическим связям между конкретными компонентами напряжений и деформаций. Таким образом, поля скоростей и напряжений, определенные на основе принципа, обеспечивают точное удовлетворение статических, кинематических уравнений и соответствующих граничных условий. Физические уравнения удовлетворяются лишь на среднем интегральном уровне. Иначе говоря, обеспечивается квазидопустимое в физическом отношении состояние деформируемого тела.

Результаты анализа позволяют сделать общий вывод для всех известных вариационных принципов вывод – функционалы известных вариационных

принципов являются невязками при удовлетворении тех или иных уравнений из состава замкнутой системы уравнений механики сплошной среды, которые минимизируются на основе соответствующих вариационных уравнений.

Ясная трактовка сути функционалов в отличие от их формального представления в виде некоторых математических выражений открывает перспективу поиска других более простых, но вместе с тем адекватных с точки зрения достижения необходимых результатов, функционалов и алгоритмов определения напряженного и деформированного состояний.

Рассмотрим некоторые из возможных функционалов и алгоритмов определения напряженного и деформированного состояний на примере осесимметричной деформации несжимаемой среды в цилиндрической системе координат.

Действительное напряженное и деформированное состояние удовлетворяет замкнутой системе уравнений механики сплошной среды и граничным условиям задачи. На действительном НДС тождественно удовлетворяется основное энергетическое уравнение.

В соответствии с методом Ритца искомые функции напряжений и скоростей представляются некоторыми функциональными рядами с ограниченным числом членов ряда и соответствующим числом неизвестных коэффициентов – варьируемых параметров. Ограниченность числа членов ряда предполагает приближенное решение краевой задачи. Становится очевидным, что при удовлетворении основного энергетического уравнения в общем случае будет иметь место невязка.

На стадии конструирования функциональных рядов для напряжений и скоростей перемещений часть уравнений и граничных условий замкнутой системы удастся удовлетворить. Например [152], при реализации принципа виртуальных скоростей и напряжений поле напряжений задается статически допустимым, а поле скоростей кинематически возможным, что обеспечивает удовлетворение статических и геометрических уравнений, а также соответствующих граничных условий. Остаются неудовлетворенными только

физические уравнения. Приближенное удовлетворение физических уравнений достигается на основе минимизации невязки при удовлетворении основного энергетического уравнения. Таков традиционный подход реализации принципа виртуальных скоростей и напряжений. Однако, очевидна и иная реализация указанной проблемы [153, 154].

Вариант 1.

Как показано в работе [152], аналогичные результаты могут быть получены на основе минимизации функционала невязки при удовлетворении непосредственно физических уравнений вместо минимизации базового функционала. При этом отмечено, что в принципе можно использовать два варианта функционала. Первый вариант функционала предполагает физическую связь между инвариантными характеристиками напряженного и деформированного состояний, а второй – между компонентами соответствующих девиаторов

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V T(r, z, a_k) - T(r, z, \beta_k)^2 dV \rightarrow \min \quad 2.1$$

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V \left\{ \begin{array}{l} S_{rr}(r, z, a_k) - S_{rr}(r, z, \beta_k)^2 + \\ S_{zz}(r, z, a_k) - S_{zz}(r, z, \beta_k)^2 \end{array} \right\} dV \rightarrow \min, \quad 2.2$$

где a_k – неизвестные параметры функциональных рядов для напряжений;

β_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;

$S_{i,j}(r, z, a_k)$ – компоненты девиатора напряжений, определяемые на основе статически допустимых напряжений;

$S_{i,j}(r, z, \beta_k)$ – компоненты девиатора напряжений, определяемые на основе кинематически возможного поля скоростей и физических уравнений.

Анализ методики, изложенной в работе [152] показал, что физические уравнения будут приближенно удовлетворены лишь в целом для деформируемого объема, т.е. на средне интегральном уровне. Корректное удовлетворение физических уравнений на локальном уровне (в произвольной точке деформируемого объема) минимизация невязки при удовлетворении интегральных уравнений не обеспечивает. Приближенное решение, найденное на основе принципа виртуальных скоростей и напряжений, соответствует квазидопустимому в физическом отношении состоянию.

В рассмотренных вариантах определения НДС функциональные ряды для напряжений и скоростей конструируются независимо друг от друга, что может усложнить процедуру минимизации невязок функционалов при удовлетворении физических уравнений. В частности система вариационных уравнений может не иметь решения по причине существенной несогласованности функциональных рядов для напряжений и скоростей. В связи с этим ниже предлагаются другие возможные алгоритмы определения НДС, предусматривающие независимое конструирование функциональных рядов.

Вариант 2.

После конструирования функциональных рядов для кинематически возможного поля скоростей, включающего неизвестные параметры a_k , из физических уравнений определяются только девиаторные составляющие

$S_{i,j}(a_k)$ компонентов тензора напряжений. С учетом $S_{i,j}(a_k)$ из дифференциальных уравнений равновесия определяются нормальные напряжения с точностью до функции интегрирования $f(r)$ и $f(z)$. Функция $f(r)$ представляется функциональным рядом с дополнительными коэффициентами $\beta_k (f(r) \rightarrow f(r, \beta_k))$, после чего $f(z)$ определяется из условия равенства нулю нормального напряжения на свободном от нагрузок контуре.

Использование физических уравнений при определении компонентов девиатора напряжений не обеспечивает удовлетворение физических уравнений в целом. Таким образом, решение задачи, как и в первом варианте алгоритма, сводится к минимизации функционала невязки (2.1) при удовлетворении физических уравнений.

Вариант 3.

В отличие от варианта 2 после конструирования функциональных рядов для кинематически возможного поля скоростей из физических уравнений предлагается определять касательные напряжения и нормальные напряжения с точностью до гидростатического давления. Удовлетворение дифференциальных уравнений равновесия сведется к их решению относительно гидростатического давления. Проблема состоит в том, что результат решения дифференциальных уравнений равновесия дает разные функциональные значения для гидростатического давления

$$\sigma_1(r, z, a_k) = \Phi_1(r, z, a_k) + f(z),$$

$$\sigma_2(r, z, a_k) = \Phi(r, z, a_k) + f(r),$$

где Φ_1 и Φ_2 – известные функции. Функция $f(z)$ и $f(r)$ определяются (задаются) так же, как и в варианте 2. В результате $f(r) \rightarrow f(r, \beta_k)$, а $\sigma_2(r, z, a_k) \rightarrow \sigma_2(r, z, a_k, \beta_k)$.

Очевидно, что неизвестные параметры a_k и β_k в данном случае могут быть найдены на основе минимизации функционала невязки при удовлетворении равенства гидростатических давлений, полученных в результате решения различных дифференциальных уравнений равновесия

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V [\sigma_1(r, z, a_k) - \sigma_2(r, z, a_k, \beta_k)]^2 dV \rightarrow \min. \quad (2.3)$$

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

Вариант 3.1

В отличие от варианта 3 после определения функции $f(z)$ за основу берется гидростатическое давление $\sigma(r, z, a_k) = \sigma_1(r, z, a_k)$, найденное из решения первого дифференциального уравнения равновесия. Очевидно, что второе дифференциальное уравнение равновесия при этом тождественно удовлетворяться не будет. Параметры a_k могут быть найдены минимизацией функционала невязки при удовлетворении второго дифференциального уравнения равновесия

$$J(a_k) = \int_V \left[\frac{\partial(S_{zz}(a_k) + \sigma(a_k))}{\partial z} + \frac{\partial S_{rz}(a_k)}{\partial r} + \frac{1}{r} S_{rz}(a_k) \right]^2 dV \rightarrow \min \quad (2.4)$$

В (2.4) под интегралом $S_{i,j}$ и σ известные функции независимых аргументов r, z и искомых параметров a_k . Из соображений компактности записи аргументы r и z в скобках упущены.

Если в варианте 3 приближенно удовлетворяются оба уравнения равновесия, то в варианте 3.1 приближенно удовлетворяется только второе уравнение, а первое – точно. Ошибка во втором случае, вероятно, будет больше, чем в первом.

Вариант 4

Недостаток вариантов 2 и 3 состоит в том, что при ограниченном числе членов функциональных рядов поля скоростей трудно прогнозировать напряженное состояние, так как напряжения определяются не функциями скоростей, а их частными производными. Иначе говоря, при достаточно корректно заданном поле скоростей, поле напряжений может оказаться не корректным. Проблема может быть устранена, если использовать следующий вариант алгоритма.

Поле напряжений задается функциональными рядами, удовлетворяющими дифференциальным уравнениям равновесия и граничным условиям, с точностью до неизвестных коэффициентов a_k . Для выполнения указанной процедуры удобно использовать функцию напряжений $\varphi(r, z, a_k)$ [149], связанную с напряжениями следующими зависимостями

$$\sigma_{rz} = \frac{\partial}{\partial r} \left[(1-\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right], \quad \sigma_{rr} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} \right],$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\nu \nabla^2 \varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right], \quad \sigma_{zz} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(2-\nu) \nabla^2 \varphi - \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right], \quad (2.5)$$

где ν - коэффициент Пуассона, для несжимаемой среды равный 0,5.

$$\nabla^2 \varphi = \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right). \quad (2.6)$$

Из физических уравнений определяются компоненты тензора скоростей деформаций ξ_{ij} . Последние должны удовлетворять условиям совместности деформаций. В частности для линейно вязкой среды, а также в случае линеаризации функционала на основе метода гидродинамических приближений удовлетворение условия совместности сводится к удовлетворению известного бигармонического уравнения

$$\omega(r, z, a_k) = \left(\frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \cdot \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} \right) = 0. \quad (2.7)$$

На этапе удовлетворения уравнения (2.7) может быть определена часть неизвестных коэффициентов, например, методом неопределенных коэффициентов. Заметим, что приближенно могут быть найдены все коэффициенты минимизацией функционала невязки при удовлетворении уравнения совместности

$$J(a_k) = \int_V \omega(r, z, a_k)^2 dV \rightarrow \min. \quad (2.8)$$

Далее из геометрических соотношений находится поле скоростей с точностью до функций интегрирования, которые обычно удастся определить из условий симметрии поля скоростей относительно осей координат. В более сложных случаях, по меньшей мере, одна из функций представляется функциональным рядом с дополнительными коэффициентами β_k . При этом некоторые граничные условия могут остаться не удовлетворенными, например, равенство нулю радиальной скорости течения на контакте с инструментом при условии прилипания, равенство вертикальной составляющей скорости материала на границе с инструментом, скорости инструмента и т.п.

Коэффициенты, оставшиеся неопределенными, могут быть найдены путем минимизации функционалов невязки при удовлетворении оговоренных выше кинематических граничных условий. Для примера ниже показан функционал невязки при удовлетворении условия прилипания на контакте с инструментом ($z=h$)

$$J(a_k, \beta_k) = \int_S [v_r(r, h, a_k, \beta_k)]^2 ds \rightarrow \min. \quad (2.9)$$

Не исключена совместная минимизация нескольких функционалов, например, функционала невязки при удовлетворении условия прилипания и условия равенства вертикальной составляющей скорости течения материала на границе с инструментом скорости инструмента. Вместо совместной минимизации двух функционалов можно минимизировать один функционал, представляющий сумму двух первых.

Результат решения задачи в рассмотренном варианте алгоритма будет точно удовлетворять дифференциальным уравнениям равновесия, физическим уравнениям и статическим граничным условиям. Условия совместности могут быть определены либо точно (метод неопределенных коэффициентов), либо приближенно на основе минимизации соответствующего функционала невязки. Частично кинематические граничные условия могут быть удовлетворены

точно, а частично приближенно путем минимизации невязки при их удовлетворении.

Вариант 5

Вариационный принцип виртуальных скоростей (перемещений) претендует на определение только деформированного состояния. Вместе с тем, как уже отмечалось, известны многочисленные попытки определения поля напряжений на основе найденного (не содержащего неизвестных коэффициентов) поля скоростей. Для несжимаемого материала определение поля напряжений сведется к решению дифференциальных уравнений равновесия относительно гидростатического давления, удовлетворению граничных условий в напряжениях и последующей минимизации невязок при удовлетворении равенства гидростатических давлений, полученных в результате решения различных дифференциальных уравнений равновесия. Алгоритм по существу сводится к варианту 3. Вместе с тем имеется принципиальное различие. Суть различия алгоритмов состоит в том, что по варианту 3 поле скоростей и напряжений определяются совместно, а по варианту 5 за два этапа. На первом этапе определяется поле скоростей на основе минимизации базового функционала невязки, а на втором этапе определяется поле напряжений при заданном поле скоростей на основе минимизации нетрадиционного функционала.

Вариант 3 предпочтительней варианта 5, так как имеются большие возможности для адаптации поля скоростей и напряжений, что в конечном итоге должно обеспечить более высокую точность и упростить процедуру минимизации функционалов.

Возможны и другие варианты определения поля напряжений по заданному полю скоростей. В частности в работе [134] предложено гидростатическое давление задавать функциональным рядом, который должен удовлетворять граничным условиям в напряжениях. При этом коэффициенты

ряда будут находиться из функционала невязки при удовлетворении системы дифференциальных уравнений равновесия. Вариант по существу предусматривает поэтапное независимое варьирование поля скоростей и поля напряжений. На первом этапе неизвестные коэффициенты поля скоростей находятся на основе минимизации базового функционала, а на втором этапе находятся коэффициенты поля напряжений на основе минимизации функционала невязки при удовлетворении дифференциальных уравнений равновесия.

Вариант 6

Вариационный принцип виртуальных напряжений (принцип Кастильяно) претендует на определение только поля напряжений. При этом найденное на основе минимизации базового функционала поле напряжений удовлетворяет точно дифференциальным уравнениям равновесия и статическим граничным условиям. Остальные уравнения замкнутой системы удовлетворяются приближенно с некоторой усредненной по объему и недифференцированной по отдельным уравнениям невязкой. Информация о поле напряжений при необходимости может быть использована для анализа формоизменения. Для этого необходимо определить поле скоростей (перемещений) по заданному полю напряжений. Процедура определения поля скоростей будет такая же, как и в варианте 4 алгоритма. Однако определенное на основе минимизации базового функционала невязки поле напряжений может не удовлетворять уравнениям совместности. В этом случае поле скоростей не может быть найдено, либо потребуется определить поле напряжений более корректно с последующей попыткой удовлетворения условий совместности деформаций.

Принципиальное отличие алгоритмов по вариантам 4 и 6 состоит в том, что в варианте 4 осуществляется совместное определение поля напряжений и скоростей, а в варианте 6 за два этапа, на каждом из которых осуществляется независимая минимизация двух различных функционалов.

Вариант 4 предпочтительнее в связи с лучшими возможностями для адаптации поля напряжений и поля скоростей.

Вариант 7

При конструировании кинематически возможного поля скоростей в ряде случаев достаточно проблематично удовлетворить всем кинематическим граничным условиям и условию несжимаемости. Например, при сложной геометрии деформируемого объема попытки удовлетворить всем требованиям, предъявляемым к кинематически возможным полям скоростей, приводят либо к необоснованному усложнению функциональных рядов, либо заканчиваются безрезультатно. Выход из этой ситуации в частности находят применением разрывных решений, использованием штрафных функций и т.д.

По нашему мнению в некоторых случаях может оказаться эффективным требование к функциональным рядам ограничить выполнение граничных условий, а условие несжимаемости удовлетворять приближенно на основе минимизации следующего функционала невязки

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V \xi_{ii}(r, z, a_k, \beta_k)^2 dV \rightarrow \min. \quad (2.10)$$

Заметим, что минимизация функционала (2.10) в общем случае будет осуществляться совместно с минимизацией каких-либо других функционалов, представленных в вариантах 1 – 6.

Вариант 8

Предусматривает определение НДС при деформации сжимаемой среды. Замкнутая система уравнений будет иметь дополнительное определяющее уравнение для шаровых составляющих тензора напряжений

$$\sigma = \sigma(\xi \dots), \quad (2.11)$$

где $\xi = \frac{1}{3} \xi_{ii}$ – скорость относительного изменения объема,

... - предполагается зависимость гидростатического давления от каких-либо других параметров процесса деформации, например, степени деформации, температуры и т.д.

В принципе могут быть использованы варианты алгоритмов, рассмотренные выше (по понятным причинам за исключением варианта 7). При этом в варианте 1 к функционалу (2.1) либо (2.2) должен быть добавлен функционал невязки при удовлетворении реологической связи между шаровыми составляющими соответствующих тензоров

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V [\sigma(r, z, a_k) - \sigma(r, z, \beta_k)]^2 dV \rightarrow \min, \quad (2.12)$$

где $\sigma(r, z, a_k)$ – гидростатическое давление, определенное на основе заданного поля скоростей и физического уравнения (2.11);

$\sigma(r, z, \beta_k)$ – гидростатическое давление, определенное на основе заданного поля скоростей и физического уравнения (2.11).

Минимизация функционалов (2.1) и (2.12) должна осуществляться совместно либо указанные функционалы должны быть объединены в один функционал, представляющий сумму двух первых.

При реализации варианта 3 в отличие от несжимаемой среды гидростатическое давление, как и остальные компоненты тензора напряжений, будет определено по заданному полю скоростей. На этом этапе часть неизвестных коэффициентов может быть определена из граничных условий для напряжений, а оставшиеся коэффициенты – путем минимизации функционала невязки при удовлетворении двух дифференциальных уравнений равновесия

$$J(a_k) = \int_V \left[\frac{\partial \sigma_{zz}(a_k)}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rz}(a_k)}{\partial z} + \frac{1}{r} \sigma_{rz}(a_k) \right]^2 dV \rightarrow \min, \quad (2.13)$$

$$J(a_k) = \int_V \left[\frac{\partial \sigma_{rr}(a_k)}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}(a_k)}{\partial z} + \frac{1}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) \right]^2 dV \rightarrow \min. \quad (2.14)$$

Минимизация (2.13) и (2.14) должна осуществляться одновременно либо функционалы объединены суммированием.

Вариант 5, предусматривающий определение напряжений по окончательному полю скоростей (не содержащему варьируемых параметров) для сжимаемого материала позволит определить компоненты тензора напряжений из физических уравнений. Дифференциальные уравнения равновесия и граничные условия, очевидно, будут удовлетворены приближенно на среднем интегральном уровне благодаря процедуре минимизации базового функционала при определении поля скоростей. Возможности для уточнения поля напряжений в рассматриваемом случае отсутствуют.

Вариант 6 может быть использован без изменений.

2.3. Возможные пути совершенствования алгоритмов

На основании вывода о том, что традиционный (базовый) функционал представляет по своей сути некоторую интегрированную (обобщенную) невязку в результате неудовлетворения каких-либо уравнений из состава замкнутой системы, были предложены альтернативные варианты функционалов, представляющих невязки при удовлетворении тех конкретных уравнений, которые не удалось удовлетворить при разработке математической модели. В этой связи становится очевидным, что перечень возможных функционалов, вероятно, не ограничивается функционалами, представленными

в предыдущем разделе. Важно иметь в виду, что при любой постановке задачи наряду с базовым функционалом всегда можно найти альтернативный функционал, использование которого может оказаться предпочтительнее по каким-либо соображениям.

Процедура минимизация всех рассмотренных выше функционалов сопровождается интегрированием, дифференцированием и решением в общем случае не линейной относительно искомым параметров системы алгебраических уравнений. Практика решения краевых задач обработки материалов давлением показывает, что на этапе минимизации функционалов достаточно часто возникают математические трудности, сопровождающиеся значительным временем расчета, нестабильностью расчетной процедуры в случае изменения исходных данных, отсутствием решения системы вариационных уравнений. Указанные проблемы усугубляются с увеличением числа варьируемых параметров и неквадратичностью функционалов. Зачастую существующие программные средства компьютерной математики не позволяют решить указанные проблемы. В этой ситуации исследователи вынуждены заниматься решением проблем сугубо математического характера, отвлекаясь от конкретных профессиональных прикладных задач.

Можно полагать, что возможность выбора функционалов и алгоритмов в определенной мере позволит смягчить математические трудности. Вместе с тем кардинальное решение проблемы требует поиска неординарных подходов. Ниже предлагаются вниманию два нетрадиционных подхода, направленных на решение затронутых проблем.

2.3.1. Поэтапная минимизация невязок

Фрагменты поэтапной минимизации функционалов невязок прослеживаются в разделе 2.2. Так, в вариантах алгоритма 4 и 5 поля напряжений и скоростей определялись соответственно по заданным полям скоростей и напряжений. При этом предполагалось, что заданные поля

скоростей и напряжений были определены на основе принципа виртуальных скоростей и напряжений, предусматривающих минимизацию невязки базового функционала. На следующем этапе определялись поля напряжений (вариант 4) и скоростей (вариант 5) с использованием процедуры минимизации невязок соответствующих нетрадиционных функционалов. Такой подход при определении напряженного и деформированного состояний по существу означает независимость варьируемых параметров поля скоростей и поля напряжений в отличие от вариантов, предусматривающих одновременное определение всех параметров из единой системы уравнений, связывающей параметры поля скоростей и поля напряжений. Идея поэтапного определения неизвестных параметров, по нашему мнению, имеет право на существование и практическое применение. В этой связи она может быть дополнена некоторыми другими вариантами ее реализации.

Представляет интерес идея, высказанная в работе [152] согласно которой «...если функционал является невязкой при удовлетворении равенства адекватных по существу функций, то можно потребовать удовлетворения равенства частных производных (в принципе любого порядка) этих функций по аргументам r и z , равенства смешанных производных и, наконец, равенства самих функций».

Целесообразность такого подхода заключается в том, что частные производные могут зависеть от меньшего числа варьируемых параметров. Таким образом, 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.

Так, по варианту 2 алгоритма после решения дифференциальных уравнений равновесия относительно гидростатического давления и

удовлетворения граничных условий получаем два решения: $\sigma_1(r, z, a_k)$, $\sigma_2(r, z, a_k, \beta_k)$.

На первом этапе потребуем равенства смешанных производных на основе минимизации функционала

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V \left[\frac{\partial^2 \sigma_1(r, z, a_k)}{\partial r \partial z} - \frac{\partial^2 \sigma_2(r, z, a_k, \beta_k)}{\partial r \partial z} \right]^2 dV \rightarrow \min. \quad (2.15)$$

На втором этапе потребуем равенства первых частных производных на основе минимизации функционала

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V \left[\frac{\partial \sigma_1(r, z, a_k)}{\partial r} - \frac{\partial \sigma_2(r, z, \beta_k)}{\partial r} \right]^2 dV \rightarrow \min \quad (2.16)$$

либо функционала

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V \left[\frac{\partial \sigma(r, z, a_k)}{\partial z} - \frac{\partial \sigma(r, z, a_k, \beta_k)}{\partial z} \right]^2 dV \rightarrow \min, \quad (2.17)$$

либо

$$J(a_k, \beta_k) = \int_V [A(r, z, a_k, \beta_k)^2 + B(r, z, a_k, \beta_k)^2] dV \rightarrow \min, \quad (2.18)$$

где через А и В обозначены выражения в квадратных скобках соответственно первого и второго функционалов, представленных выше.

На третьем этапе оставшиеся неопределенными на предыдущих этапах коэффициенты находятся из функционала (2.3) невязки при удовлетворении равенства самих функций.

2.3.2. Дискретно-локальный метод минимизации невязок

Существующие программные комплексы позволяют обеспечить замену процедуры интегрирования и минимизации функционалов на решение конечного числа алгебраических уравнений, представляющих невязки при удовлетворении соответствующих уравнений, которые по своей сути представляют невязки при удовлетворении соответствующих уравнений в конкретных точках деформируемого тела. Для этого исследуемая зона разбивается равномерной определенного вида сеткой, а для узловых точек записывается уравнение невязки. В результате получаем систему уравнений вида [152]

$$T(r_i, z_j, a_k) - T(r_i, z_i, \beta_k) = 0, \quad (2.19)$$

где r_i и z_i – координаты узловых точек.

При этом, следует иметь в виду, что с увеличением числа уравнений минимизированная невязка будет расти, но вместе с тем приближаться к фактической минимизированной невязке. В пределе при бесконечном числе уравнений следует ожидать получение точного значения невязки, когда решается не переопределенная система вариационных уравнений. В последнем случае минимизированная невязка является усредненной по всему объему тела, а в предлагаемом варианте – минимизированной и усредненной лишь для узловых точек тела. Эффективность предлагаемого приближенного метода может быть оценена непосредственным расчетом невязок в произвольных, не совпадающих с узловыми, точками тела после нахождения коэффициентов.

В заключение принципиально важно отметить, что предлагаемый вариант дискретно-локальной минимизации невязок коренным образом решает проблемы, связанные с неквадратичностью функционалов.

2.3.3. К вопросу о целесообразности использования гипотезы о несжимаемости

Существует мнение [150], что для компактного материала относительное изменение объема на всей стадии конечного (большого) формоизменения носит упругий характер. Иначе говоря, при развитой пластической деформации имеет место малое упругое изменение объема, но вместе с тем вызывающее значительные средние нормальные напряжения, которыми нельзя пренебречь при расчете напряжений. Это обстоятельство приводит к проблемам определения поля напряжений при заданном поле скоростей (деформаций). В результате можно прийти к выводу, что использование гипотезы о несжимаемости становится неоправданным, если стоит задача определения поля напряжений по полю скоростей. Заметим также, что условие несжимаемости, являясь по сути дополнительным ограничением, приводит зачастую к проблемам конструирования кинематически возможного поля скоростей.

Для упрощения процедуры конструирования кинематически возможных полей скоростей, а также возможности определения поля напряжений по полю скоростей для компактных материалов целесообразно отказаться от гипотезы о несжимаемости деформируемых сред. При этом следует использовать гипотезу об упругом характере изменения объема на любой стадии конечного формоизменения.

Несжимаемую среду следует считать частным случаем сжимаемой, так как, последняя при необходимости может быть сколь угодно приближена к несжимаемой путем неограниченного увеличения модуля объемной деформации. Примером реализации этого положения может служить метод штрафных функций.

Математические модели, будучи разработанные на основе отмеченных выше положений, позволяют обобщить сжимаемые и несжимаемые материалы, придав им статус материалов с различной склонностью (вплоть до нуля) к объемному сжатию и расширению в процессе конечного формоизменения.

2.4. Апробация возможных алгоритмов определения НДС

2.4.1. Критерии оценки алгоритмов

Апробация возможных алгоритмов определения НДС осуществлялась на примере осадки сплошной цилиндрической заготовки в условиях прилипания на контакте с инструментом (рис.2.1) с учетом не линейно вязких свойств деформируемого материала.

Точность результатов оценивалась величиной невязок удовлетворения замкнутой системы уравнений и граничных условий. Если иметь в виду, что в основе алгоритмов лежат математические модели, в которых часть уравнений и граничных условий удовлетворена независимо от результатов решения, то оценка точности алгоритма по существу сводится к оценке величины минимизированных невязок при удовлетворении тех уравнений и граничных условий, которые не были удовлетворены ранее.

Как уже отмечалось, основные трудности численной реализации задачи имеют место при интегрировании и последующей минимизации функционалов. Известные методы численного интегрирования, дифференцирования и решения систем нелинейных алгебраических уравнений не всегда оказываются эффективными. Зачастую вычислительная процедура требует значительного машинного времени, характеризуется сбоями, вызванными, например, неудачными исходными приближениями при решении системы уравнений, а в ряде случаев решение вообще не достигается. Отмеченные обстоятельства и определяют в целом стабильность вычислительной процедуры на базе какого-либо известного метода численного интегрирования, дифференцирования и решения нелинейной системы уравнений.

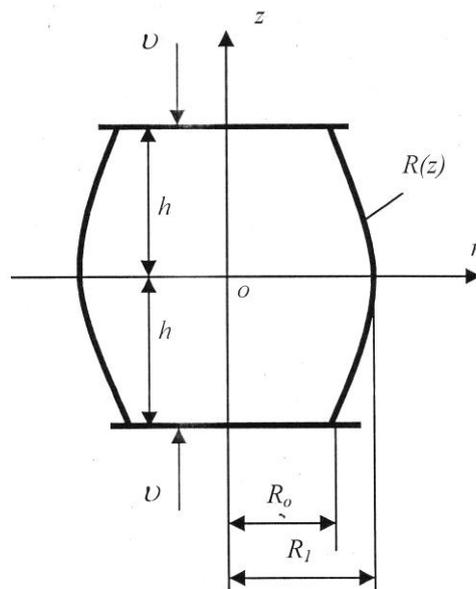


Рис.2.1. Схема осадки цилиндрической заготовки

В дальнейшем были использованы программные средства Mathcad Pro для Windows [154], которые численное интегрирование осуществляют на основе алгоритмов Ромберга, ускоряющих сходимость последовательности метода трапеций или метода прямоугольников к интегралу; для вычисления производных используют модифицированный метод Рунддера, а для решения систем уравнений и неравенств – итерационный метод Левенберга-Маркардта, позволяющий в случае переопределенной системы уравнений получать приближенное решение путем минимизации невязок.

2.4.2. Замкнутая система уравнений осесимметричной задачи

Принципиальная схема осадки цилиндрической заготовки приведена на рис. 2.1. Деформация характеризуется прилипанием на контакте с инструментом и образованием бочки, которая в зависимости от условий деформации может быть как одинарной, так и двойной.

Замкнутая система уравнений для несжимаемого материала включает следующее.

Дифференциальные уравнения равновесия

$$\frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r}(\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}) = 0, \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rz}}{r} = 0. \quad (2.21)$$

Физические уравнения:

$$\sigma_{rr} = S_{rr} + \sigma, \quad \sigma_{\varphi\varphi} = S_{\varphi\varphi} + \sigma, \quad \sigma_{zz} = S_{zz} + \sigma, \quad \sigma_{rz} = S_{rz}, \quad (2.22)$$

$$\text{где } S_{ij} = \frac{2T(H)}{H} = 2\mu(H)\xi_{ij}. \quad (2.23)$$

Геометрические уравнения

$$\xi_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad \xi_{\varphi\varphi} = \frac{v_r}{r}, \quad \xi_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r} \right). \quad (2.24)$$

Условие несжимаемости

$$\xi_{rr} + \xi_{\varphi\varphi} + \xi_{zz} = 0. \quad (2.25)$$

Граничные условия для скоростей

$$\begin{aligned} v_r &= 0 \text{ при } r=0; \quad v_r = 0 \\ \text{при } z = \pm h; \quad v_z &= 0 \text{ при } z=0; \quad v_z = \mp v \text{ при } z = \mp h \end{aligned} \quad (2.26)$$

Условие на контуре $R(z)$

$$\sigma_{rr} \cdot n_r^2 + \sigma_{zz} \cdot n_z^2 + 2\sigma_{rz} \cdot n_r \cdot n_z = 0, \quad (2.27)$$

где n_r и n_z – направляющие косинусы.

$$n_z = \sqrt{\frac{R'(z)^2}{1+R'(z)^2}}, \quad n_r = \sqrt{1-n_z^2}. \quad (2.28)$$

2.4.3. Известный алгоритм определения НДС , использующий нестандартный прием

При заданном поле скоростей определяются ξ_{ij} (2.24) и S_{ij} (2.23), записываются дифференциальные уравнения равновесия с учетом (2.23) и решаются относительно частных производных по аргументам r и z искомого среднего нормального напряжения σ

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = -\left(\frac{\partial S_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \frac{1}{r}(S_{rr} - S_{\varphi\varphi})\right), \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial z} = -\left(\frac{\partial S_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} + \frac{S_{rz}}{r}\right). \quad (2.30)$$

Интегрируя (3.29) и (3.30), получают

$$\sigma_1 = -S_{rr} - \int \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} dr - \int \frac{(S_{rr} - S_{\varphi\varphi})}{r} dr + f(z), \quad (2.31)$$

$$\sigma_2 = -S_{zz} - \int \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} dz - \int \frac{S_{rz}}{r} dz + f(r). \quad (2.32)$$

В уравнениях (2.31) и (2.32) все параметры кроме функций $f(r)$ и $f(z)$ определены. Задача сводится к нахождению указанных функций, которые бы обеспечили тождество $\sigma_1 = \sigma_2$ и удовлетворение граничных условий.

Приравнявая (3.31) и (3.32), получают уравнение вида

$$\phi_1(r, z) + f(z) = \phi_2(r, z) + f(r), \quad (2.33)$$

в котором функции $\phi_i(r, z)$ определены.

Далее на основе логических соображений и нестандартных приемов делается попытка упрощения задачи, связанной с определением двух неизвестных функций. В частности один из приемов предусматривает перегруппировку одночленов уравнения (2.33) таким образом, чтобы по одну сторону знака равенства находились одночлены, зависящие только от аргумента r , а по другую – только аргумента z . Этот прием приводит к упрощениям, если $\phi_i(r, z)$ представляют некоторую сумму функций, зависящих только от одного аргумента, например

$$\phi_i(r, z) = \psi_1(r) + \psi_2(z) + \dots + \psi_k(r) + \psi_k(z).$$

В этом случае результат перегруппировки (2.33) дает уравнение вида

$$\sum \psi_j(r) + f(r) = \sum \psi_j(z) + f(z), \quad (2.34)$$

из которого следует очевидный вывод о том, что левая и правая части уравнения должны быть равны некоторой константе C . В итоге, удается выразить две функции через одну константу

$$f(r) = C - \sum \psi_j(r), \quad f(z) = C - \sum \varphi_j(z). \quad (2.35)$$

Далее остается определить константу из граничных условий задачи. Для нахождения константы достаточна информация о напряжении лишь в одной точке области определения напряжений. Вместе с тем располагаем информацией о напряжениях на контурах $R(z)$, которая при определении константы будет не реализована в полной мере. Практически это означает, что граничные условия будут удовлетворены некорректно. Заметим также, что реализация рассмотренного приема достигается лишь в простейших краевых задачах, характеризующихся линейными физическими уравнениями и простой геометрии контура области определения напряжений. В общем случае функции $\phi_i(r, z)$ наряду с одночленами, зависящими только от одного аргумента, содержат одночлены вида, $\psi_j(r, z)$, т.е. зависящие от двух аргументов, в результате чего желаемая перегруппировка (2.34) не удается.

Для простейшего кинематически возможного поля скоростей

$$v_r = \frac{3\nu}{4h} \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) r, \quad v_z = -\frac{3\nu}{2h} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{z^2}{h^2}\right) z$$

и линейно вязкой среды ($T(H) = \mu H$, где $\mu = \text{const}$).

Рассматриваемый алгоритм приводит к следующим результатам

$$\sigma = -\frac{3}{4} \mu \frac{\nu}{h} \left[\frac{R_1^2}{h^2} \left(1 - \frac{r^2}{R_1^2}\right) + 2 \left(\frac{z^2}{h^2} + 1\right) \right],$$

$$\sigma_{rr} = -\frac{3}{4}\mu\frac{\nu}{h}\left[\frac{R_1^2}{h^2}\left(1-\frac{r^2}{R_1^2}\right)+4\frac{z^2}{h^2}\right], \quad \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{rr},$$

$$\sigma_{zz} = -\frac{3}{4}\mu\frac{\nu}{h}\left[\frac{R_1^2}{h^2}\left(1-\frac{r^2}{R_1^2}\right)+4\frac{z^2}{h^2}+6\right],$$

$$\sigma_{rz} = -\frac{3}{2}\mu\nu\frac{rz}{h^3}.$$

Напряжения удовлетворяют физическим уравнениям, дифференциальным уравнениям равновесия и граничным условиям на свободном контуре в одной его точке. В целом на контуре $R(z)$ условие равенства нулю нормального к контуру напряжения не выполняется.

Располагая только полем скоростей, приведенным выше, из основного энергетического уравнения можно найти усилие деформации P , которое должно дать верхнюю оценку усилия. В частности при $\mu = 0,15 \text{ Нс/мм}^2$, $h = 50 \text{ мм}$, $R_1 = 100 \text{ мм}$ и $\nu = 5 \text{ м/с}$ верхняя оценка усилия составила $2,4 \cdot 10^3 \text{ кН}$. Используя зависимость (3.36), получили $P = 2,121 \cdot 10^3 \text{ кН}$. Таким образом, усилие деформации, как и следовало, ожидать, уменьшилось. При корректном удовлетворении граничных условий на контуре $R(z)$ усилие, вероятно, будет еще ниже.

Для окончательных выводов по качеству полученного решения проанализируем ситуацию на контуре $R(z)$ с учетом полученных результатов.

Равенство нулю нормального напряжения на свободном от нагрузок контуре $R(z)$ требует выполнения уравнения (2.27). Записав (2.27) с учетом найденных выше напряжений и направляющих косинусов, получим уравнений вида

$$f(R(Z), R'(Z), z) = 0,$$

анализ, которого показывает, что (2.27) тождественно удовлетворяется лишь при

$$R(Z) = R = \text{const.}$$

В связи с этим усматривается противоречие между заданным полем скоростей, приводящим к образованию бочки, и полем напряжений, соответствующим ситуации, когда отсутствует бочка. При этом следует иметь в виду, что задача решалась для идеальной линейно-вязкой среды на основе простейшего подходящего поля скоростей. Становится очевидным, что использованный выше нестандартный прием имеет ограниченные возможности.

Корректное удовлетворение условия на контуре предполагает задание более сложного поля скоростей, включающего большее число варьируемых параметров. Например, использование поля скоростей с тремя варьируемыми параметрами позволило бы удовлетворить условие на контуре в трех его точках, а при четырех варьируемых параметрах – в четырех точках и т.д. Однако увеличение полноты функциональных рядов для скоростей приводит к невозможности реализации использованного выше нестандартного приема.

2.4.4. Апробация алгоритма с функционалом невязки при удовлетворении физических уравнений (вариант 2)

Поле скоростей задавалось полиномом 9-ой степени по независимым аргументам r и z . Часть коэффициентов полинома была определена методом неопределенных коэффициентов при удовлетворении всех кинематических граничных условий и условия несжимаемости. В итоге кинематически возможное поле скоростей включало пять неизвестных коэффициентов. Заметим, что математические выкладки с полиномами высокой степени в ручном варианте громоздки и трудоемки, что чревато ошибками. Эта проблема

была успешно решена путем использования символьных преобразований, которые обеспечивают программные средства Mathcad Pro.

Поле напряжений задавалось не независимо от поля скоростей, как это делается в вариационном принципе виртуальных скоростей и напряжений. По заданному полю скоростей из физических уравнений определялась девиаторная составляющая поля напряжений, т.е. S_{ij} , после чего из дифференциальных уравнений равновесия определялись нормальные напряжения с точностью до функций интегрирования $f(r)$ и $f(z)$. Функция $f(z)$ находилась из условия равенства нулю нормальных напряжений на контуре $R(z)$, а функция $f(r)$ в выражении для σ_{zz} задавалась пятью четными членами степенного ряда

$$f(r) = a_1 + a_2 \frac{r^2}{R^2} + a_3 \frac{r^4}{R^4} + a_4 \frac{r^6}{R^6} + a_5 \frac{r^8}{R^8}. \quad (2.37)$$

В итоге статически допустимое поле напряжений зависело от пяти параметров, унаследованных от поля скоростей, и от пяти параметров, содержащих в (2.37). В целом задача свелась к определению 10-ти неизвестных коэффициентов.

Заметим, что согласованность девиаторных составляющих поля скоростей и поля напряжений на основе физических связей упрощает процедуру минимизации невязок при удовлетворении физических, но в целом (с учетом шаровой составляющей) не обеспечивает удовлетворение физических уравнений.

Таким образом, задача свелась к определению неизвестных коэффициентов, при которых физические уравнения удовлетворялись бы наилучшим образом.

Попытка определения коэффициентов путем минимизации известного базового функционала принципа виртуальных скоростей и напряжений, а также предложенных в разделе (2.2) более простых функционалов программными

средствами Mathcad Pro не увенчалась успехом. Ситуация достаточно типичная для задач механики сплошной среды. Выход из нее обычно предполагает упрощение задачи либо применение (разработку) других программных средств численных решений. В нашем случае решение задачи было достигнуто использованием предложенного выше дискретно-локального варианта минимизации невязок при удовлетворении переопределенной системы физических уравнений.

Ниже приводятся результаты реализации задачи, выполненные при непосредственном участии автора диссертации и частично опубликованные в работе [152].

Сравнение расчетных значений соответствующих компонентов определителей T1 (интенсивность касательных напряжений, рассчитанная на основе поля напряжений) и T2 (интенсивность касательных напряжений, рассчитанная на основе интенсивности скоростей деформации сдвига с учетом определяющего уравнения) показывает, что физические уравнения в узловых точках удовлетворяются с высокой точностью.

$$T1 = \begin{vmatrix} 13.163.12.322.9.949.6.029.0.283 \\ 12.986.12.215.10.013.6.332.2.304 \\ 12.454.11.887.10.181.7.17..4.901 \\ 11.573.11.329.10.397.8.403.8.14 \\ 10.352.10.541.10.611.9.909.12.338 \end{vmatrix} \quad T2 = \begin{vmatrix} 13.059.12.339.10.129.6.046.0.323 \\ 12.91...12.225.10.115.6.25..2.298 \\ 12.481.11.908.10.121.6.937.4.893 \\ 11.822.11.469.10.295.8.307.8.299 \\ 10.409.10.442.10.31..10.228.13.161 \end{vmatrix}$$

Величину невязки при удовлетворении физических уравнений в произвольных точках деформируемого тела характеризуют графики на рис.2.2. Максимальное различие T1 и T2 не превышает двух процентов.

Решение по предложенному алгоритму, обеспечивая высокую точность удовлетворения физических уравнений, достигается в пределах одной минуты и характеризуется стабильностью вычислительной процедуры.

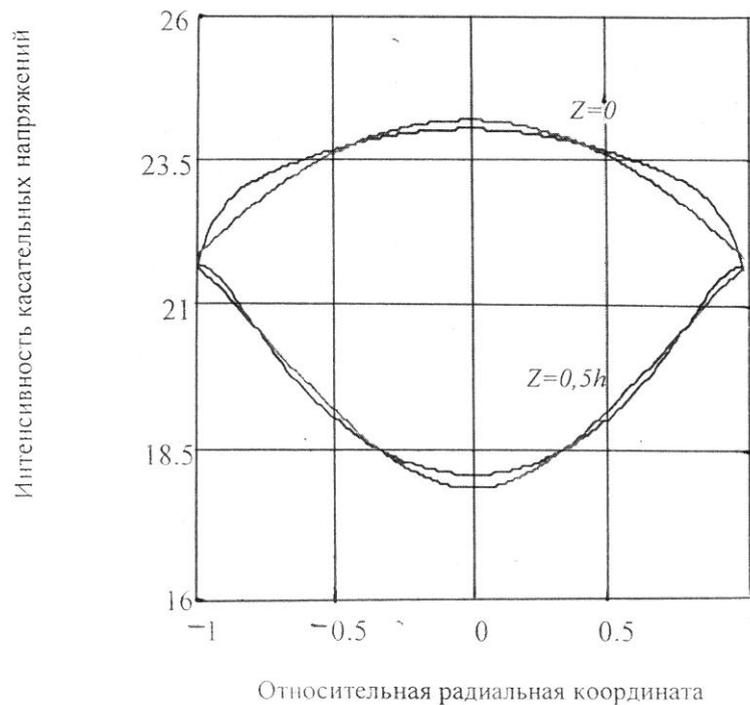


Рис.2.2. К анализу минимизированной невязки при удовлетворении физических уравнений

2.4.5. Апробация алгоритма с функционалом невязки при удовлетворении граничных условий (вариант 4)

Напряжения задавались с помощью функции напряжений, $\varphi(r, z, a_i)$, которая представляла полином 9-ой степени по аргументам r и z . Связь между коэффициентами полинома находилась методом неопределенных коэффициентов на основе удовлетворения бигармонического уравнения (2.7).

Аналитические выкладки, связанные с удовлетворением (2.7) и определением напряжений по (2.5), выполнялись с помощью операторов символьных преобразований Mathcad Pro. В виду громоздкости выражения для напряжений здесь не приводятся.

При заданных напряжениях из физических уравнений определяли компоненты тензора скоростей деформаций, после чего из геометрических уравнений находили скорости перемещения с точностью до неизвестных

функций $f(z)$ в выражении для v_r и $f(r)$ в выражении для v_z . Из условий $v_r = 0$ при $r = 0$ и $v_z = 0$ при $z = 0$ получили $f(r) = 0$, $f(z) = 0$. В итоге было получено поле напряжений и поле скоростей, включающее семь неизвестных коэффициентов.

Таким образом, на этапе задания поля напряжений и поля скоростей были удовлетворены точно дифференциальные уравнения равновесия, условие совместности скоростей деформаций (2.7), физические и геометрические уравнения. Не были удовлетворены граничные условия для скоростей $v_r = 0$ при $z = \pm h$ и $v_r = \bar{\tau}U$ при $z = \pm h$, а также условие на свободном контуре для напряжений. Задача свелась к нахождению семи коэффициентов a_i , при которых наилучшим образом удовлетворялись бы указанные выше граничные условия.

Как и в предыдущем варианте алгоритма, минимизация функционала была заменена дискретно-локальной минимизацией невязок при удовлетворении переопределенной системы алгебраических уравнений.

При семи неизвестных было записано 16 уравнений. При этом по 5 уравнений соответственно для удовлетворения условий $v_r = 0$ при $z = \pm h$, $v_r = \bar{\tau}U$ при $z = \pm h$ и 6 уравнений для удовлетворения равенства нулю нормального напряжения на свободном контуре.

Анализ полученных результатов показал, что величина невязки незначительна и не превышает 1,5%.

Как и в предыдущем случае, расчетное время не превышало одной минуты, сбоев процедуры расчета при изменении исходных данных не наблюдалось.

Таким образом, оба варианта алгоритма, предусматривающие замену минимизации функционалов невязок минимизацией невязок при удовлетворении переопределенной системы соответствующих уравнений, с

точки зрения принятых выше критериев оптимальности практически равноценны.

Анализ других вариантов алгоритмов при условии одинаковой полноты функциональных рядов также показал возможность их практического использования. Наиболее существенные, хотя и приемлемые, невязки имели место при решении переопределенной системы уравнений, представляющих равенство гидростатических давлений, полученных в результате решения дифференциальных уравнений равновесия (вариант 3).

В дальнейшем за основу анализа НДС различных вариантов деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок принят вариант 4 с минимизацией невязок при удовлетворении переопределенной системы уравнений, отвечающей за выполнение граничных условий.

2.5. Выводы по главе

1. В настоящее время пока отсутствуют методы анализа напряженного и деформированного состояний при обработке материалов давлением, которые могли бы составить серьезную альтернативу вариационным методам. Основным достоинством вариационных методов является возможность уточнения результатов решения на основе формализованной процедуры расширения полноты функциональных рядов, которыми описываются искомые функции.

2. К недостаткам вариационных методов следует отнести сложную и не всегда успешную процедуру минимизации не линейных функционалов. Это обстоятельство побудило исследователей к поиску различных нестандартных приемов, изысканию методов линеаризации функционалов, разработке различных вариантов алгоритмов поиска экстремума функционалов, применению зачастую недостаточно обоснованных допущений и т.д.

3. Несмотря на усилия исследователей, оптимальный алгоритм определения напряженного и деформированного состояний пока не найден. В

частности известные попытки определения поля напряжений по заданному полю скоростей нельзя признать успешным.

4. В решении определения напряженного и деформированного состояний может оказаться полезным изыскание неклассических функционалов, минимизация которых закономерно и логично вписывается в процедуру приближенного решения замкнутой системы уравнений краевой задачи обработки материалов давлением. К таким функционалам следует отнести функционалы невязок при удовлетворении тех или иных уравнений.

5. Разработаны возможные варианты алгоритмов определения напряженного и деформированного состояний, в основе которых в зависимости от постановки задачи лежат различные функции невязок.

6. С целью упрощения процедуры минимизации функционалов предложено поэтапное определение варьируемых параметров на основе минимизации нескольких функционалов.

7. С целью сокращения времени расчета, и повышения стабильности расчетной процедуры взамен минимизации функционалов предложен дискретно-локальный вариант минимизации невязок при удовлетворении переопределенной системы соответствующих уравнений, который может быть классифицирован как новый метод приближенного определения полей скоростей и напряжений.

8. Сделана оценка эффективности возможных вариантов алгоритмов определения НДС в краевых задачах обработки давлением. Показано, что предложенные алгоритмы достаточно эффективны как с точки зрения быстродействия, стабильности расчетной процедуры, так и точности результатов расчета.

3. НАПРЯЖЕННОЕ И ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АБРАЗИВНО- ВУЛКАНИТОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Существующая технология получения заготовок для высоких абразивных кругов предусматривает такие операции, как открытую осадку, так и осадку в пресс-форме, завершающуюся всесторонним сжатием заготовки. При этом обрабатываются как сплошные, так и полые цилиндрические заготовки. При производстве полых цилиндрических заготовок осадка в пресс-форме может осуществляться с оправкой для формирования полости и без оправки.

Материал заготовки представляет абразивную композицию на органической связке. Реологические свойства для данной композиции были исследованы в работе [134], в которой на основе обработки опытной информации получено определяющее физическое уравнение, по сути своей соответствующее нелинейно-вязкой среде. В дальнейшем указанное уравнение взято за основу.

В результате анализа возможных способов получения высоких цилиндрических заготовок было установлено, что их деформация характеризуется прилипанием на контакте с инструментом. Эта же ситуация имеет место при изготовлении средних и низких по высоте кругов. Данное явление было также взято за основу при разработке математических моделей в настоящем разделе.

Переход на новые схемы деформации в условиях действующего производства представляет в целом достаточно сложную задачу. Более актуальным и экономически оправданным в настоящее время является совершенствование существующих технологических процессов и операций. Математическое моделирование, которому посвящен настоящий раздел, может способствовать решению этой задачи.

3.1. НДС сплошной цилиндрической заготовки при открытой осадке

В основе расчета НДС всех рассмотренных ниже вариантов деформации цилиндрических заготовок лежат положения, изложенные в разделах 2.2 и 2.3. Основное внимание в данном разделе в отличие от раздела 2, где акцент делался на точность решения замкнутой системы уравнений и точность удовлетворения тех или иных ограничений в рамках принятой математической модели, уделяется анализу НДС по результатам расчета и адекватности математических моделей реальным процессам [155, 156].

На рис.3.1 – 3.7 представлена по возможности полная информация о напряженном и деформированном состоянии сплошных цилиндрических заготовок при открытой осадке в условиях прилипания на контакте с инструментом.

На рис. 3.1 показаны эпюры нормальных напряжений на контакте с инструментом при различном отношении высоты к радиусу заготовки. Под параметром K_{σ} принято отношение фактического напряжения к среднему нормальному напряжению, которое имело бы место при однородной деформации. Качественный характер зависимостей на рис. 3.1 не противоречит существующим.

На рис. 3.2 показана эпюра девиаторной составляющей нормального напряжения на контактной поверхности, позволяющая на качественном уровне сравнить результаты расчета с известными экспериментальными данными [118, 154] по компонентам девиатора напряжений при осадке прямоугольной свинцовой заготовки в условиях прилипания на контакте с инструментом. Сравнение показывает, что в качественном отношении наблюдается соответствие между расчетной и экспериментальной эпюрами.

Рис. 3.3 подтверждает известные положения о характере бочкообразования при сжатии цилиндров в зависимости от отношения их высотных и радиальных размеров.

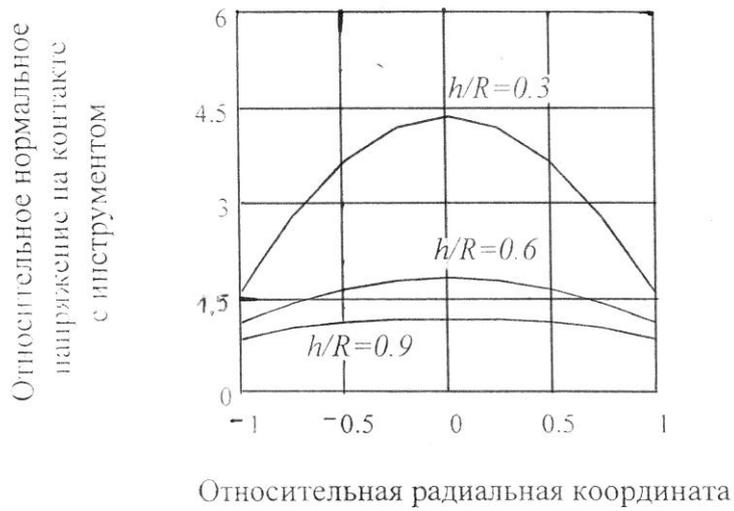


Рис. 3.1. Эпюры нормальных напряжений на контакте с инструментом

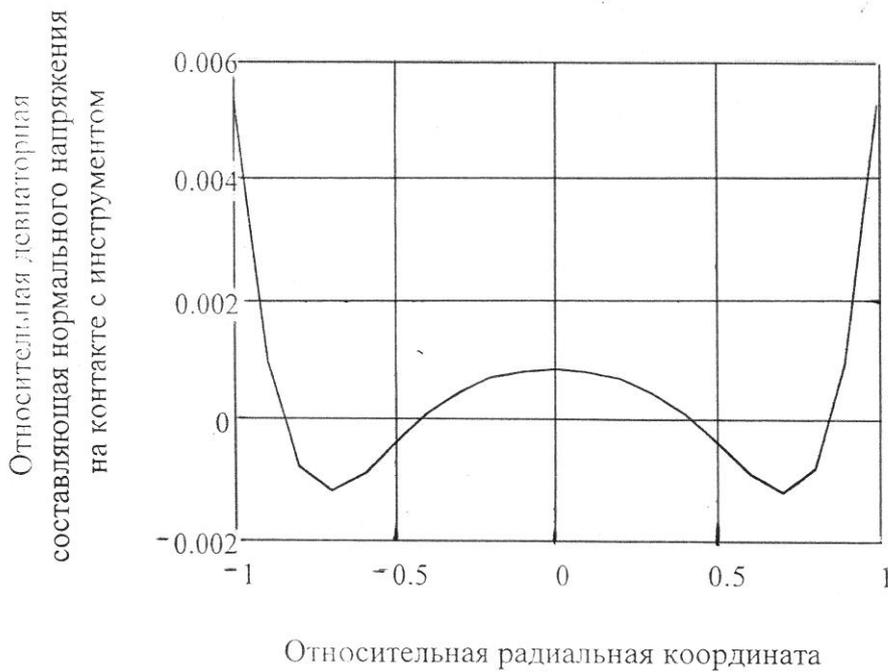


Рис. 3.2. Эпюра девиаторной составляющей нормального напряжения на контакте с инструментом ($h/R = 0,3$)

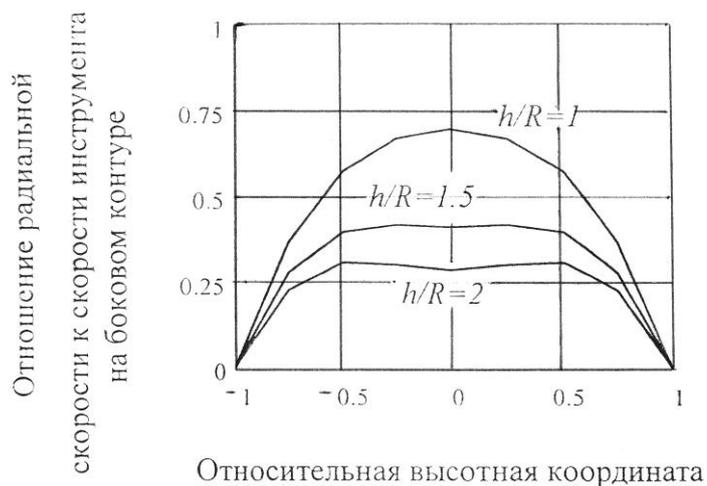


Рис. 3.3. К анализу формоизменения при осадке сплошного цилиндра

Рис. 3.4 показывает, что скорость перемещения материальных частиц в вертикальном направлении незначительно снижается по мере удаления от оси симметрии к боковому контуру. Такая закономерность тем выше, чем больше отношение высоты заготовки к ее радиусу. Подобная зависимость скорости V_z от радиальной координаты свидетельствует о возможности перехода материала заготовки с бокового контура на контактную поверхность с инструментом. Отмеченные положения подтверждаются опытом.

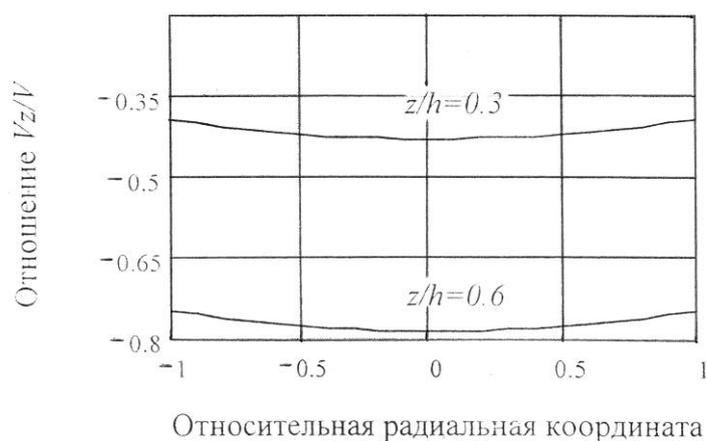


Рис. 3.4. Характер изменения вертикальной составляющей скорости течения материала в радиальном направлении ($h/R = 1$)

Кинематику течения материальных частиц при наличии прилипания характеризует векторное поле, представленное на рис. 3.5.



Рис. 3.5. Векторное поле скоростей перемещения материальных частиц при осадке сплошного цилиндра в условиях прилипания на контакте с инструментом ($h/R = 0,5$)

На практике, как правило, контролируется и регулируется не скорость движения инструмента, а усилие деформации. Рис. 3.6 показывает взаимосвязь этих параметров.



Рис. 3.6. Зависимость усилия деформации от скорости движения инструмента

На рис. 3.7 показаны карты линий уровня основных показателей напряженного и деформированного состояний. Левый ряд рисунков характеризует НДС при $h/R = 0.2$, средний ряд при $h/R = 0.5$ и правый ряд при $h/R = 1$. Цифры на оси абсцисс соответствуют относительной радиальной координате, а на оси ординат – относительной высотной координате. Все карты линии уровня отражают ситуацию в одной четверти деформируемой заготовки.

Независимо от отношения размеров цилиндра наибольшее значение интенсивности скоростей деформации сдвига (параметр K_n на рисунках) имеет место на центральном участке бокового контура. Вместе с тем на указанном участке среднее нормальное напряжение σ имеет (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 абразивных кругов подтверждает этот вывод. Расслоение многослойной заготовки обычно происходит на центральном участке бокового контура.

3.2. НДС полой цилиндрической заготовки при осадке с оправкой

Принципиальная схема процесса дана на рис. 3.8. На контакте с оправкой действуют напряжения трений τ , средние значения которых известны из опыта.

На контакте с инструментом имеет место прилипание. Контур $R(z)$ полагаем заданным.

В основу определения НДС положен тот же алгоритм и та же функция напряжений, что и при осадке сплошной цилиндрической заготовки. Отличие состоит в том, что вместо условия v_r при $r = 0$ имеет место $v_r = 0$ при $r = r_0$.

Учитывая несовершенство законов трения для условий ОМД и тот факт, что опыты обеспечивают приемлемую точность лишь для средних значений трения, принято решение учесть напряжения трения на средне интегральном уровне

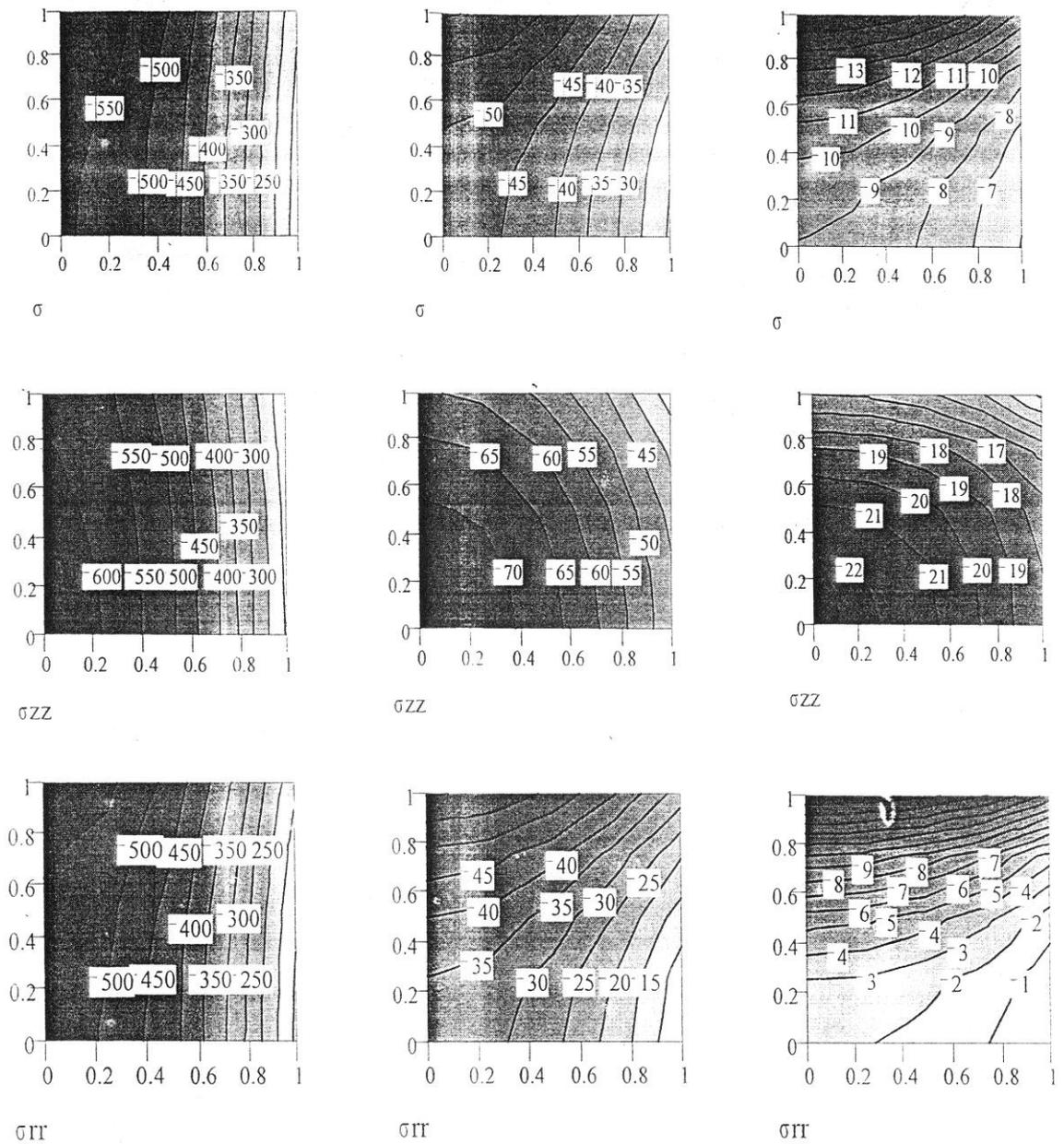


Рис. 3.7а. Карты линий уровня основных показателей НДС

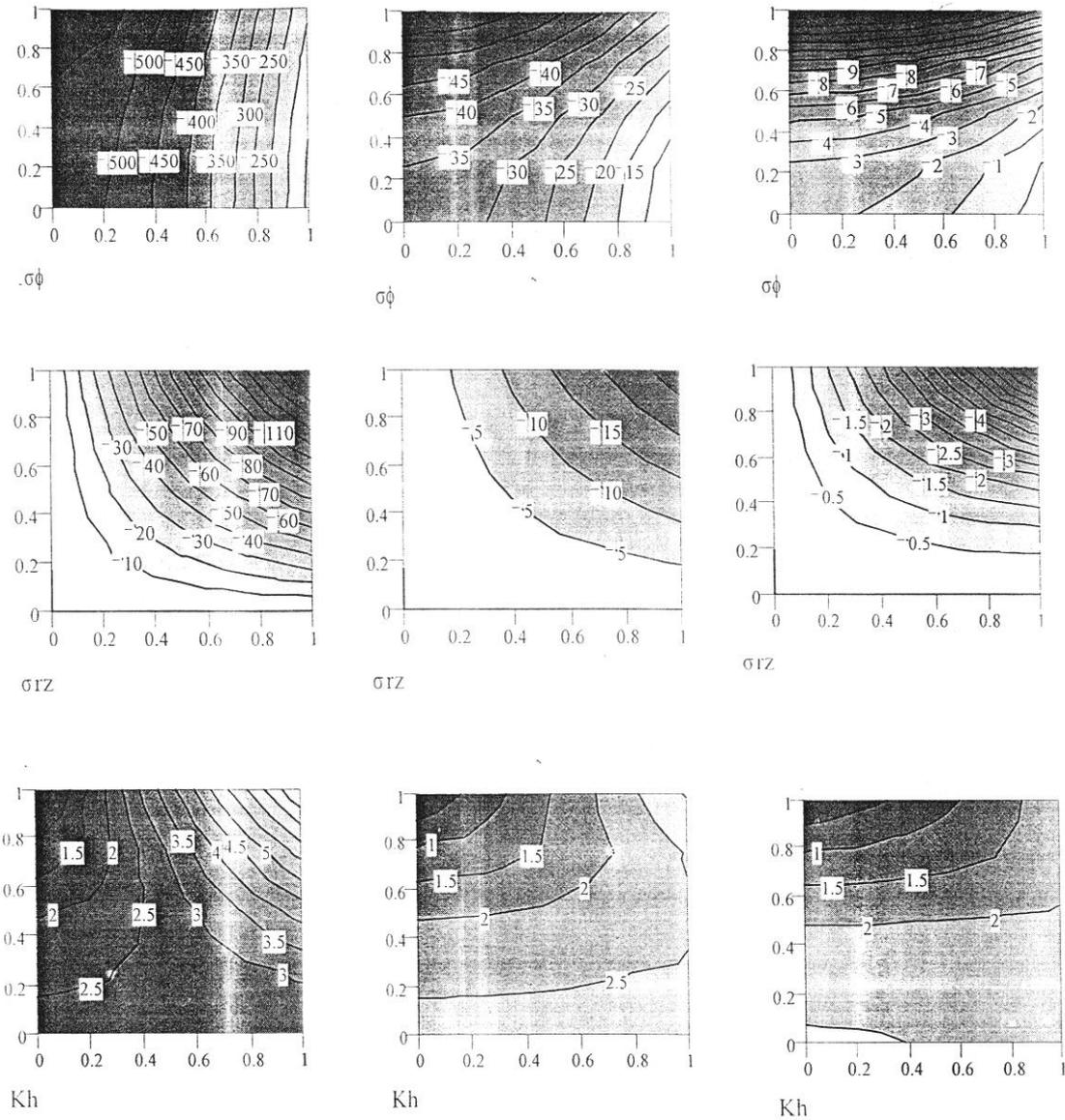


Рис. 3.7б. Карты линий уровня основных показателей НДС

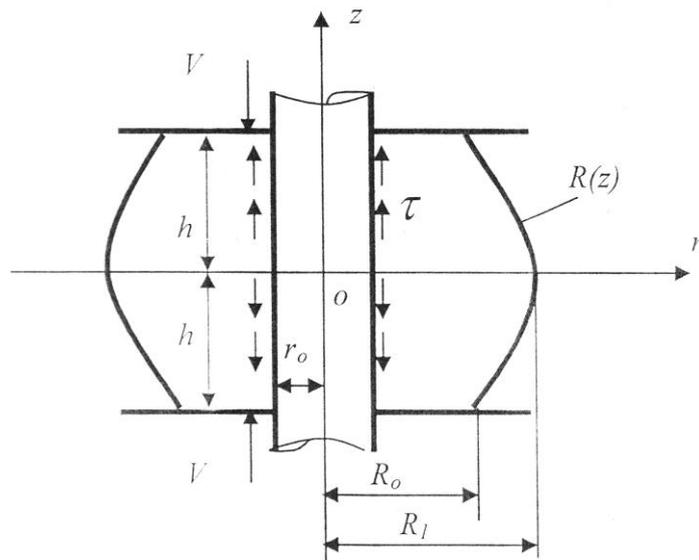


Рис. 3.8. Схема осадки полой цилиндрической заготовки с оправкой

$$\frac{1}{h_0} \int_0^h \sigma_{rz}(r_0, z) dz = -\tau, \quad (3.1)$$

где τ – среднее напряжение трения на контакте с оправкой.

Условием (3.1) дополнили переопределенную систему уравнений.

Заметим, что уравнение (3.1) можно было бы использовать для определения одной константы, уменьшив тем самым число неизвестных. Принципиальная разница двух возможных вариантов состоит в том, что во втором варианте приоритет отдается точному удовлетворению условия (3.1) в ущерб для минимизации невязки при удовлетворении других ограничений. В первом варианте, принятом за основу, условие (3.1), как и все остальные ограничения, будут удовлетворены с определенной минимизированной невязкой.

На рис. 3.9 – 3.14 приведены результаты расчета НДС, при осадке полого цилиндра с оправкой.

На рис. 3.9 показан характер распределения касательных напряжений на контакте с оправкой. Анализ показал, что с увеличением среднего значения

напряжения трения невязка при удовлетворении условия (3.1) снижается, экспоненциально приближаясь к нулю.

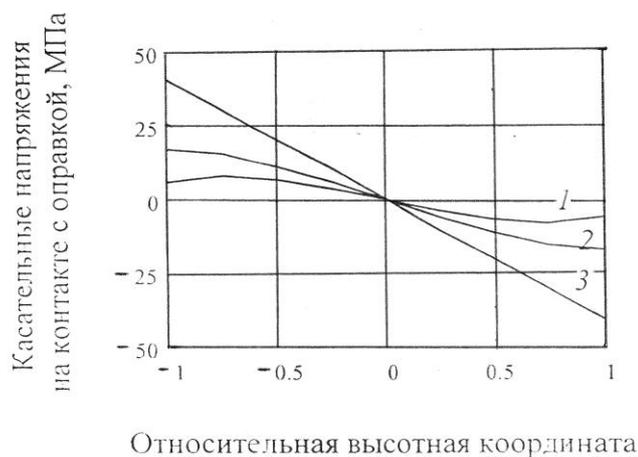


Рис. 3.9. Характер изменения касательных напряжений на контакте с оправкой ($h/R_0 = 0.3$; $r_0/R_0 = 0.5$)

При обработке абразивных композиций, как отмечалось ранее, напряжения трения соизмеримы с нормальными напряжениями на контактной поверхности. Это означает, что для реальных условий расчета невязка при удовлетворении условия (3.1) будет весьма не существенной.

На рис. 3.10 показаны эпюры нормальных напряжений на контакте с подвижным инструментом, а на рис. 3.11 эпюры радиальных напряжений на контакте с оправкой при различных значениях напряжений трения. С увеличением напряжений трения, как и следовало, ожидать, указанные напряжения растут (по модулю).

Номограммы, подобные показанной на рис. 3.12, позволяют в случае заданного усилия определить соответствующую скорость движения инструмента, чтобы по разработанным алгоритмам и программам оценить напряженное и деформированное состояние.

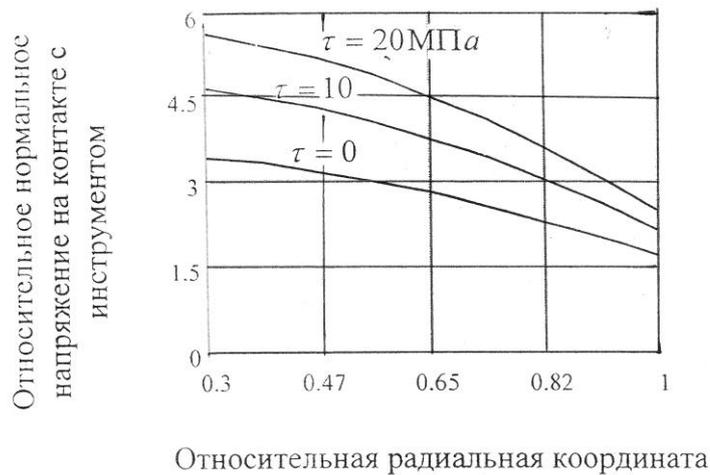


Рис. 3.10. Эпюры нормальных напряжений на контакте с инструментом при осадке полого цилиндра с оправкой ($h/R_0 = 0.3$; $r_0/R_0 = 0.5$)



Рис. 3.11. Влияние напряжений трения на радиальные напряжения, действующие на оправку ($h/R_0 = 0.3$; $r_0/R_0 = 0.5$)

Рис. 3.13. наглядно показывает характер течения материальных частиц в процессе деформации.

На рис. 3.14 показаны карты линий уровня основных показателей НДС для частного случая осадки полой цилиндрической заготовки ($h = 50$ мм, $R_0 = 100$ мм, $r_0 = 50$ мм). При этом в левый ряд рисунка помещены карты линий уровня для абсолютно гладкой оправки, в средний – при $\tau = 10$ МПа и в правый при $\tau = 20$ МПа.



Рис. 3.12. Взаимосвязь усилия деформации со скоростью движения инструмента ($r_0/R = 0.5$; $\tau = 20$ МПа)

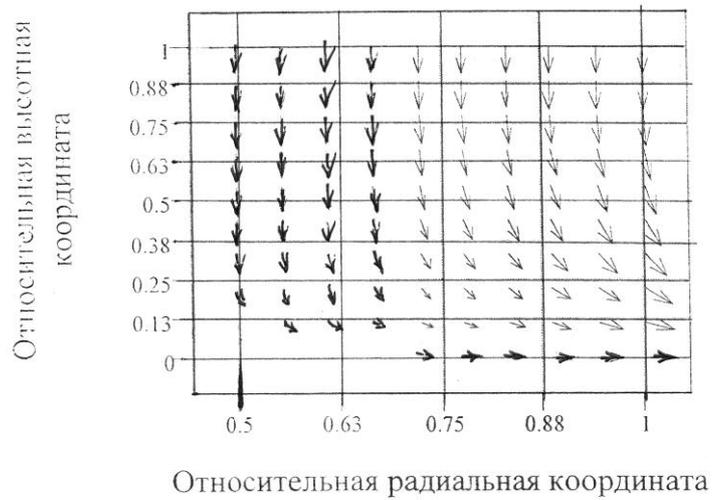


Рис. 3.13. Векторное поле скоростей перемещения материальных частиц при осадке полого цилиндра с оправкой ($r_0/R = 0.5$; $h/R = 0.5$; $\tau = 20$ МПа)

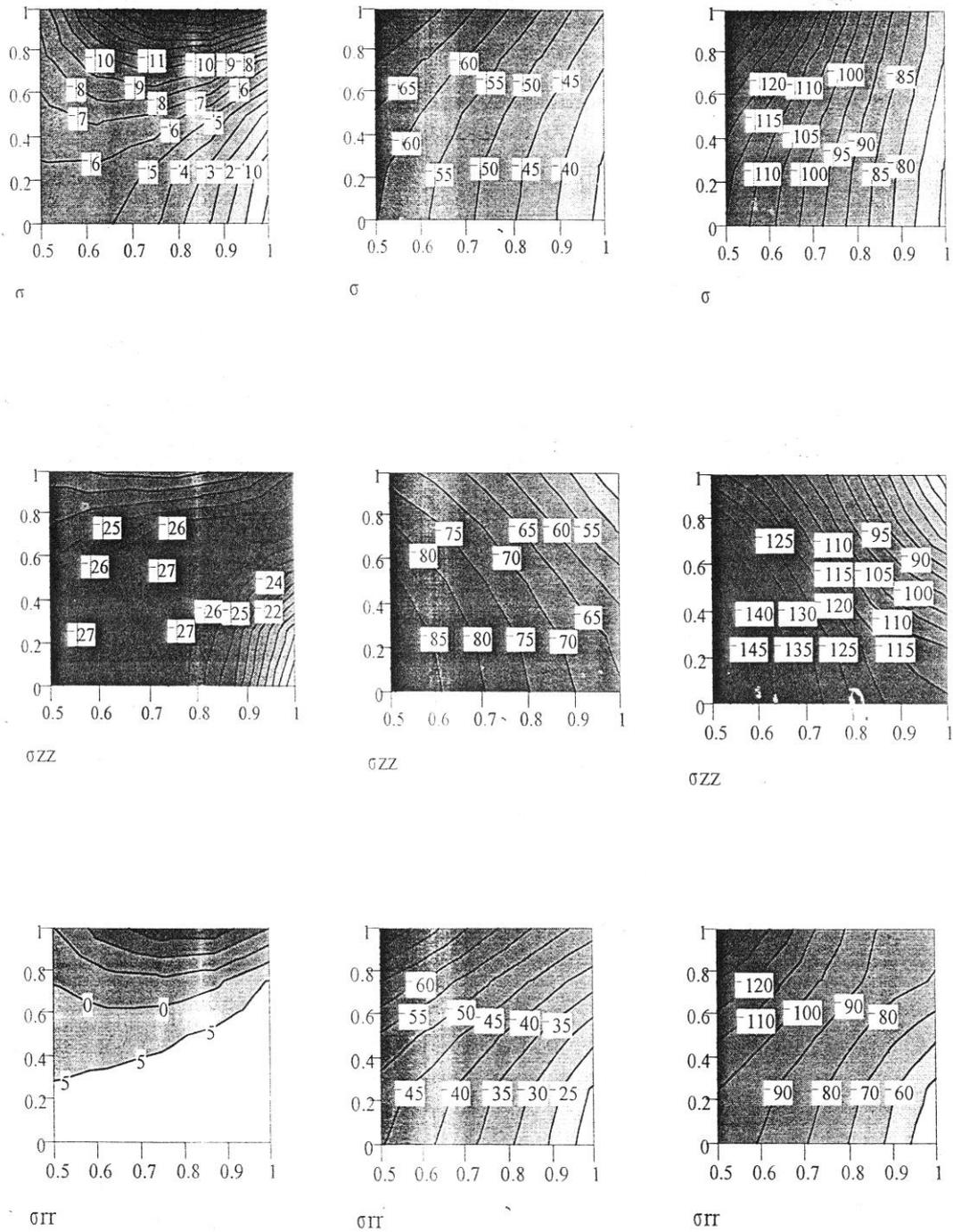


Рис. 3.14а. Карты линий уровня показателей НДС при осадке поллой цилиндрической заготовки с оправкой

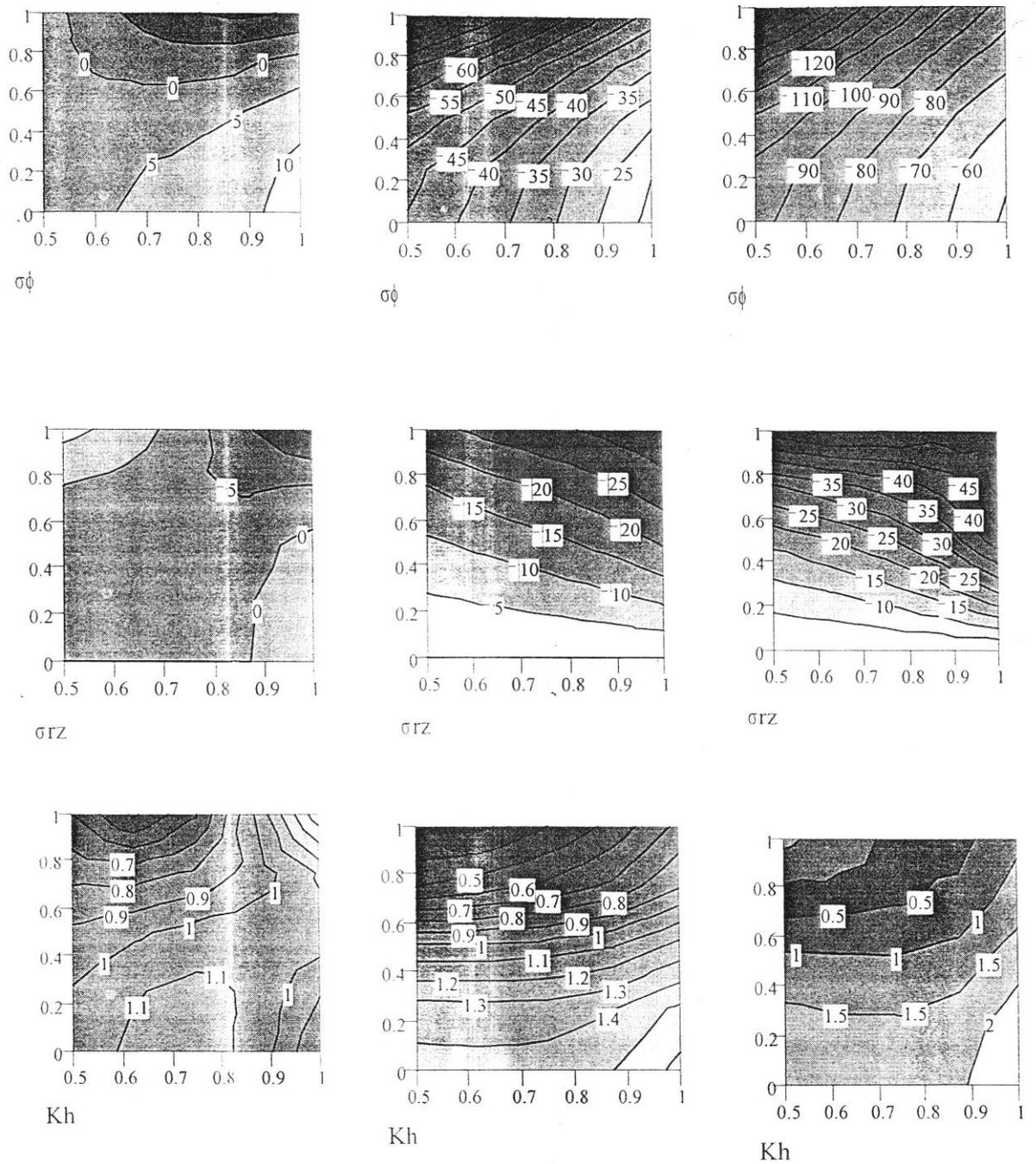


Рис. 3.146. Карты линий уровня показателей НДС при осадке полкой цилиндрической заготовки с оправкой

3.3. НДС полый цилиндрической заготовки при осадке в пресс-форме

Принципиальная схема процесса дана на рис. 3.15. На контакте с пресс-формой действуют напряжения трения τ , 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.

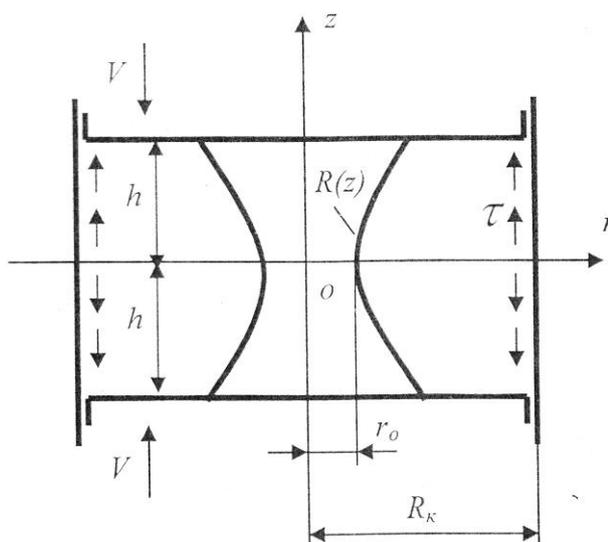


Рис. 3.15. Схема осадки полый цилиндрической заготовки в пресс-форме

Систему уравнений дополнили условием равенства средне интегрального значения касательного напряжения на контакте с пресс-формой заданному среднему значению напряжения трения

$$\frac{1}{h_0} \int_0^h \sigma_{rz}(R_k, z) dz = \tau. \quad (3.2)$$

Анализ невязок при удовлетворении статических и кинематических граничных условий, как и в предыдущих задачах, показал высокую точность расчета. Результаты расчета НДС показаны на рис. 3.16 – 3.21.

Рис. 3.16 показывает влияние трения на контакте с пресс-формой на эпюры нормальных напряжений под подвижным инструментом, а на рис.3.17 – на радиальные напряжения, действующие на стенки пресс-формы. Рис. 3.18 показывает характер распределения напряжений трения на контакте с пресс-формой, а рис. 3.19 позволяет сделать выводы о характере формоизменения свободного от напряжений контура внутренней полости цилиндра.



Рис. 3.16. Эпюры нормальных напряжений на контакте с подвижным инструментом ($h/R_k = 0.3$; $r_0/R_k = 0.5$)

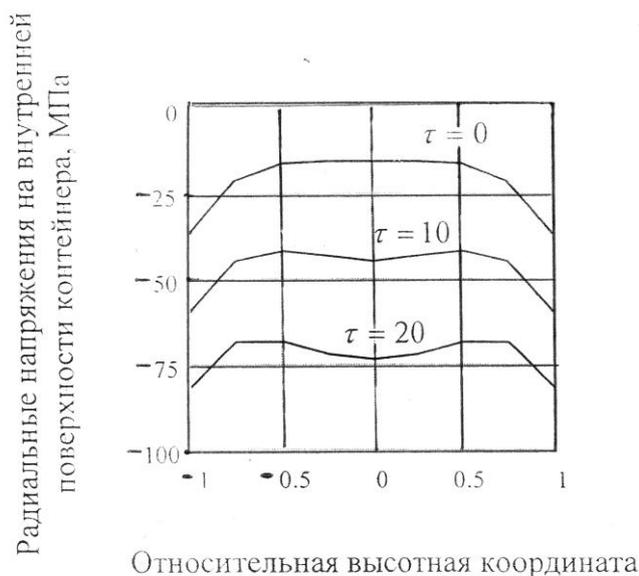


Рис. 3.17. Эпюры нормальных напряжений на внутренней поверхности контейнера при различных условиях трения ($h/R_k = 0.3$)

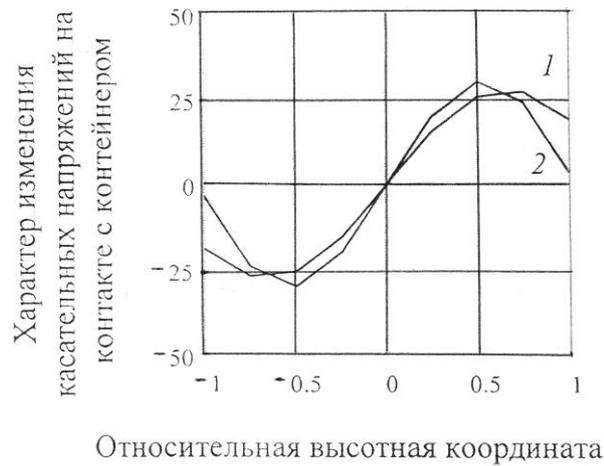


Рис. 3.18. Эпюры напряжений трения на контакте с пресс-формой ($\tau = 20$ МПа; $r/R_k = 0.5$); 1 – $h/R_k = 0.3$; 2 – $h/R_k = 0.5$

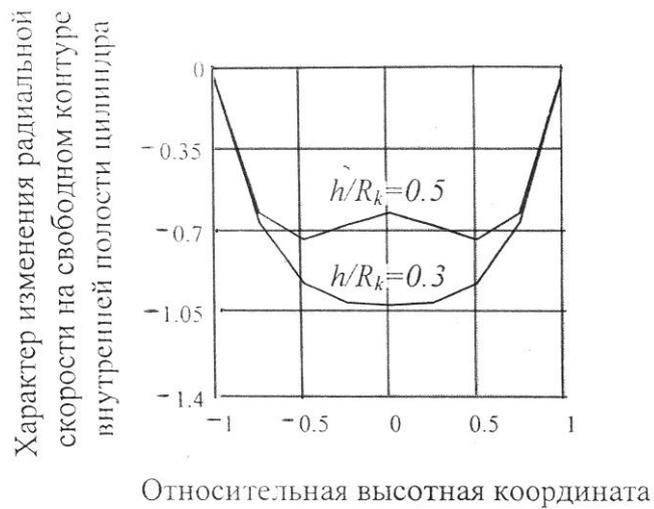


Рис. 3.19. К анализу формоизменения свободного контура внутренней полости ($\tau = 20$ МПа; $r_0/R_k = 0.5$)

Рис. 3.20 иллюстрирует характер течения материала при осадке в пресс-форме.

На рис. 3.21 представлены карты линий уровня основных показателей НДС для различных условий трения на границе с пресс-формой (первый ряд – $\tau = 10$ МПа; второй ряд – $\tau = 20$ МПа). Расчеты выполнены для условий $h/R_k = 0.4$; $r_0/R_k = 0.4$.

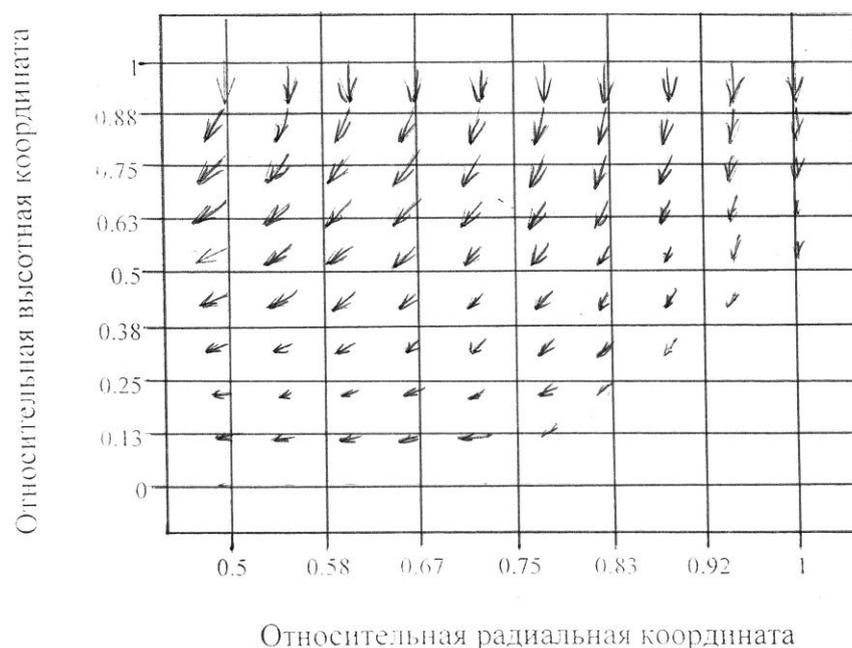
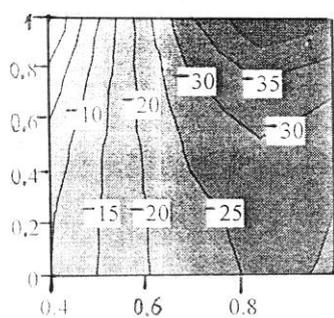


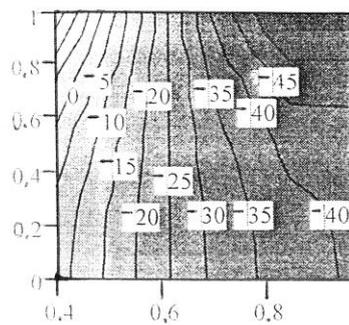
Рис. 3.20. Векторное поле скоростей течения материальных частиц при осадке полой цилиндрической заготовки в пресс-форме ($r_0/R_k = 0.5$; $h/R_k = 0.5$; $\tau = 20$ МПа)

3.4. Допрессовка

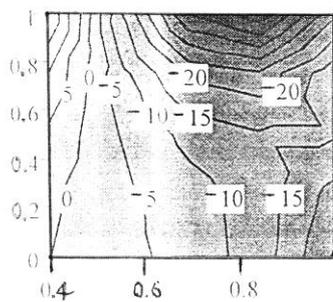
В предыдущих параграфах анализировалась стадия прессования. При допрессовке, например, сплошного цилиндра появляется контакт деформируемого цилиндра с контейнером (рис. 3.22), в результате чего на поле скоростей и напряжений накладываются дополнительные ограничения. В этом случае задача конструирования функциональных рядов для искомых параметров существенно усложняется, особенно для несжимаемого материала. Попытка описать поля напряжений и скоростей полиномами высокого порядка, как это делалось в предыдущих разделах, не привела к удовлетворительным результатам в смысле допустимых значений минимизированных невязок.



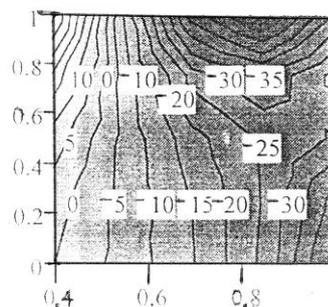
σ



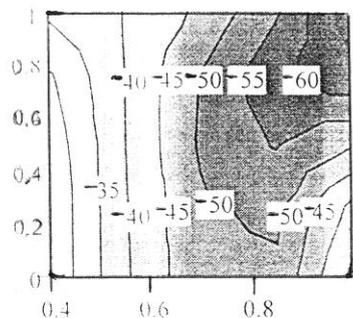
σ



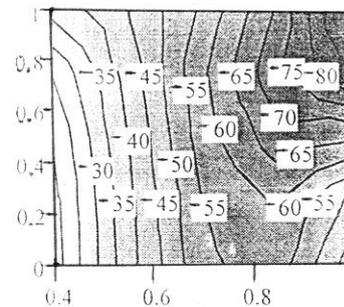
σ_{11}



σ_{11}



σ_{ZZ}



σ_{ZZ}

Рис. 3.21а. Карты линий уровня основных показателей НДС при осадке полого цилиндра в пресс-форме

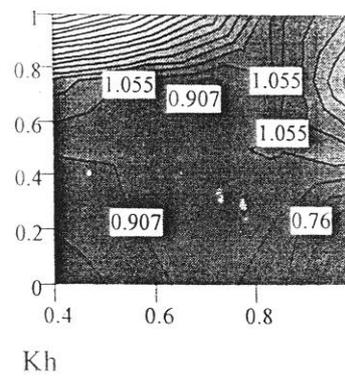
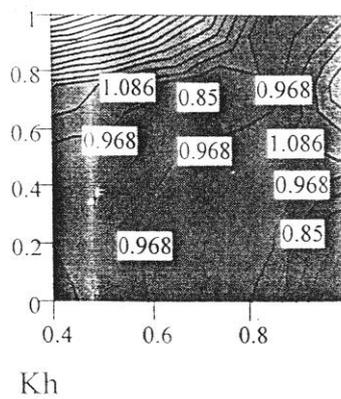
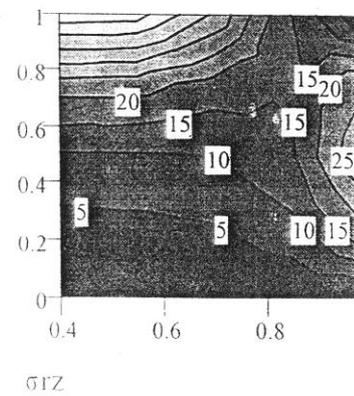
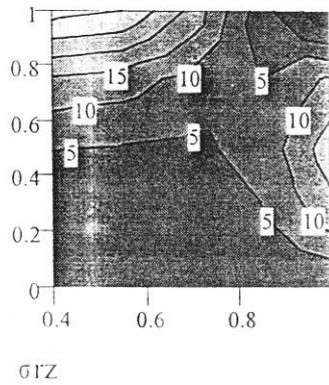
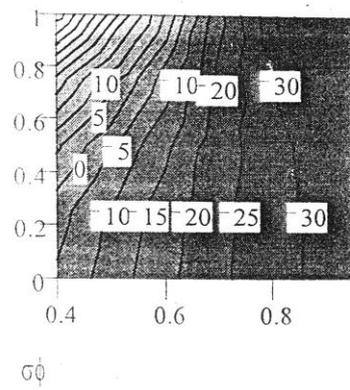
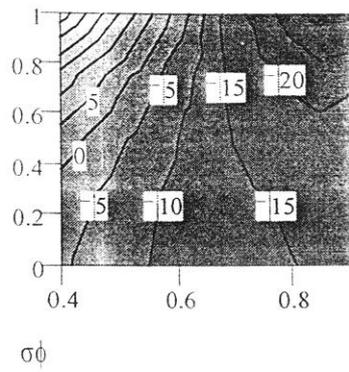


Рис. 3.21б. Карты линий уровня основных показателей НДС при осадке полого цилиндра в пресс-форме

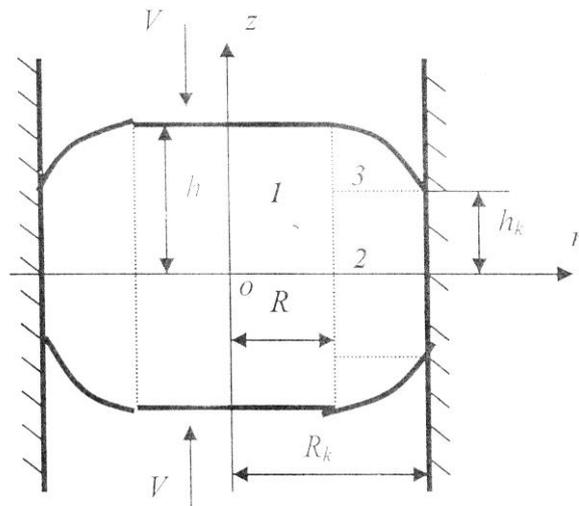


Рис. 3.22. Принципиальная схема допрессовки

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 и тем более по полю напряжений. Для получения корректных напряжений 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.

Учитывая отмеченную выше проблему, была поставлена задача разработки нетрадиционной методики конструирования непрерывных полей в задачах со сложными граничными условиями, когда традиционно используют разрывные решения.

3.4.1. Методика конструирования непрерывного и дифференцируемого поля скоростей при сложных граничных условиях

В основу методики были положены приемы, используемые для интерполяции функции, заданной в ряде точек [154]. Кривая образуется путем создания ряда кубических полиномов, проходящих через наборы из трех смежных точек. Кубические полиномы затем состыковываются друг с другом, чтобы образовать единую непрерывную и дифференцируемую кривую. Линейные полиномы обеспечивают 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.

Рассмотрим подробнее методику конструирования непрерывного и дифференцируемого поля скоростей на примере допрессовки сплошного цилиндра.

Как и в разрывных решениях, область деформации разбивается на блоки с характерными для каждого блока граничными условиями (рис. 3.22). Для блока 1 с наиболее четко выраженными граничными условиями задается поле скоростей, удовлетворяющее граничным условиям, например, в виде

$$V_{1r}(r, z, a_1) = V \frac{r}{h} \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) \sum_{i=1}^k \Psi_i(r, z, a_i), \quad (3.3)$$

$$V_{1z}(r, z, b_i) = -V \frac{z}{h} V \frac{z}{h} \left(1 - \frac{z^2}{h^2}\right) \sum_{i=1}^n \varphi_i(r, z, b_i), \quad (3.4)$$

где φ_i и Ψ_i – некоторые координатные функции с варьируемыми параметрами a_i и b_i .

Для второго блока, имеющего общую границу с первым блоком при $r = R = \text{const}$, задаются частные производные составляющих поля скоростей по координате r функциональными рядами с неизвестными функциями $f_i(z)$, например

$$\xi_{2rr}(r, z) = \frac{dV_{2r}}{dr} = f_1(z) + f_2(z) \cdot r^2 + \dots, \quad (3.5)$$

$$\xi_{2zr}(r, z) = \frac{dV_{2z}}{dr} = f_4(z) \cdot r + f_5(z) \cdot r^3 + \dots. \quad (3.6)$$

Из условия непрерывности частных производных на границе $r = R$ располагаем уравнениями:

$$\xi_{2rr}(R, z) = \xi_{1rr}(R, z, a_i),$$

$\xi_{2zr}(R, z) = \xi_{1zr}(R, z, a_i)$, из которых могут быть определены, например, $f_1(z)$ и $f_4(z)$

$$f_1(z) = \xi_{1rr}(R, z, a_i) - f_2(z) \cdot R^2, \quad (3.7)$$

$$f_4(z) = \frac{1}{R} \xi_{1zr}(R, z, b_i) - f_5(z) \cdot R^2. \quad (3.8)$$

С учетом (3.7) и (3.8) получим

$$\xi_{2rr}(r, z) = \xi_{1rr}(R, z, a_i) + f_2(z) \cdot (r^2 - R^2), \quad (3.9)$$

$$\xi_{2zr}(r, z) = \frac{r}{R} \xi_{1zr}(R, z, b_i) + f_5(z) \cdot (r^3 - R^2 \cdot r). \quad (3.10)$$

Интегрируя (3.9) и (3.10), найдем

$$V_{2r}(r, z, a_i) = \xi_{1rr}(R, z, a_i) \cdot r + f_2(z) \cdot \left(\frac{1}{3}r^3 - R^2 \cdot r\right) + f_3(z), \quad (3.11)$$

$$V_{2z}(r, z, b_i) = \xi_{1zr}(R, z, b_i) \frac{r^2}{2R} + f_5(z) \cdot \left(\frac{1}{4}r^4 - \frac{1}{2}R^2 r^2\right) + f_6(z). \quad (3.12)$$

Функции $f_2(z)$ и $f_3(z)$ находятся из условий:

$$V_{2r}(R, z, a_i) = V_{1r}(R, z, a_i) \text{ и } V_{2r}(R_k, z, a_i) = 0; \text{ а } f_5(z) \text{ и } f_6(z) \text{ из условий:}$$

$$V_{2z}(R, z, b_i) = V_{1z}(R, z, b_i) \text{ и } V_{2z}(R_k, z, b_i) = 0 \text{ (последнее уравнение}$$

справедливо при наличии прилипания на контакте с пресс-формой). Анализ показывает, что частные производные составляющие поля скоростей по аргументу z автоматически оказываются непрерывными на границе блоков 1 и 2.

Блок 3 (рис.3.22) имеет общие границы с блоком 1 и 2. В этом случае удобно задать линейные составляющие тензора скоростей деформации следующим образом

$$\xi_{3rr}(r, z) = \xi_{1rr}(R, z) - \xi_{1rr}(R, h_k) + \xi_{2rr}(r, h_k), \quad (3.13)$$

$$\xi_{3zz}(r, z) = \xi_{2zz}(r, h_k) - \xi_{2zz}(R, h_k) + \xi_{1zz}(R, z). \quad (3.14)$$

Имея в виду, что $\xi_{1rr}(R, h_k) = \xi_{2rr}(R, h_k)$ и $\xi_{2zz}(R, h_k) = \xi_{1zz}(R, h_k)$,

убеждаемся, что (3.13) и (3.14) удовлетворяют условиям:

$$\xi_{3rr}(R, z) = \xi_{1rr}(R, z) \text{ и } \xi_{3zz}(r, h_k) = \xi_{2zz}(r, h_k), \text{ т.е. условиям}$$

непрерывности по границам с соответствующими блоками.

Интегрируя (3.13) и (3.14), получим

$$V_{3r}(r, z) = \xi_{1rr}(R, z)r - \xi_{1rr}(R, h_k)r + \int_0^r \xi_{2rr}(r, h_k)dr + \Psi_1(z), \quad (3.15)$$

$$V_{3z}(r, z) = \xi_{2rr}(r, h_k)z - \xi_{2zz}(R, h_k)z + \int_0^z \xi_{1zz}(R, z)dz + \Psi_2(r). \quad (3.16)$$

Функция $\Psi_1(z)$ определяется из условия, $V_{3r}(R, z) = V_{1r}(R, z)$ а $\Psi_2(r)$ из условия $V_{3z}(r, h_k) = V_{2z}(r, h_k)$.

$$\Psi_1(z) = V(R, z) - \xi_{1rr}(R, z)R + \xi_{1rr}(R, h_k)R - \int_0^R \xi_{2rr}(r, h_k)dr,$$

$$\Psi_2(r) = V_{2z}(r, h_k) - \xi_{2zz}(r, h_k) + \xi_{2zz}(R, h_k)h_k - \int_0^{h_k} \xi_{1zz}(R, z)dz.$$

3.4.2. Напряженное и деформированное состояние при допрессовке сплошной цилиндрической заготовки из сжимаемого материала

В блоке 1 (рис. 3.22) поле скоростей описывали зависимостями

$$V_{1r}(r, z, a_1, a_2, a_3) = V \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \left(a_1 \frac{r}{R} + a_2 \frac{r^3}{R^3} + a_3 \frac{r^5}{R^5} \right). \quad (3.17)$$

$$V_{1z}(r, z, b_1, b_2, b_3) = V \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right) \left(b_1 \frac{r}{R} + b_2 \frac{r^2}{R^2} + b_3 \frac{r^4}{R^4} \right), \quad (3.18)$$

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 находили, минимизируя невязки при удовлетворении равенства нулю нормального напряжения на свободном от нагрузок 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.

Результаты численного решения представлены на рис. 3.23 – 3.28.

На рис. 3.23 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.

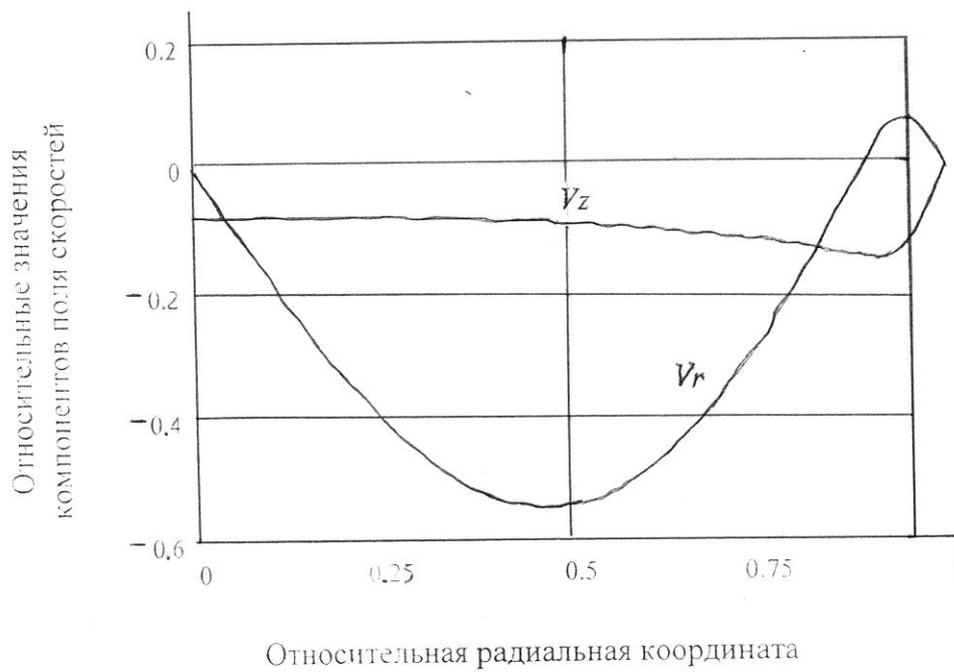


Рис.3.23. Иллюстрация непрерывности поля скоростей по границе блоков

Рис. 3.24 характеризует нормальные напряжения на контакте с пресс-формой. Наиболее нагруженным является центральный участок пресс-формы.

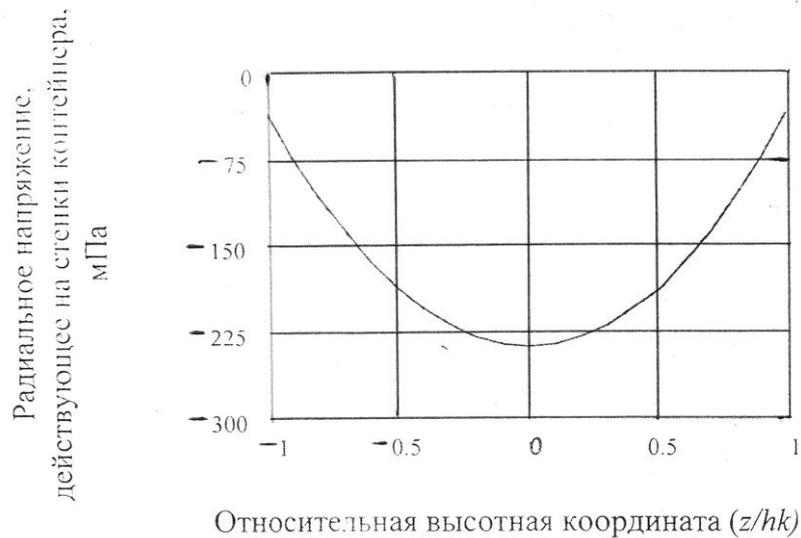


Рис. 3.24. К анализу напряженного состояния при допрессовке сплошного цилиндра

Рис. 3.25. 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, что иллюстрирует рис. 3.26. На этом рисунке цифры означают отношение фактической H к ее минимальному значению в объеме.

Рис. 3.27 и 3.28 показывают, что значительному всестороннему объемному сжатию подвержена при допрессовке центральная часть заготовки.

Анализ показал, что с точки зрения вероятности разрушения (расслоения) при допрессовке в неблагоприятном напряженном и деформированном состояниях находятся участки заготовки, прилегающие к боковому контуру.



Рис. 3.25. К анализу напряженного состояния при допрессовке сплошного цилиндра

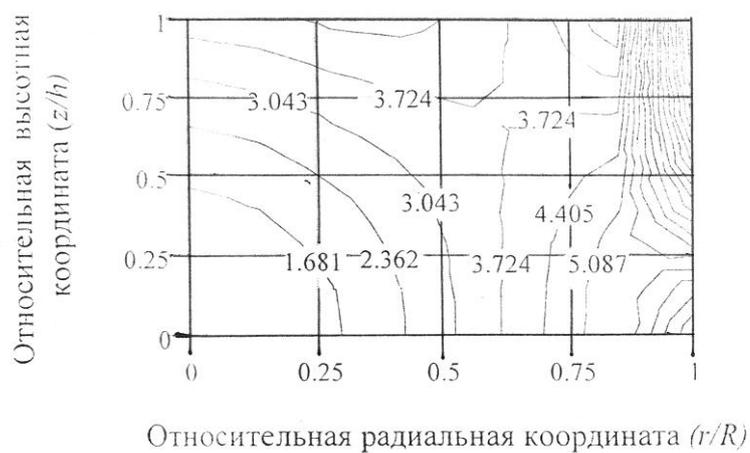


Рис. 3.26. Карта линий уровня относительных значений интенсивности скоростей деформации сдвига в объеме деформируемой заготовки

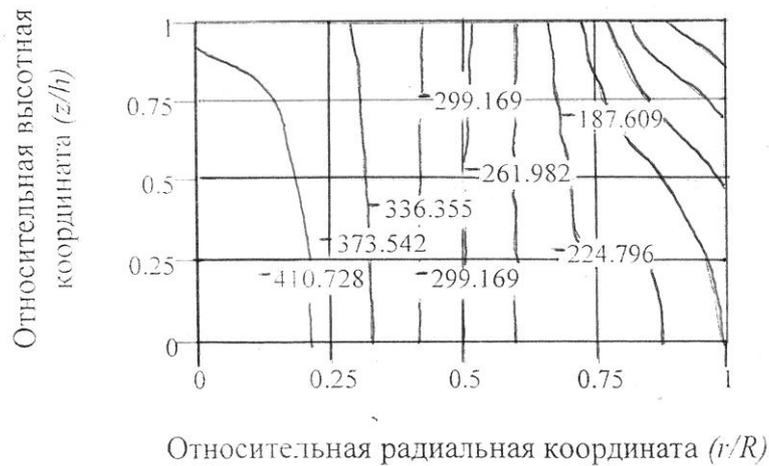


Рис. 3.27. Карта линий уровня среднего нормального напряжения (МПа) в объеме деформируемой заготовки при допрессовке сплошной цилиндрической заготовки

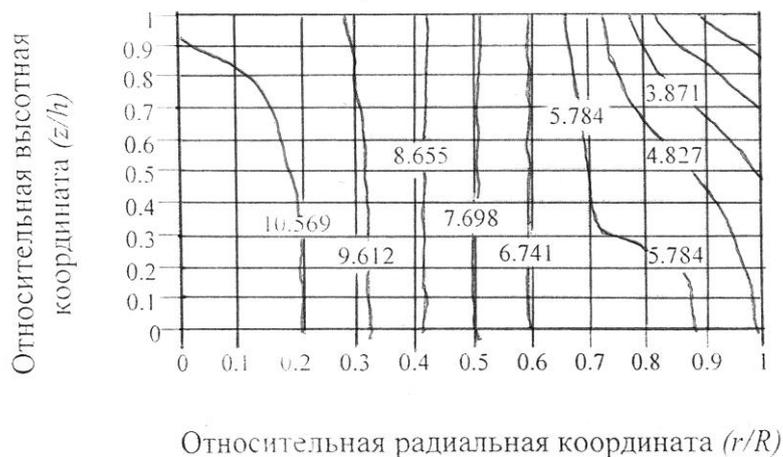


Рис. 3.28. Карта линий уровня показателя ξ / ξ_{\min} в объеме цилиндрической заготовки при допрессовке

3.5. К алгоритму расчета конечного формоизменения

При определении полей скоростей и напряжений в произвольный момент времени полагалось, что геометрия деформируемого объема, в частности

протяженность контактной поверхности (R_{oj}) и форма бокового контура $R(z)_j$, заданы (рис. 3.29). Фактически указанные параметры известны лишь в начальный момент деформации ($R_{oj} = R_o; R(z)_j = R_o$).

По ходу развития деформации контактная поверхность при наличии прилипания может увеличиваться за счет перехода материала с боковой поверхности заготовки [142]. Контур $R(z)_j$ на начальном этапе деформации может иметь вид двойной бочки, а затем по мере уменьшения высоты заготовки трансформироваться в одинарную бочку. Теоретически механизм формирования контактной поверхности в связи с указанным явлением изучен недостаточно. При отсутствии корректной информации о фактической геометрии (площади) контактной поверхности в процессе осадки не могут быть получены достоверные данные об усилии осадки, о параметрах бочки, о времени прессования заготовки (до появления контакта заготовки с пресс-формой).

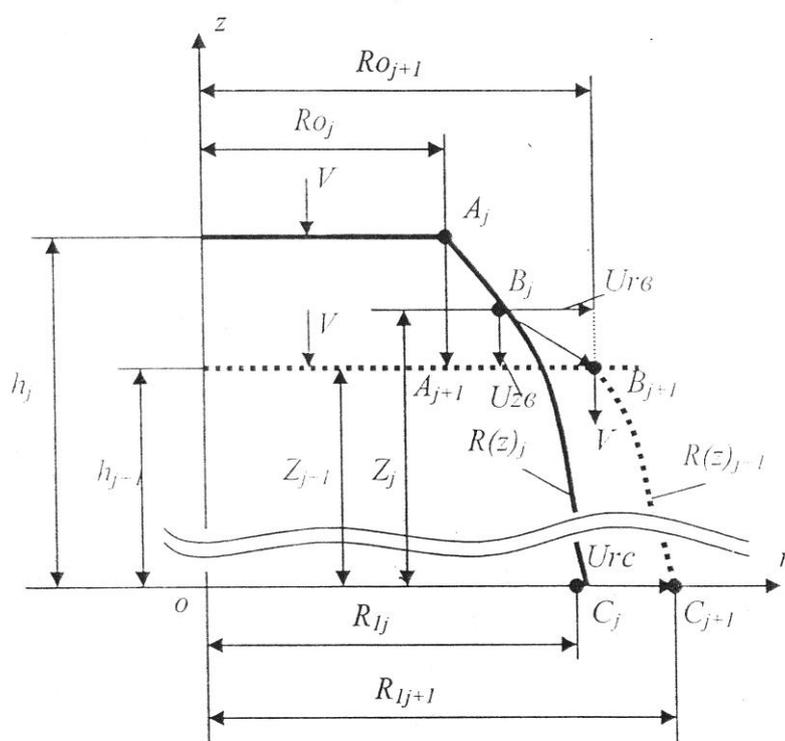


Рис. 3.29. К анализу формирования контактной поверхности и бокового контура

При обработке многослойной заготовки актуальность рассматриваемой проблемы усугубляется необходимостью получения информации 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.3.30). Все это необходимо знать для качественного анализа причин расслоения и для разработки режимов деформации, которые бы снизили либо полностью исключили вероятность расслоения.

Таким образом, 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.

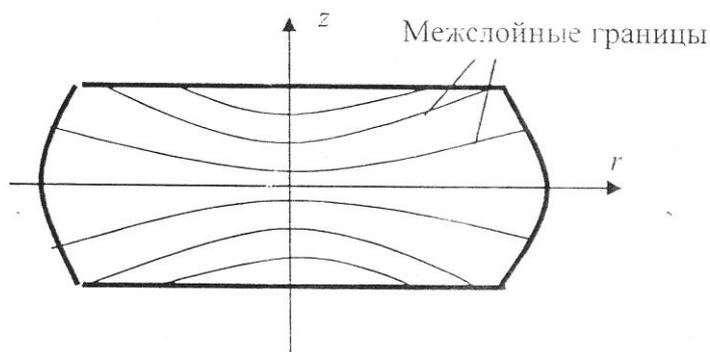


Рис. 3.30. К анализу механизма формирования контактной поверхности

Например, в известном упрощенном варианте поля скоростей при осадке в условиях прилипания, удовлетворяющем всем граничным условиям, скорость V_z не зависит от координаты r . Практически это означало бы, что материал не переходит со свободного контура под инструмент, площадь контакта с инструментом не изменяется, а смещенный в высотном направлении материал полностью «идет» на формирование бочкообразного контура. Разумеется, что на основе такого поля скоростей не может быть получена достоверная информация ни по одному из перечисленных выше показателей.

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 $\delta t = \frac{\delta h}{v}$ (здесь $\Delta h = h_0 - h_1$ - абсолютная высотная

деформация, необходимая для получения заданной конечной высоты заготовки h_1).

На каждом этапе определялось поле скоростей и напряжений, после чего осуществлялась коррекция параметров свободного контура $R(z)$ и контактной поверхности R_0 (рис. 3.29). Таким образом, получали информацию для реализации расчета параметров следующего этапа деформации.

Коррекция геометрии заготовки после очередного этапа деформации осуществлялась следующим образом.

За малый этап деформации высота заготовки изменилась с h_j до h_{j+1} , контур $R(z)_j$ трансформировался в контур $R(z)_{j+1}$. При этом участок свободного контура $A_j B_j$ деформировался и перешел на контактную поверхность, заняв положение $A_{j+1} B_{j+1}$. Точка A_j исходного контура в результате прилипания получила лишь вертикальное перемещение и заняла положение A_{j+1} , а точка B_j - вертикальное U_{rs} за время этапа t . Однако радиальное перемещение точки B_j при известном поле скоростей может быть найдено лишь при известных ее исходных координатах $(r_j z_j)$. Имея в виду, что $r_j = R(z_j)_j$, задачу сведем к определению координаты z_j -той точки исходного контура, которая за время этапа деформации последней перейдет на

контактную поверхность. Для решения этой задачи располагаем следующей информацией.

Скорость точки B в начале этапа

$$V_{z\theta j} = V_z(R(z_j), z_j), \quad V_{z\theta j+1} = -V, \quad (3.19)$$

$$V_{r\theta j} = V_r(R(z_j), z_j), \quad V_{r\theta j+1} = V_r(R(z_j), z_j). \quad (3.20)$$

Для малого временного интервала допустимо усреднить скорости перемещения точки B за время одного этапа

$$V_{z\theta} = 0.5(V_{z\theta j} + V_{z\theta j+1}), \quad (3.21)$$

$$V_{r\theta} = 0.5(V_{r\theta j} + V_{r\theta j+1}). \quad (3.22)$$

С учетом последних равенств получим

$$U_{r\theta} = V_{r\theta} \delta t, \quad U_{z\theta} = V_{z\theta} \delta t. \quad (3.23)$$

Вычислив $U_{z\theta}$ найдем координату z_{j+1}

$$z_{j+1} = z_j - U_{z\theta}. \quad (3.24)$$

В то же время

$$z_{j+1} = h_j - \delta h. \quad (3.25)$$

Таким образом, получаем уравнение для определения координаты z_j

$$z_j - U_{z\theta} - h_j + \delta h. \quad (3.26)$$

При известной z_j по формуле (3.23) находится перемещение U_{re} , а затем и радиус скорректированной контактной поверхности R_{oj+1} .

Параметр контура

$$R_{1j+1} = R_{1j} + U_{rc}, \quad (3.27)$$

где U_{rc} - радиальное перемещение точки С из положения C_j в C_{j+1} .

$$U_{rc} = Vrc\delta t = 0.5Vrc(Vrc_j + Vrc_{j+1})\delta t. \quad (3.28)$$

$$\text{В (3.28) } Vrc_j = Vr(R_{1j}, 0), \quad Vrc_{j+1} = Vr(R_{1j+1}, 0).$$

На основе (3.27) с учетом (3.28) получали уравнение для определения R_{1j+1}

$$R_{1j+1} - R_{1j} - 0.5[Vr(R_{1j}, 0) + Vr(R_{1j+1}, 0)]\delta t = 0. \quad (3.29)$$

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

3.6. Выводы по главе

1. Разработаны математические модели, алгоритмы и программы расчета НДС для различных вариантов осадки сплошных и полых цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций.

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 при допрессовке.

3. Получена полная информация об основных показателях НДС для различных вариантов деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок при открытом и закрытом прессовании.

4. Показано, что в качественном отношении НДС согласуется с известными представлениями и опытными данными других исследователей, что подтверждает достоверность математических моделей НДС при закрытом прессовании исследованных впервые.

5. Впервые дана численная оценка параметров НДС и интегральных характеристик процесса деформации абразивно-вулканитовых композиций.

6. Установлены наиболее неблагоприятные с точки зрения вероятности нарушения сплошности участки деформируемой заготовки.

7. Впервые информация о напряженном и деформированном состоянии цилиндрических заготовок получена на основе предложенных автором нетрадиционных алгоритмов.

4. РАЗРАБОТКА НОВЫХ СПОСОБОВ И УСТРОЙСТВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ НА ВУЛКАНИТОВОЙ СВЯЗКЕ ИЗ ПЛОСКОГО ПРОКАТА

4.1. Общие проблемы совершенствования процессов получения заготовок из плоского проката для производства абразивных кругов на вулканитовой связке

В современном отечественном производстве абразивного инструмента на вулканитовой связке большая часть технологической оснастки, оборудования была заимствована из других отраслей промышленности, в основном из резино-технической и лишь незначительная часть разработана впервые.

Начавшиеся применяться технологии, технологическая оснастка и оборудование для производства абразивного инструмента из композиционного плоского проката не имели достаточной теоретической и экспериментальной обоснованности. Качество заготовок и выход годной продукции оставляли желать лучшего.

С началом перехода на работу по системе качества, соответствующей требованиям международных стандартов ИСО 9000 стало необходимым решать проблемы совершенствования производства и повышения качества абразивного инструмента [1 – 4].

Для этого необходимо улучшить показатели его работоспособности по назначению инструмента, надежности, по экономному использованию сырья, технологичности получения заготовок для абразивного инструмента.

Повышение указанных показателей качества может быть достигнуто в первую очередь за счет совершенствования существующей технологии всех переделов изготовления инструмента, модернизации технологической оснастки, а также за счет разработки и освоения новых прогрессивных процессов обработки вулканитовых абразивных смесей давлением и технологической оснастки для их осуществления [5 – 8].

Прежде всего, это относится к поточно-механизированным линиям, включающим как обычные прокатные клетки дуо, так и клетки трио специальной конструкции, пневматические прессы для разделительных операций и гидравлические для формообразующих.

В конце 90-х годов прошлого столетия впервые начали проводиться всесторонние теоретические и экспериментальные исследования, посвященные технологии приготовления исходных абразивно-вулканитовых композиций, получения из них листового проката, кольцевых полуфабрикатов и цилиндрических заготовок [9 – 18].

Процессы прессования цилиндрических заготовок для шлифовальных и полировальных кругов, из собранных в пакет предварительно вырубленных плоских кольцевых заготовок, к настоящему времени теоретически и экспериментально остаются пока недостаточно изучены и исследованы. Необходимо также научно-практическое обоснование по совершенствованию разделительных процессов при получении плоских кольцевых заготовок.

Существенным недостатком используемого в настоящее время процесса высечки для получения кольцевых заготовок наружными диаметрами от 80 до 500 мм и высотами от 0,6 до 53 мм, реализуемого на ножевых штампах (рис.1.2), является наличие большого припуска, который составляет от 5 до 9 мм. Кроме того, операция высечки сопровождается образованием нежелательных заусенцев на наружном и внутреннем диаметрах получаемой кольцевой заготовки, по ее периметру имеет место разновысотность, часто заготовки получаются овальными, встречаются разрывы. Дефекты, собранных в пакет вырубленных кольцевых заготовок, предназначенных для прессования заготовки абразивного круга хорошо видны из рис.1.3.

Указанные недостатки кольцевых заготовок, наряду с неоднородностью свойств, приводят к низкому качеству готовых кругов. Используемая в настоящее время операция высечки для получения кольцевых заготовок не технологична, а сам процесс трудоемок и предусматривает использование большого количества ручного труда.

Низкая точность получаемых кольцевых заготовок вызывает необходимость большой механической обработки по всей поверхности.

Далее целесообразно остановиться на сортаменте инструмента из абразивно-вулканитовых композиций, выпускаемого в России.

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. 4.1).

Анализ показывает, что ТУ 2-036-1023-83 охватывает очень узкий размерный ряд шлифовальных кругов, не отвечающий размерным рядам кругов по ГОСТ 2424 – 83. Это сужает области применения шлифовальных кругов и показатель качества по их назначению. Кроме того, предприятия выпускают круги только класса точности Б. Причем, по согласованию с потребителями допускают увеличение предельных отклонений размеров наружного диаметра и высоты кругов в три раза по сравнению с классом точности Б. Это также снижает показатель качества кругов по их назначению. Круги классов точности А и АА практически не выпускаются.

На полировальные круги вообще отсутствует государственный стандарт (существовавший ранее ОСТ 2 И70-1-78 отменен в 1991 году). Согласно ТУ 2-036-1017-87 размерный ряд полировальных кругов включает только круги наружным диаметром 80...500 мм и высотой 6...80 мм, что значительно уже размерного ряда, который был предусмотрен ОСТ 2 И70-1-80. Диапазоны предельных отклонений размеров полировальных кругов значительно шире, по сравнению с предельными диапазонами отклонений размеров шлифовальных кругов класса точности Б, а класс повышенной точности размеров исключен из ТУ 2-036-1017-87.

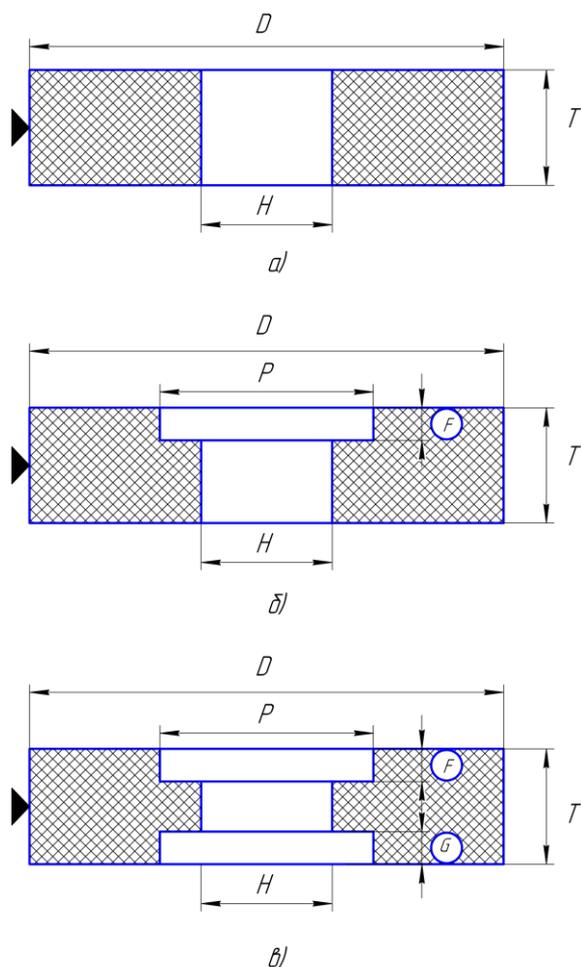


Рис.4.1. Круги, выпускаемые из абразивно-вулканитовых композиций по ISO 525 – 86 и ГОСТ2424 – 83 типов 1 (а), 5 (б) и 7 (в)

Имеющийся ограниченный размерный ряд и низкая точность размеров полировальных кругов значительно снижают показатели качества этих кругов по их назначению.

Отрезные круги типа 1 в России выпускаются по ТУ 2-036-1016-87 наружным диаметром 80...500 мм и высотой 0,6...4,0 мм, хотя техническим условиями ГОСТ 21963 – 82 на отрезные круги минимальный диаметр равен 50 мм, а высота 0,3 мм (ирландская фирма «Radiac» выпускает отрезные круги минимальной высотой $0,1 \pm 0,025$ мм). Это означает, что ТУ 2-036-1016-87 сужают размерный ряд отрезных кругов и ограничивают области их применения. Кроме того, отечественные предприятия не выпускают отрезные круги с упрочняющими элементами, с рифлением торцевых поверхностей и

двухсторонним поднутрением, что также ограничивает область применения отрезных кругов.

Предельные отклонения размеров кругов по уже упомянутому ТУ, например, неравномерность высоты круга, равной 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,3; и 1,6 увеличена по сравнению с требованием ГОСТ в два раза.

Как видно точность размеров находится на низком уровне.

4.2. Повышение технологической эффективности и качества производства кольцевых заготовок абразивных кругов

Разработки в этой области выполнялись по двум направлениям: 1 – усовершенствование применяемой конструкции технологической оснастки для операции высечки, предусмотренной технологической инструкцией; 2 – разработка новых способов и конструкций технологической оснастки.

Рекомендации для преимущественного использования того или иного способа или устройства на производстве вырабатывались на основе сравнительного анализа эффективности каждого из предложенных решений.

В предыдущих разделах настоящей работы достаточно подробно отражены недостатки, которые предопределили нецелесообразность дальнейшего использования существующей технологии и инструмента для получения кольцевых заготовок высечкой.

В связи с чем, приводимые сравнение эффективности описываемых ниже технических решений будут относиться только к новым разработкам.

Первые результаты анализа производства кольцевых заготовок не только для отрезных кругов, но и шлифовальных и полировальных (конструкции оснастки абсолютно идентичны, а отличия только в размерах) показали, что возможен ряд усовершенствований, позволяющих получить определенный положительный эффект в устранении ряда имеющихся недостатков без каких-либо существенных затрат. Дальнейшие более углубленные исследования позволили не только усовершенствовать существующий способ и

технологическую оснастку, но и сделать более кардинальные предложения в развитии процессов получения плоских кольцевых заготовок и улучшения экологической обстановки на производстве.

4.2.1. Механизация нанесения талька на листовую заготовку

Прокатанные листы из абразивно-вулканитовой смеси припудривают тальком для предотвращения слипания получаемых кольцевых заготовок при одновременной их вырезке из нескольких листов сложенных один на другой. Количество листов в одной стопке в зависимости от их толщины может составлять от двух до шести.

До сих пор порошок талька на листовые заготовки после прокатки перед операцией высечки кольцевых заготовок разбрасывался вручную («припудривание») и бесконтрольно (чему способствует дешевизна талька). Это абсолютно недопустимо по многим причинам. Бесмысленный огромный перерасход талька создает недопустимо высокую запыленность рабочего места, что отрицательно сказывается на здоровье рабочих. В цехе микровзвеси талька висят в воздухе, все оборудование, внутренняя часть здания покрыта вьевшимся слоем талька. Это можно заметить по фотографии (рис.4.2) рабочего места на поточно-механизированной линии в цехе №5 ЗАО «Росси». Естественно, что при таком положении тальк попадает в исходную абразивно-вулканитовую массу на начальных этапах передела и отрицательно влияет на кинематические и силовые условия контакта проката с валками. Тальк оказывает влияние и на температурные условия прокатки, поскольку обладает высокими теплоизолирующими свойствами. Попадание талька на контактные поверхности пакетных заготовок препятствует нормальному протеканию когезии и, как следствие, получение бракованной продукции.



Рис.4.2. Рабочее место для вырубki заготовок на поточно-механизированной линии

Было разработано три варианта решения этой проблемы.

Первый вариант (рис.4.3). После вальцебрикетного агрегата на рольганге 1 на стойках 2 предлагается установить бункерно-загрузочную камеру 3, подпружиненную относительно стоек 2, с выходным отверстием, в котором на осях 4 смонтировать с возможностью вращения валик 5, наружную поверхность которого оснастить длинноворсовым войлоком 6. Между валиком 5 и рольгангом 1 обеспечить зазор, величина которого меньше величины зазора между валками вальцебрикетного агрегата [157]. В результате объем талька 7 засыпаемый в бункерно-загрузочную камеру 3 для нанесения его на прокатываемый лист 8 обеспечивал работу поточно-механизированной линии как минимум в течении смены.

Предложенное устройство было установлено на поточно-механизированной линии по производству отрезных вулканитовых кругов в цехе № 5 ЗАО «Росси». Бункер был выполнен из нержавеющей стали объемом 8 литров, а в его выходном отверстии был смонтирован валик диаметром 30 мм и длиной соответствующей ширине прокатываемого листа, оснащенный

длинноворсовым войлоком. Задача была решена. В результате тальк стал именно припудриваться равномерным слоем, устранилась запыленность на рабочем месте, улучшилась культура производства. Расход талька сократился в 14 раз.

Второй вариант [158] (рис.4.4) явился усовершенствованием первого. Валик 1 с войлоком был отделен от засыпаемого в бункер талька 2 пластиной 3 оснащенной щелевой прорезью 4. Такое решение позволило еще больше минимизировать толщину слоя талька наносимого на листовую заготовку и устранить излишнее насыщение тальком войлочного покрытия валика и соответственно еще больше сократить его расход.

Третий вариант [159]. Предлагается тальк наносить вращающимся валиком, спрессованным из порошка талька (рис.4.5).

Для упрощения изготовления и для случая неравномерного износа валик целесообразно делать наборным из колец необходимой толщины. Данный способ нанесения талька на листовой прокат наиболее оптимальный и эффективный.

4.3. Совершенствование ножевых штампов для получения кольцевых заготовок

При производстве заготовок для тонких отрезных кругов наружным диаметром от 80 до 200 мм и высотой до 2,0 мм по существующей технологии на наружном и внутреннем торцах вырезаемой кольцевой заготовки образуется заусенец (при высечке заготовок из пакета этот заусенец достигает 1 мм и более), который не устраняется и после вулканизации. При высечке заготовок из пакета диаметр верхней кольцевой заготовки меньше, чем диаметр нижний. Разница может составлять до 1 мм.

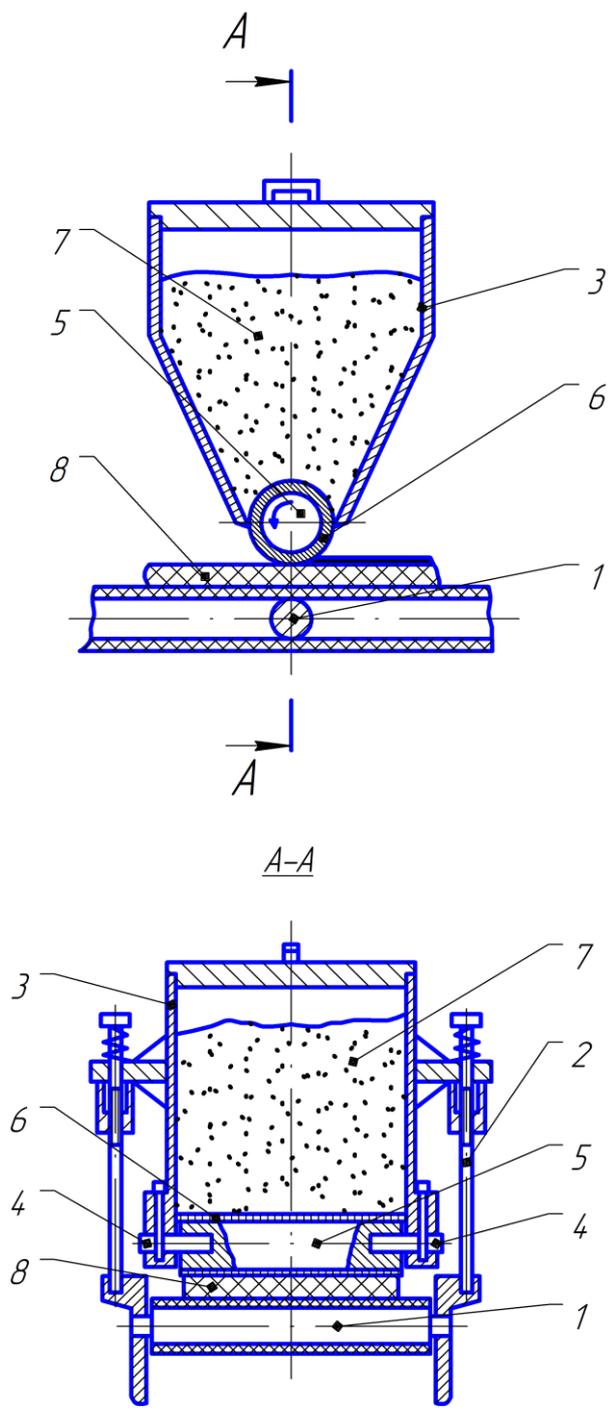


Рис.4.3. Бункерно-загрузочное устройство для нанесения талька на плоский прокат

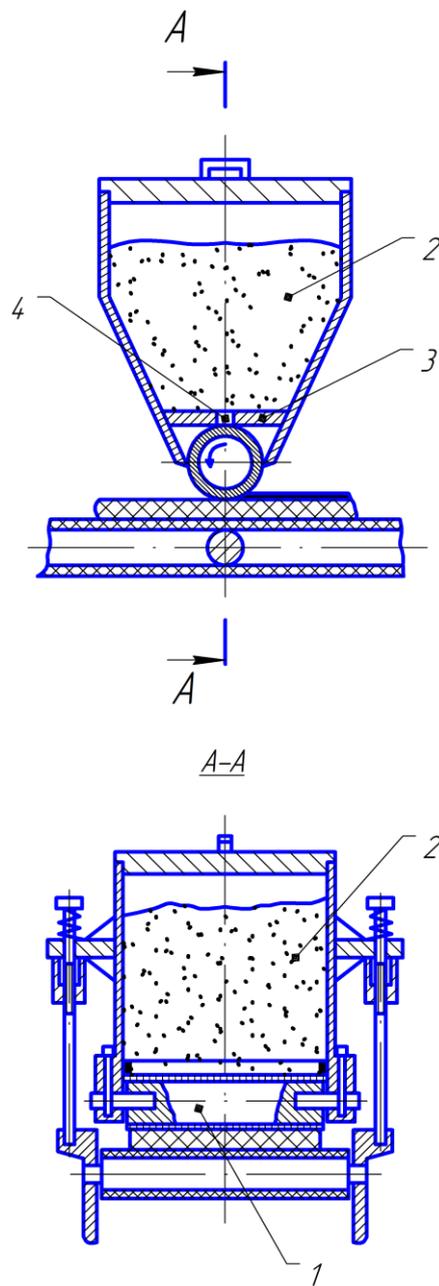


Рис.4.4. Бункерно-загрузочное устройство с диафрагмой

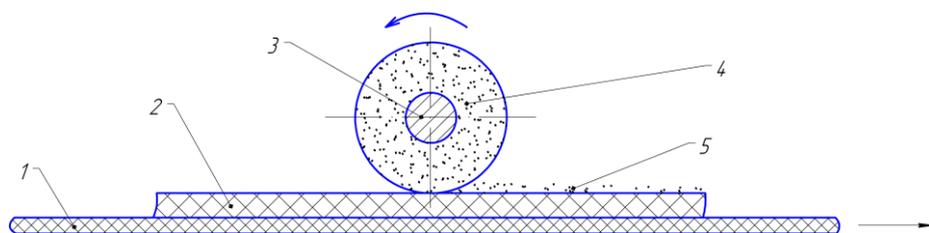


Рис.4.5. Иллюстрация к способу нанесения талька на листовой прокат:

1 – лента транспортера; 2 – листовая заготовка; 3 – ось валика; 4 – валик;
5 – тальк, нанесенный на поверхность листовой заготовки

Для устранения отмеченных недостатков необходимо в существующей конструкции ножевого штампа (рис.4.6) верхнюю плоскость выталкивателя 1 вырезаемой заготовки оснастить пористой прокладкой 2, пропитанной смазочной жидкостью, которая через нажимное кольцо 3 будет связана с

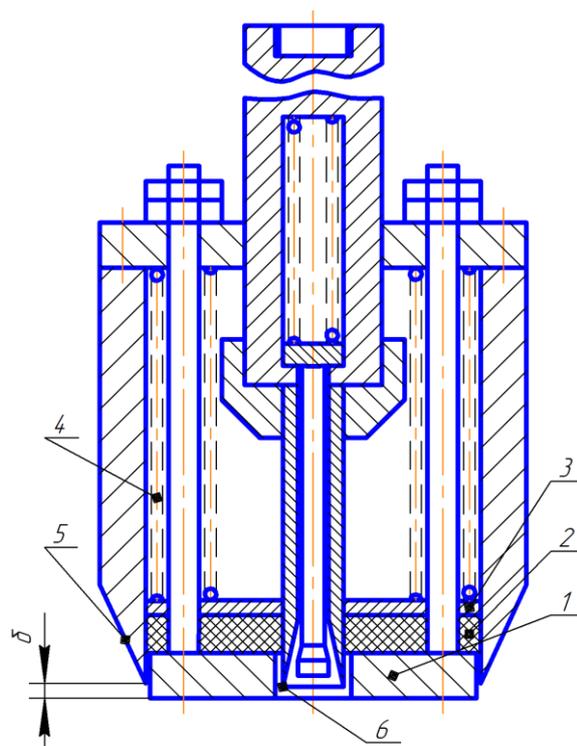


Рис.4.6. Усовершенствованная конструкция ножевого штампа

упругими элементами 4 упомянутого выталкивателя. Штамп также позволяет калибровать поверхность вырезаемой заготовки, благодаря обеспечению выступа кромки ножей 5, 6 на величину δ , равную необходимой величине деформации обеспечивающей калибровку [160].

Такое решение позволяет при каждом резе на режущие кромки ножей наносить смазку и тем самым снижать коэффициент трения между режущими элементами и вырезаемой заготовкой. Это позволяет получать гладкие и ровные края по наружному и внутреннему диаметрам вырезаемой заготовки, исключить образование заусенца и улучшить товарный вид готовой продукции.

В качестве смазки можно использовать гидрофобизирующую жидкость марки 136 – 41 по ГОСТ 10834 – 76, которая экологически- и пожаробезопасна, быстро высыхает, хорошо взаимодействует со смазываемыми поверхностями. В качестве пористого материала можно использовать поролон.

Были успешно осуществлены разработки направленные на усовершенствование конструкций ножевых штампов и создания новых конструкций вырубных штампов [161 – 164]. Полученные результаты были опубликованы в избранных трудах Российской школы по проблемам науки и технологий [29].

В существующих технологиях изготовления отрезных абразивных кругов на 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 врубки и формования требуемой поверхности абразивного круга.

Ставшая применяться ранее измененная конструкция ножевого штампа [164] обеспечивает только вырезку кольцевой заготовки и не пригодна для формообразующей операции, также как и более совершенная конструкция вырубного штампа [165], взятая за основу при разработке штампа совмещенного действия [166].

Штамп (рис.4.7) содержит оправку 1 с верхним полым пуансоном 2 с плоским рабочим торцом 3 и режущей кромкой 4 на цилиндре. В нем смонтирована формовочная вставка 5 верхнего профиля заготовки формируемого круга 6 с выталкивателем 7 внутренней высечки 8. Матрица состоит из основания 9 и кольца 10, в которое встроено кольцевой прижим 11, подпружиненный относительно основания 9. Внутренний диаметр прижима 11 равен наружному диаметру заготовки круга. В кольцевой полости, образованной кольцевым прижимом 11 и нижним цилиндрическим пуансоном 12, смонтирован подпружиненный выталкиватель 13 заготовки 6. Последний выполнен с рабочей поверхностью 14 формования нижнего профиля круга 6 и

режущей наружной кромкой 15. Выталкиватель 13 со стороны плоскости 16, обращенной к основанию 9, снабжен ходограничителем 17 и имеет возможность прямого хода, величина которого меньше хода прижима 11.

По предварительным оценкам производительность такого штампа должна увеличиться не менее чем в 2 раза и существенно сократиться себестоимость изготовления и содержания в сравнении с двумя штампами, используемыми в существующей технологии.

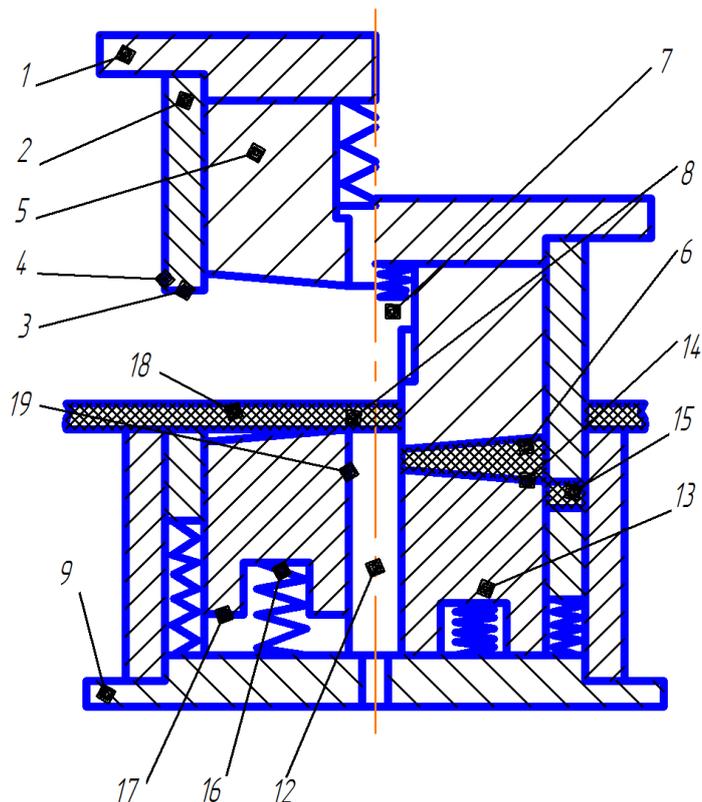


Рис.4.7. Конструкция штампа совмещенного совмещенного действия

На основе анализа проведенных исследований был освоен промышленный выпуск разработанной конструкция отрезного круга 1 (рис.4.8) содержащего армирующий элемент 2 на высоте $H/2$, где H – высота круга, обладающего повышенными режущими способностями, механической прочностью и долговечностью [167].

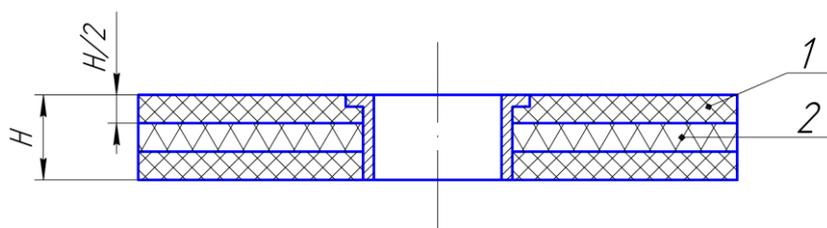


Рис.4.8. Устройство нового абразивного круга

4.4. Применение многогранных плоских и объемных заготовок в производстве абразивных кругов

Согласно ТУ 2-036-1023-88 отечественные предприятия абразивной промышленности выпускают шлифовальные и полировальные круги типа П, исходные заготовки для которых представляют из себя сплошные плоские круги вырезаемые из листа, для последующей сборки их в пакет и прессования из него заготовки абразивного круга.

Существенным недостатком способа получения плоских заготовок в виде круга является низкий коэффициент использования материала. 30...70% всей массы прокатанных листов уходит в отходы в виде перемычек и наружного облоя.

Для повышения коэффициента использования материала и сокращения отходов предлагается новая форма поперечного сечения исходных заготовок, способ и устройство для их получения [168].

На рис.4.9а в качестве примера показан раскрой листа с размерами $h \times b \times l = 20 \times 270 \times 660$ мм, из которого по существующей технологии получают восемь исходных заготовок предназначенных для получения абразивных кругов наружным диаметром 80 мм. Такой раскрой используется, в частности, при производстве полировальных кругов типа П на ЗАО «Росси» (г.Челябинск). При таком раскрое коэффициент использования материала листа не превышает 25%. В случае вырубки квадратных заготовок из такого же листа их количество вырастет до 27 (рис.4.9б), а шестигранных до 24 (рис.4.9в). Соответственно

коэффициент использования материала будет 55 и 63%, т.е. в 2,2...2,5 раза выше, чем при используемом раскрое.

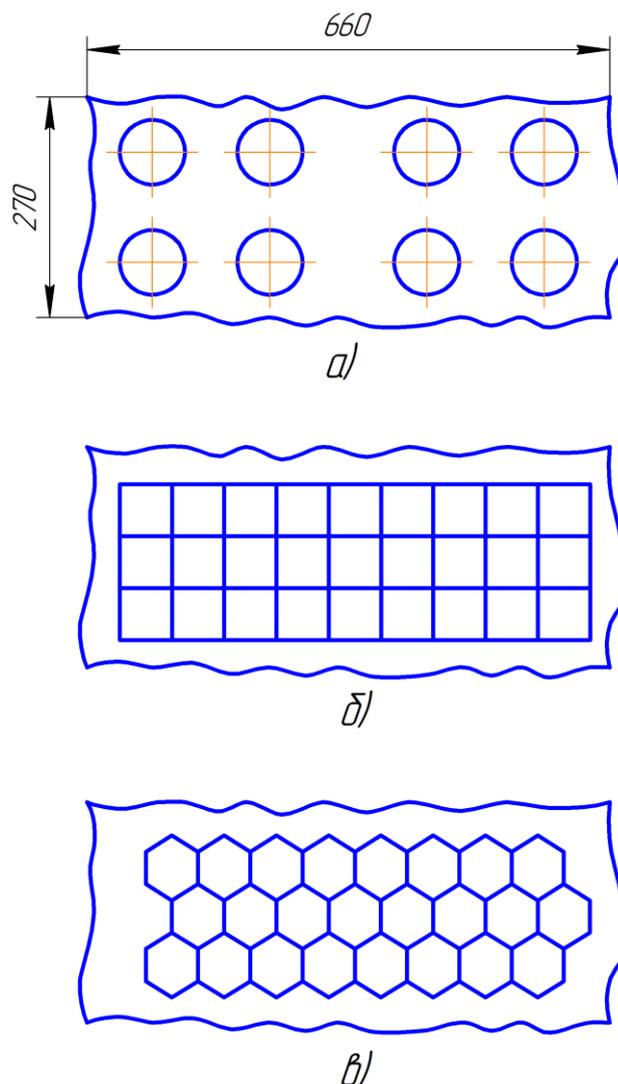


Рис.4.9. Схемы раскроев листовой заготовки для вырубки круговых (а), квадратных (б) и шестигранных (в) исходных плоских заготовок

Получение исходных плоских заготовок многогранной формы из листа прокатанного из абразивно-вулканитовой массы осуществлялось следующим образом (рис.4.10).

Прокатанный из абразивно-вулканитовой смеси лист 3 размещают на многогнездной матрице 4, на подушке 2, оснащенной приводом (на рис. условно не показан) перемещения в горизонтальном направлении. Затем настраивают вертикальное положение эластичного валика 1, установленного с

возможностью вращения относительно собственной оси, таким образом, чтобы зазор между ним и матрицей 4 был на 0,5...1,0 мм меньше толщины листа, что обеспечит гарантированную вырубку заготовок.

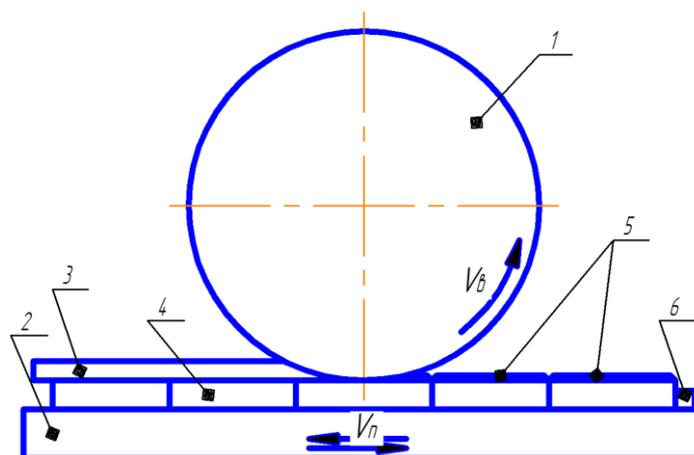


Рис.4.10. Устройство для вырубki многогранных плоских заготовок

При перемещении в горизонтальном направлении подушки 2 вместе с матрицей 4 и листом 3 в момент касания валика 1 с листом 3, расположенным на матрице 4, происходит вырубka заготовок 5. 6 – отход.

При промышленном опробовании получения шлифовальных кругов из квадратных и шестигранных исходных заготовок осуществлялась предварительная открытая осадка предварительно собранного из них пакета и окончательное закрытое прессование.

Квадратные заготовки имели сторону квадрата 105 мм, а шестигранные сторону равную 75 мм. Размер описанного круга для заготовок составлял 145 мм. Высота заготовок – 10 мм. Из заготовок собирались пакеты высотой 80 мм и осаживались открытой осадкой до 70 мм. Закрытым прессованием уплотненных пакетов из квадратных заготовок получали цилиндрические заготовки кругов 150 × 40 14А 16-Н СТ В (диаметр 150 мм, высота 40 мм). Из шестигранных заготовок – заготовки кругов 150 × 60 14А 16-Н СТВ.

После вулканизации и механической обработки круги подвергались стандартным испытаниям на твердость, прочность и дисбаланс. Результаты испытаний показали соответствие кругов требованиям ТУ 2-036-1023-88. Круги были получены без брака.

Применение плоских кольцевых заготовок при производстве высоких шлифовальных и полировальных кругов типа 1 (наружный диаметр от 200 до 600 мм, высота от 32 до 275 мм) приводит к активной адсорбции воздуха и других газообразных включений на контактных поверхностях кольцевых заготовок собранных в пакет и герметизации воздуха в пределах объема пресс-формы для закрытого прессования в результате затекания облоя в имеющиеся зазоры. Это явление становится одной из причин возникновения таких видов брака как пузырчатость и расслои. 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.

Для устранения отмеченных недостатков предлагается вырубать заготовку с поперечным сечением выполненным в виде эллипса, большая ось которого $AB = D$, а малая ось $CD = (1,5...2,0)H$, где D – диаметр вырубленной заготовки из прокатанной пластины, H – высота прокатанной пластины (рис.4.11).

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). Это позволяет снизить сопротивление деформированию и силы трения, что позволит уменьшить энергозатраты на осуществление процесса прессования. Размеры эллипсоидной

заготовки выбраны из оптимальных условий обеспечения самого процесса и эффективного устранения отмеченных недостатков в существующей технологии.

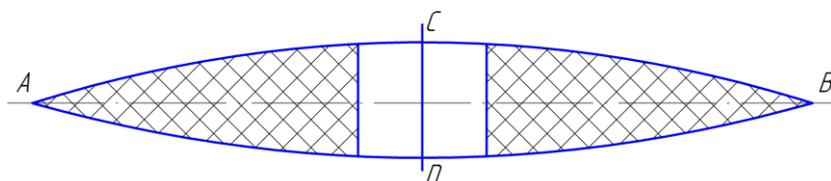


Рис.4.11. Эскиз заготовки

На рис. 4.12 приведена конструкция вырубного штампа для получения эллипсоидных заготовок.

Вырубка эллипсоидных заготовок с наружным диаметром 498 мм, внутренним 295 мм осуществлялась на опытном вырубном штампе из предварительно прокатанной полосы высотой 15 мм. Полученные заготовки не имели заусенцев по сравнению с существующей технологией высечки плоских кольцевых заготовок. Наблюдения за изменением силового режима прессования показали, что до получения окончательных размеров прессуемые заготовки находились под максимальным давлением по времени в среднем на 20% меньше, чем при существующей технологии. Это позволяет сделать вывод о снижении энергозатрат на выполняемую операцию.

Заготовка и устройство для ее получения защищены патентом РФ на изобретение [169].

Наряду с устранением отмеченных выше разновидностей брака, возникающих при прессовании заготовки, необходимо обеспечивать и достаточную механическую прочность готовых изделий. Круги марки СТ с шириной кольцевой части круга до 35 мм, получаемые по традиционной технологии, как показала эксплуатация, имеют неудовлетворительную механическую прочность.

Была предпринята попытка вырубать из полосы заготовку по развертке – параллелограмму формуемого круга, затем производить свертку заготовки в

кольцо вокруг оправки пресс-формы, последующее формование и термообработка.

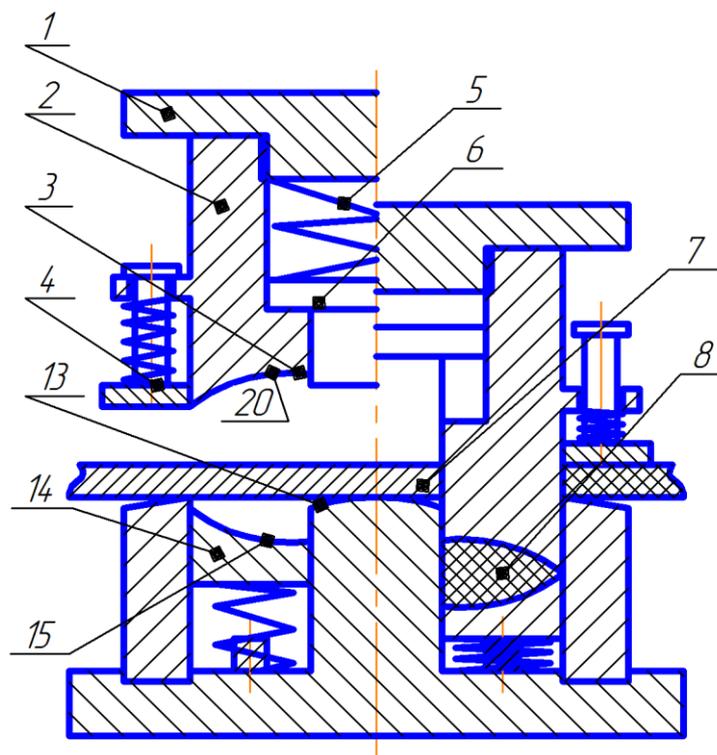


Рис.4.12. Устройство вырубного штампа

Оказалось, что предложенная форма развертки ее кольцевой части не обеспечила в процессе формования достижения необходимых сдвиговых деформаций в плоскости контакта, образующейся после сворачивания развертки в кольцо, что привело к отрицательному результату.

В результате анализа деформационного состояния при формовании таких заготовок было предложено видоизменить исходную заготовку следующим образом.

Развертку-параллелограмм выполняют по диагонали, проведенной по боковой поверхности формуемого круга, а заготовку вырубают в виде двух половин 3, 4, разделенных по малой диагонали развертки-параллелограмма, и сворачивают вокруг оправки пресс-формы при обращении их больших оснований к формовочным плитам (рис.4.13) [170].

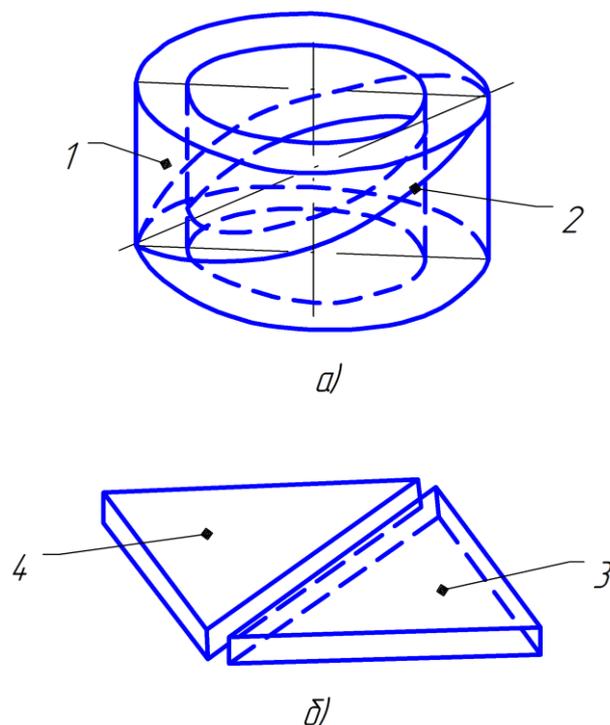


Рис.4.13. Абразивный круг 1 с линией развертки 2 (а), вырубаемая заготовка (б)

По данному способу были получены опытные круги марки СТ с наружным диаметром 350 мм, внутренним 280 мм и высотой 125 мм. Исходная заготовка вырубалась из прокатанной полосы толщиной 30 мм, шириной ≈ 140 мм и длиной ≈ 1250 мм. Формование свертки выполнялось на гидравлическом прессе усилием 6300 кН.

На полученных образцах кругов отсутствовал след контактной плоскости сборной заготовки, что свидетельствует о хорошей когезии. Испытания, проведенные на станке по определению абразивных свойств кругов показали стойкость в 1,4...1,7 раза выше кругов полученных по традиционной технологии.

4.5. Последовательное открытое и закрытое прессование в одной пресс-форме высоких пакетных заготовок

Для реализации на практике результатов полученных при теоретических и экспериментальных исследованиях различных вариантов прессования, в

основе которых лежит названная схема, были разработаны соответствующие способы и устройства.

В развитие способа, предусматривающего предварительное уплотнение без матрицы усилием $0,1 \dots 0,2$ от усилия окончательного прессования в закрытой пресс-форме [171] предлагается после предварительного уплотнения осуществлять попарную установку пакетов на оправке пресс-формы, а затем производить окончательное прессование [172].

Осуществление предложенного способа поясняется рис.4.14. Пакеты 2 и 4 устанавливаются на нижней плите 5 в кольцевой матрицы 3 на оправке 6. Сверху на сборные пакеты устанавливают плиту 1. Затем пресс-форма подается в рабочую зону пресса и производится прессование усилием $P_{п.}$. В процессе прессования заготовок 2 и 4 высотой H_3 и диаметром D_3 отношение D_3/H_3 превышает значение $0,5$. В этом случае при прессовании возникает бочка в плоскости 7. Поскольку D_3 значительно меньше D_m , то бочка будет минимальной. Минимальными будут P_{δ} (боковые давления оправки и матрицы на заготовку) и T_{δ} (силы трения на контакте заготовки с оправкой и матрицей), а следовательно, и усилие выталкивания P_v . Давления стенок матрицы матрицы и оправки по высоте прессуемой заготовки будут более равномерными. Уменьшится разница в диаметрах и напряженных состояниях прессуемой заготовки, равной D_m , и извлеченной заготовки равной $D_{вз.}$. В результате вероятность возникновения расслоев сведется к возможному минимуму.

Усилие прессования по предложенному способу составило 2300 кН, как и в существующей технологии, а усилие выталкивания 940 кН против 1950 кН, т.е. стало почти в 2 раза меньше. По существующей технологии пакет содержал 26 колец. По предлагаемой – каждый из двух пакетов содержал 13 заготовок. В обоих случаях прессовались заготовки для получения одинаковых кругов с наружным диаметром 250 мм, внутренним 127 мм и высотой 200 мм.

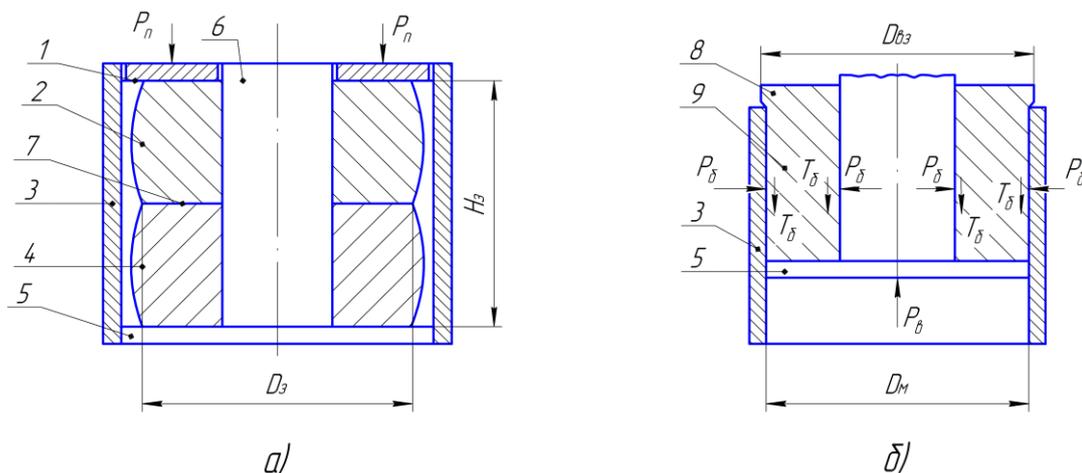


Рис.4.14. Схема прессования (а) и выталкивания заготовки (б)

Данные испытаний показали, что три из десяти кругов, полученных по существующей технологии, имели дефекты в виде расслоев, а все десять кругов, полученных по предложенному способу, дефектов не имели.

Следует отметить, что в настоящее время согласно разработанного ТУ 2-036-1023-88 круги наружным диаметром 250 мм имеют максимальную высоту 100 мм.

Предложенный способ целесообразно использовать для получения абразивных кругов на вулканитовой связке типов 1, 5 и 7.

При определенной эффективности способа [171], предусматривающим предварительное уплотнение без матрицы явление бочкообразования все таки сохраняется, а следовательно, и связанная с ним неоднородность деформации и разноплотность по высоте, что негативно сказывается на качестве и механической прочности кругов.

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 количества брака готовых изделий.

В этом направлении предлагается несколько вариантов технических решений.

Один из них. Оставляя сборку исходной заготовки в виде одного пакета состоящего из кольцевых заготовок и предварительное уплотнение согласно предложению [172], при окончательном прессовании круга в закрытой пресс-форме между пакетом и формовочными плитами устанавливают кольцевые прокладки, изготовленные из вулканитовой массы, не содержащей абразивного зерна [173]. Размер прокладок 1, 2 (рис.4.15) устанавливается из условия равенства их объемов V и V_1 соответственно до окончательного прессования и после, с учетом осадки каждой прокладки на величину, не превышающую половину припуска на высоту прессуемой заготовки и в размер по ее наружному и внутреннему диаметрам, при этом

$$V = 0,25\pi(D_n^2 - d_{вн}^2)h,$$

где D_n и $d_{вн} = (d+0,75b)$ – соответственно наружный и внутренний диаметры кольцевых прокладок; h – высота прокладки, равная высоте кольцевой заготовки; d и b – соответственно внутренний диаметр и ширина прессуемого инструмента.

$$V_1 = 0,5h_1F_{ф.к.},$$

где h_1 и $F_{ф.к.}$ – соответственно припуск на высоту и площадь кольцевой поверхности прессуемой заготовки круга.

Данный способ не требует внесения принципиальных изменений ни в технологию, ни в конструкцию пресс-формы. Опробование способа проходило непосредственно при изготовлении небольшой промышленной партии шлифовальных кругов с наружным диаметром 500 мм, внутренним 305 мм и толщиной 250 мм. Исходный пакет собирался из 25 кольцевых заготовок при толщине каждой из них в среднем 12 мм. Для этого предварительно были

изготовлены традиционной технологией кольцевые прокладки из вулканитовой массы без абразивного зерна с $D_H = 455$ мм и $d_{BH} = 378$ мм согласно приведенным зависимостям. Толщина прокладок равнялась толщине кольцевых заготовок.

В начале для контроля изменения формы и размеров осаживаемого пакета осуществляли ступенчатое прессование с извлечением прессовки из матрицы после каждой ступени прессования вплоть до контакта боковой поверхности пакета со стенкой матрицы. Проведенные измерения показали, что величина бочки не превышала 0,2...0,3 мм.

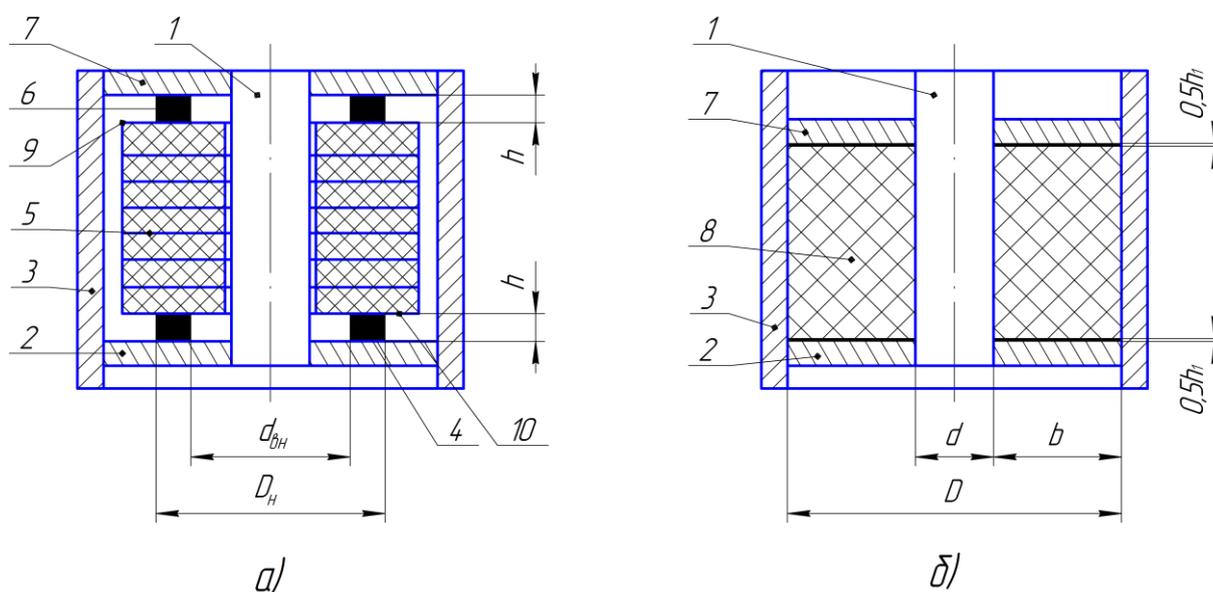


Рис. 4.15. Иллюстрация к способу прессования заготовок через вулканитовые кольцевые прокладки (а, б – до и после прессования)

Другой вариант реализации этого направления также предусматривает значительное снижение сил трения на поверхностях контакта верхней и нижней рабочих плит с прессуемым пакетом за счет установки прокладок из фторопласта – 4 [174]. Этот материал предназначен для изготовления антифрикционных деталей и его коэффициент трения составляет 0,08...0,15 [175]. Исследования данного способа и полученные результаты подробно описаны в экспериментальной главе настоящей работы.

На изменение условий контакта прессовки с верхней и нижней рабочими плитами с целью повышения однородности плотности, прочности и твердости высоких кругов, за счет создания на стадии окончательного прессования однородного напряженно-деформированного состояния, направлено техническое решение [176]. Это решение предусматривает установку прокладок 9 и 10 (рис.4.16) в виде усеченного конуса из материала с высоким модулем упругости между контактными поверхностями пакета с верхней и нижней рабочими плитами пресс-формы, что позволит изменить кинематические и силовые условия скольжения и трения на упомянутых контактных поверхностях путем приложения нормальных усилий монотонно увеличивающихся от центра к периферии.

В дополнение к этому предлагается корпус 1 оснастить пористой антифрикционной втулкой 2, а оправку 3 насадкой 4 из аналогичного материала. По внутреннему периметру стального корпуса 1 и наружной поверхности оправки выполнить вертикальные сквозные проточки 6, 7 для удаления воздуха из замкнутого объема пресс-формы в процессе прессования. Это будет способствовать уменьшению действия сил трения на боковых поверхностях прессовки, контактирующих с кольцевой матрицей и оправкой.

Отметим основные особенности конструкции пресс-формы и ее работы.

Изменения существующей конструкции пресс-формы связаны лишь с оснащением ее соответствующих деталей пористыми антифрикционными элементами, выполнением вертикальных проточек на боковых поверхностях корпуса и оправки и применением прокладок в виде усеченного конуса.

Пресс-форма оснащена верхней 11 и нижней 8 формовочными плитами и смонтирована на тележке 16 с возможностью перемещения по подпружиненному участку рельсового пути 17 для ее подачи в рабочую зону пресса. При этом нижняя формовочная плита 8 опирается опирается через проставку 14 на плиту 15 стола пресса. Оправка 3 смонтирована в державке 5 выталкивателя. 12 – нажимное кольцо. 13 – пакет из кольцевых заготовок.

В начальный момент осадки пакета площадь контакта конических прокладок, выполненных из полиуретана марки СКУ-7Л, с пакетом не превышает $1/3$ всей площади рабочих плит, а площадь поверхности контакта тех же прокладок с рабочими плитами $3/4$ их площади. В процессе прессования поверхности контакта прокладок с плитами монотонно увеличивается, и в конце прессования прокладки принимают форму плоских круговых колец.

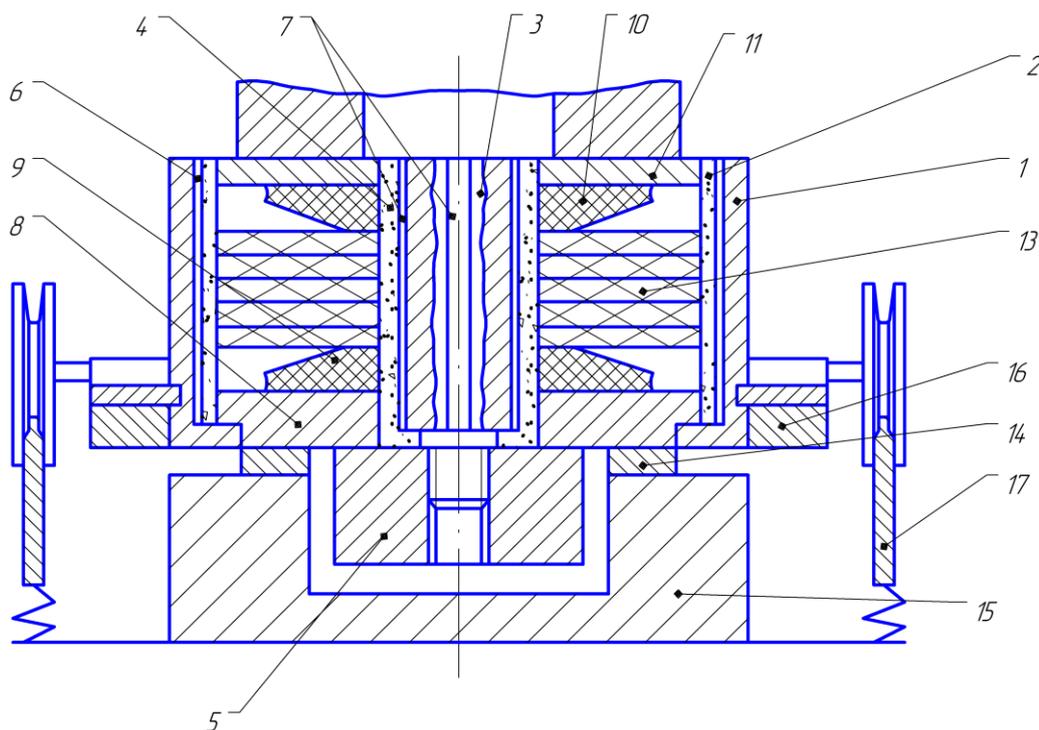


Рис.4.16. Конструкция пресс-формы

Для снижения коэффициента трения между полиуретановыми прокладками и рабочими плитами рекомендуется наносить жидкую смазку, что позволит довести коэффициент трения до $0,15...0,3$ вместо $0,7$ при сухом трении и улучшить условия скольжения полиуретана в радиальном направлении.

На контакте полиуретановых прокладок с торцами пакета, особенно момент прессования, наблюдается «прилипание» материала прокладки к пакету. При дальнейшей осадке происходит «набегание», а затем «прилипание» материала прокладок на торцевые поверхности прессовки. Такой характер

взаимодействия обеспечивает однородное напряженно-деформированное состояние прессовки и позволяет повысить качество заготовок высоких кругов.

Часть приведенных в данном параграфе материалов была освещена в избранных трудах Российской школы по проблемам науки и техники [29] одним из соавторов разработок в этом направлении.

4.6. Перспективные способы и устройства для прессования заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке

Приведенные выше разработки, касающиеся усовершенствования способов и устройств для получения абразивных кругов на вулканитовой связке, не требуют кардинального изменения технологической оснастки. Полученный практический опыт по внедрению в производство большей части выполненных разработок показал, что связанные с этим материальные затраты не велики. Получаемый экономический эффект обеспечивает окупаемость от одного до трех месяцев, за счет устранения брака, повышения качества продукции и снижения энергозатрат.

Сопоставительный анализ эффективности приводимых ниже технических решений в сравнении с достигнутыми результатами показывает, что они могут быть перспективными в дальнейшем развитии производства абразивного инструмента.

Проведенные исследования показали, что силы трения на контактной поверхности корпуса матрицы и оправки с прессуемой заготовкой достаточно велики и при извлечении прессовки из матрицы являются доминирующими среди причин вызывающих расслои в спрессованной пакетной заготовке.

Проведенные мероприятия на производстве в соответствии с выполненными разработками позволили значительно уменьшить вредное влияние этих сил, но не исключить полностью.

Предлагаемое ниже решение позволит полностью исключить силы трения при извлечении прессовки из матрицы.

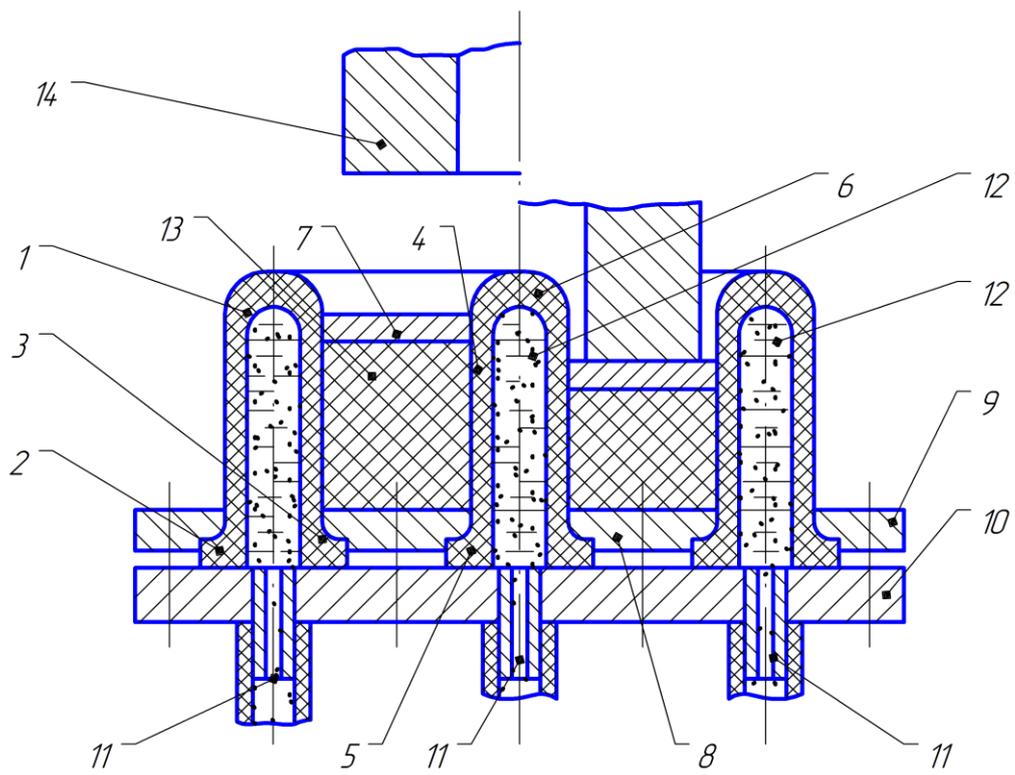
С этой целью предлагается корпус выполнить в виде эластичной кольцевой камеры, а оправку в виде эластичного стакана, дно которого расположено со стороны верхней формовочной плиты, при этом корпус и оправка герметичны и снабжены средствами подвода рабочей среды [177].

На рис.4.17а приведен фронтальный разрез устройства перед началом прессования, а на рис.4.17б на момент извлечения прессовки из матрицы.

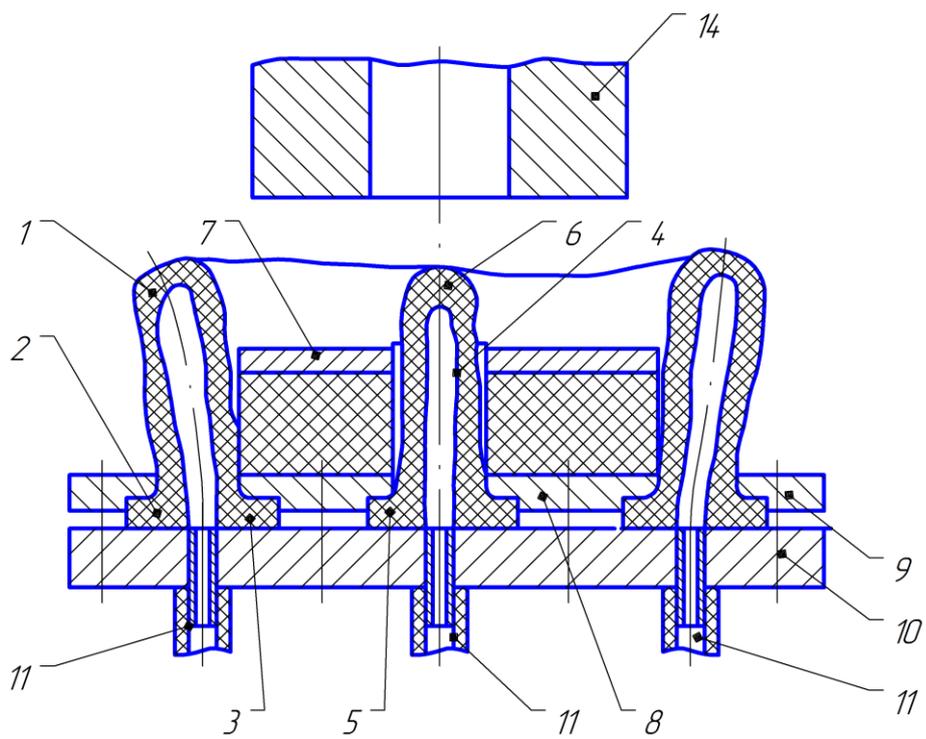
Устройство содержит эластичную камеру 1 с наружным 2 и внутренним 3 буртами, расположенными в ее нижней части, оправку, выполненную в виде эластичного стакана 4 с наружным буртом 5 в его нижней части, дно 6 которое расположено со стороны верхней формовочной плиты 7. Упомянутые бурты герметично обжаты нижней формовочной плитой 8, наружным кольцом 9 и основанием 10, в котором смонтированы средства 11 для подвода рабочей среды 12 в полости кольцевой камеры и стакана. Между верхней 7 и нижней 8 формовочными плитами устанавливается пакет 13 из кольцевых заготовок для прессования промежуточным кольцом 14 закрепленным на ползуне пресса.

По окончании прессования ползун с промежуточным кольцом 14 возвращается в крайнее верхнее положение, а из эластичных полостей пресс-формы сбрасывается давление рабочей среды 12, в результате чего корпус и оправка теряют устойчивость, между ними и прессовкой образуется зазор, обеспечивающий свободное извлечение спрессованной заготовки.

В качестве эластичного материала корпуса и оправки можно использовать маслостойкую резину или силикон соответствующих марок. Подвод рабочей среды (индустриальное масло) к устройству можно осуществлять от привода гидравлического пресса, на котором осуществляется формование.



a/



b/

Рис.4.17. Конструкция эластичной пресс-формы

Были проведены работы по совмещению операций вырубки, пакетирования и прессования заготовок в одной пресс-форме. Опробование в лабораторных условиях [29] способа и устройства [178] показало, что получаемые заготовки имеют повышенную точность и можно отказаться от припусков по наружному и внутреннему диаметрам экономит до 10% исходной вулканитовой массы и в несколько раз уменьшает затраты на механическую обработку. Но в то же время был выявлен существенный недостаток, связанный с большой длительностью операций. Одновременная вырубка, набор пакета с подпрессовкой каждой последующей кольцевой заготовки к предыдущей на гидравлическом прессе достигал как минимум 3 – 4-х и более минут. При этом пуансон совершает значительные перемещения, что привело к необходимости существенно увеличить его длину, а следовательно, и металлоемкость.

Совмещение упомянутых операций, несомненно, прогрессивное и высокоэффективное предложение, но при относительной длительности по времени их совершения.

Достижение этой цели реально, но как показал анализ возможных конструктивных решений, потребуются создание новой конструкции пресс-формы [179], существенно отличающейся от традиционной.

Данное устройство предусматривает оснащение нижней формовочной плиты индивидуальным гидроприводом. На рис.4.18 показана пресс-форма в исходном положении. На рис.4.19 – в текущем.

Пресс-форма работает следующим образом.

Перед началом работы в гидроцилиндры 9 от гидропривода подается рабочая жидкость под давлением. Плунжеры 7 выдвигаются и перемещают формовочную плиту 10 вверх до установки ее на расстоянии от нижней плоскости съемной вырубной матрицы 3, равном удвоенной высоте вырубной заготовки. Затем прокатанная пластина 2 из абразивно-вулканитовой массы укладывается на съемную вырубную матрицу 3, включается пресс, верхний пуансон перемещается вниз и вырубает кольцевую заготовку 11 по наружному диаметру в съемной вырубной матрице 3 и

внутреннему отверстию посредством вставки 4, при дальнейшем движении пуансона 1 вниз осуществляется пакетирование кольцевой заготовки 11 на оправке 6, неподвижно смонтированной в дне 8 кольца 5 пресс-формы, до упора в нижнюю плиту 10. Затем верхний пуансон 1 возвращается в исходное положение, а нижняя плита 10 опускается вниз на расстояние, равное удвоенной высоте вырубаемых заготовок с учетом подпрессовки путем стравливания рабочей жидкости из гидроцилиндров 9.

Затем цикл повторяется: на съемную вырубную матрицу 3 подается следующая часть пластины 2, из которой вырубается очередная заготовка 11, которая при дальнейшем ходе вниз пуансона 1 укладывается на ранее вырубленную заготовку и подпрессовывается к ней. Такие циклы повторяются до тех пор 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 12.

Теоретический хронометраж предложенного процесса прессования показал, что затрачиваемое время на получение спрессованной заготовки в сравнении с существующей при ручной сборке пакета, предварительной подпрессовки, ручной установки пакета в пресс-форму (по времени самая затратная операция) и собственно прессование может сократиться как минимум в четыре раза.

В сравнении с предложением [178] металлоемкость верхнего пуансона в среднем для любых типоразмеров кругов уменьшается более чем в четыре раза. Для заготовки высотой 250 мм величина перемещения пуансона при пакетировании на оправке первой вырубаемой заготовки в сравнении с [178] сокращается в десять раз, что приводит к сокращению и времени пакетирования.

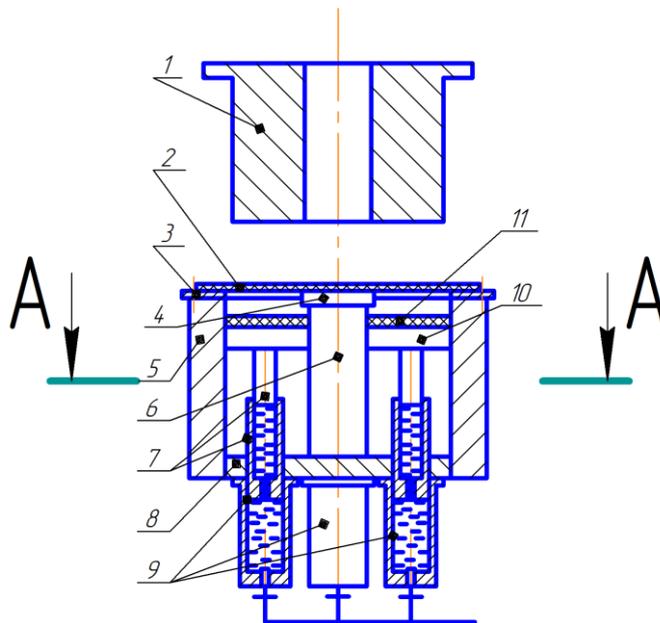


Рис.4.18. Пресс-форма с гидроприводом нижней формовочной плиты
в исходном положении

A-A

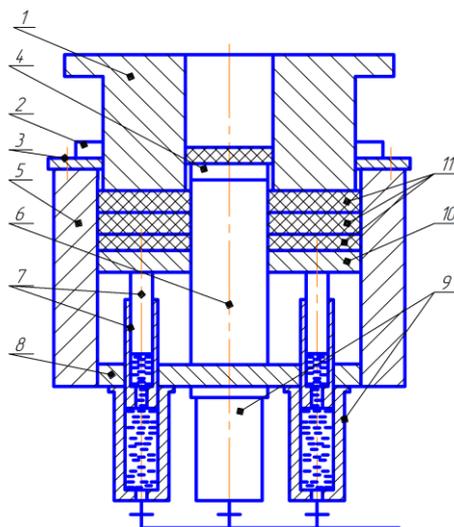
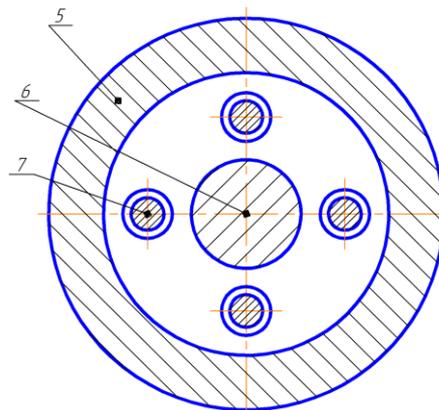


Рис.4.19. Пресс-форма в текущем положении

Как вариант в определенной степени радикального изменения существующего способа производства абразивных кругов на вулканитовой связке, включающем прокатку абразивной массы в листы, вырубку из них кольцевых полуфабрикатов, их пакетирование, предварительное уплотнение пакета свободной осадкой, можно рассматривать выполнение окончательного уплотнения пакета прокаткой путем обжатия коническими валками с пересекающимися осями при соотношении диаметров $D_{вн} / D_{вв} = D_{зн} / D_{зв}$, где: $D_{вн}$ – диаметр валков, прокатывающих заготовку по наружному диаметру; $D_{вв}$ – диаметр валков, прокатывающих заготовку по внутреннему диаметру; $D_{зн}$ – наружный диаметр заготовки; $D_{зв}$ – внутренний диаметр заготовки [180].

На рис. 4.20а показан пакет 1 и конические валки 2 перед уплотнением, на 4.20б заготовка 3 и валки 2 после уплотнения. На рис.4.21а показаны радиальное σ_r и тангенциальное σ_θ напряжения, действующие в точке А контактной поверхности, со стороны верхнего валка на уплотняемый материал, на рис. 4.21б σ_r и осевое напряжение σ_z действующие в точке А со стороны верхнего и нижнего валков.

При прокатке предварительно уплотненного кольцевого пакета путем обжатия горизонтальными образующими двух конических валков с пересекающимися осями, вращающимися в разные стороны, радиальные напряжения в заготовке будут незначительны и различия в их значениях по знаку нет, поэтому они не могут вызвать появления расслоенных дефектов. Кроме того, эти радиальные напряжения действуют не на всей поверхности пакета, а только на незначительной его части. В заготовке при прокатке возникают значительные осевые напряжения на поверхности контакта валков с пакетом, осуществляющие окончательное уплотнение пакета, и значительные тангенциальные напряжения.

Нарушение приведенного равенства изменения линейных скоростей валков и пакета на поверхности контакта приведет к сдвиговым деформациям и расслоям.

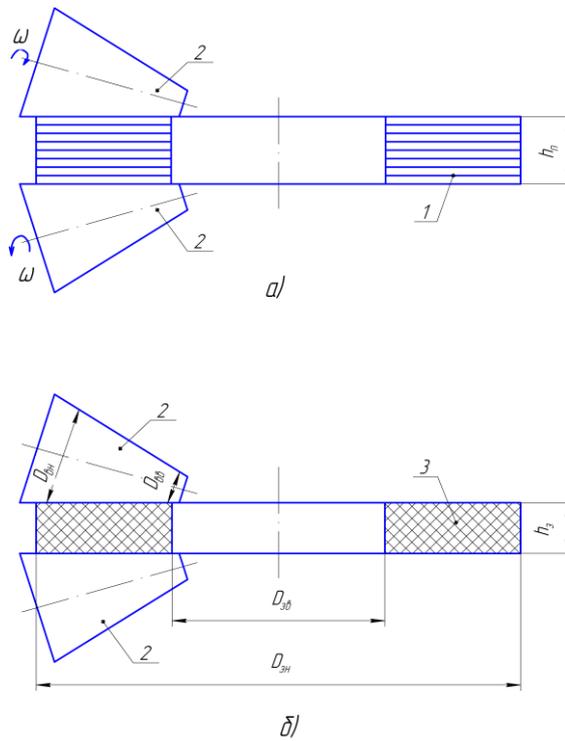


Рис.4.20. Схема прокатки пакета коническими валками

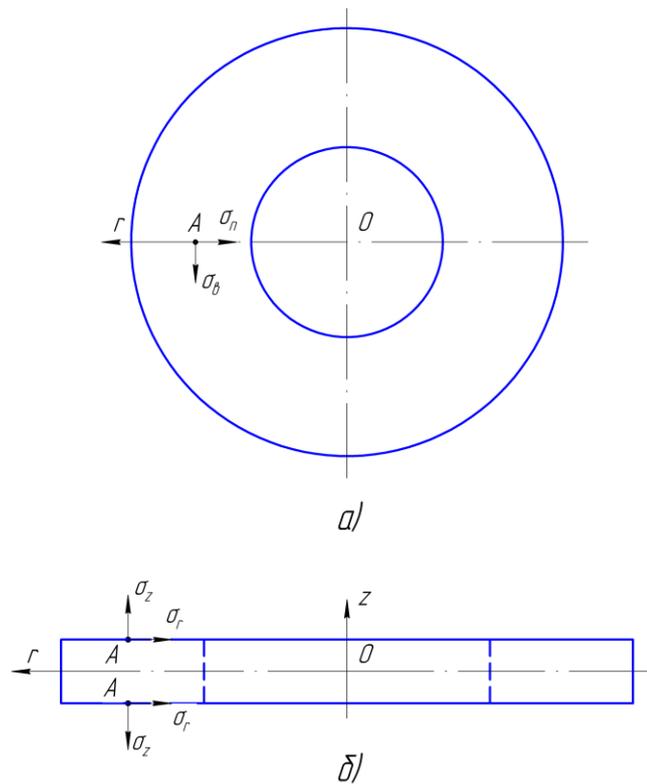


Рис.4.21. Напряжения, действующие при прокатке пакета

Нарушение приведенного равенства изменения линейных скоростей валков и пакета на поверхности контакта приведет к сдвиговым деформациям и расслоям.

Одна пара валков может заменить десятки пресс-форм для получения кругов различного типоразмера. При этом в несколько раз уменьшится трудоемкость процесса окончательного формования пакета. Стоимость пары валков во много раз меньше стоимости одной пресс-формы.

Предложен также новый способ [181] для получения чашечных кругов, исключая такие процессы как прокатку из смеси листов, вырубку из них отдельных элементов круга с последующей ручной сборкой исходной заготовки, а также наличие стыка в заготовке. Кольцевую заготовку получают из абразивно-вулканитовой композиции в закрытой пресс-форме операцией осадки на стержне, а затем в той же пресс-форме путем обжата донной части заготовки и обратного выдавливания боковой стенки получить заготовку в виде чашки.

Также разработаны новые конструкции пресс-форм [182, 183] для получения малых абразивных камней (МАКи) из абразивно-вулканитовых порошковых композиций на пресс-автоматах [184, 185].

4.7. Выводы по главе

1. Выполненные конструкторско-технологические разработки применимы ко всем типоразмерам выпускаемых абразивных кругов на вулканитовой связке и защищены 52 патентами на изобретения РФ, 35 из которых нашли отражение в диссертации.

2. Основной технико-экономический эффект от выполненных и внедренных в производство разработок достигнут за счет материало- и энергосберегающих процессов, существенного сокращения брака, а для ряда кругов полного исключения, универсальности конструкций штампов и пресс-форм, снижения материальных затрат связанных с изготовлением и эксплуатацией технологической оснастки, уменьшения используемой номенклатуры штампов, сокращение тяжелого ручного труда.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НОВЫХ ПРОЦЕССОВ И ОСНАСТКИ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КОЛЬЦЕВЫХ ПОЛУФАБРИКАТОВ И ПРЕССОВАННЫХ ЗАГОТОВОК АБРАЗИВНЫХ КРУГОВ

На основе анализа существующих технологий и математического моделирования процессов получения заготовок для абразивных кругов на вулканитовой связке обработкой давлением были разработаны новые способы и технологическая оснастка [157 – 163, 166, 168, 171 – 174, 178 – 181], направленные на повышение геометрической точности и механической прочности получаемых заготовок, устранение разновысотности кольцевых заготовок, расслоенных дефектов и пузырчатости, возникающих при прессовании высоких абразивных кругов из многослойных кольцевых заготовок, снижение трудоемкости, улучшение условий труда, повышение качества готового абразивного инструмента.

Выполненные разработки стали объектом исследований, целью которых является отработка новых технологий, установление существующих закономерностей при выполнении разделительных и формообразующих операций необходимых для выбора обоснованных режимов обработки и назначения исполнительных размеров технологической оснастки.

Экспериментальные исследования в лабораторных условиях осуществлялись на гидравлическом термопрессе номинальным усилием 1000 кН с применением пресс-формы используемой в промышленном производстве со следующими размерами: внутренний диаметр кольцевой матрицы – 101 мм, высота матрицы – 60 мм, диаметр оправки – 32 мм (рис.5.1).

Экспериментальные исследования в промышленных условиях проводились на поточно-механизированных линиях (ПМЛ) для производства отрезных кругов (рис.5.2) с использованием ножевых штампов (рис.5.3), высоких шлифовальных и полировальных кругов на ПМЛ, включающей гидравлический пресс усилием 6300 кН (рис.5.4) с использованием

производственной технологической оснастки диаметром кольцевой матрицы 515 мм, высотой 200 мм и диаметром оправки 294 мм.

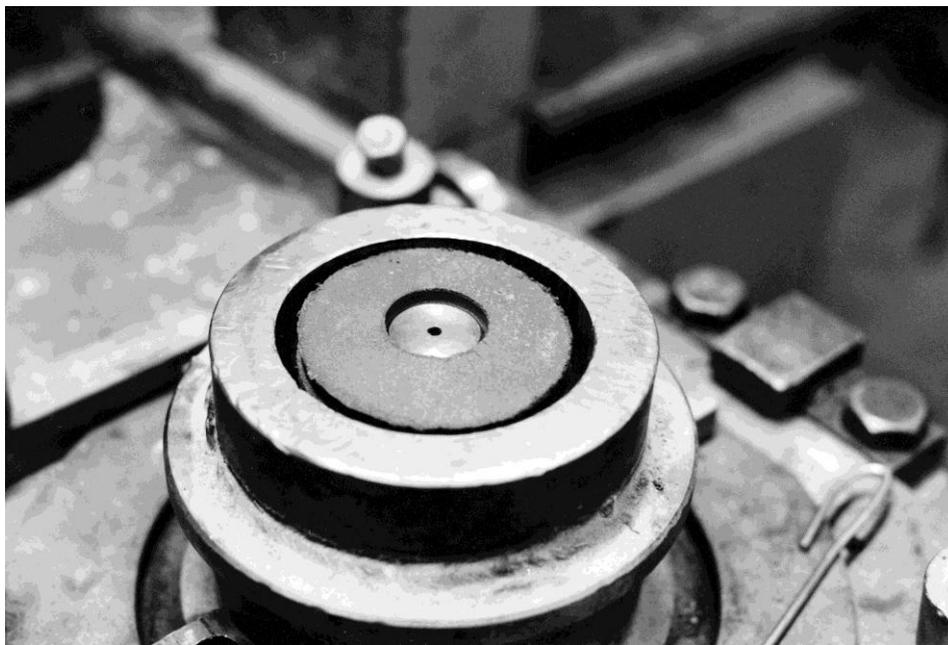


Рис.5.1. Общий вид пресс-формы

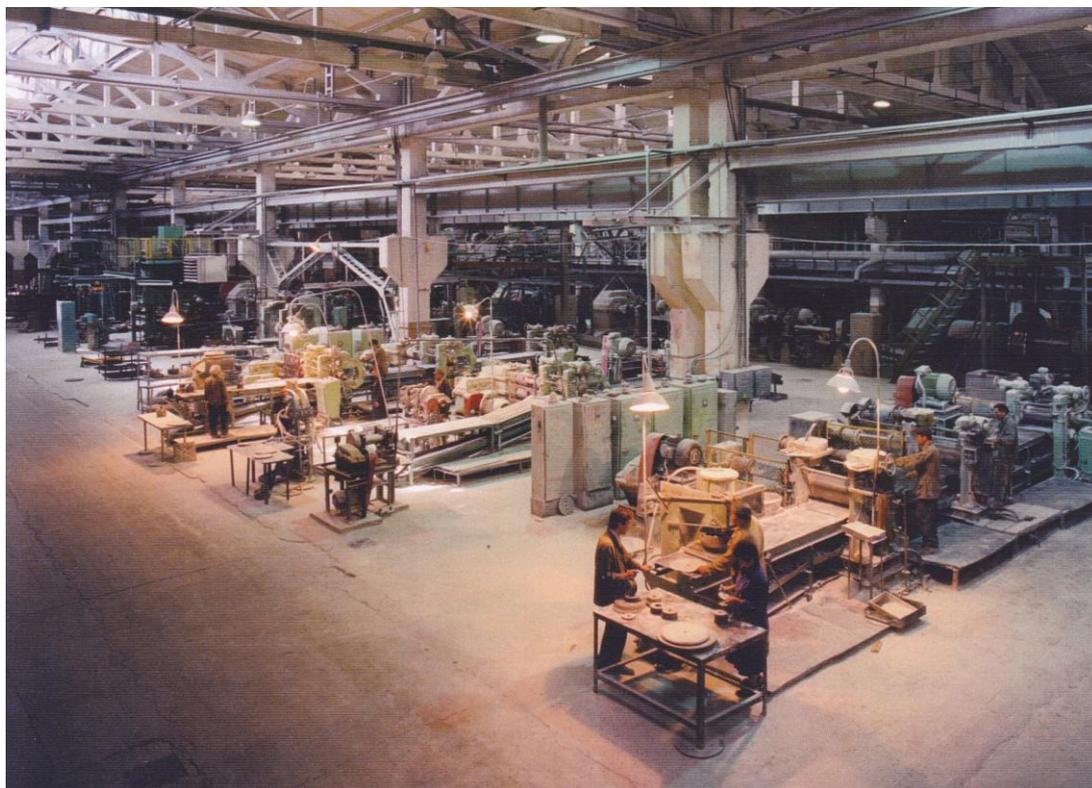


Рис.5.2. Участок поточно-механизированных линий

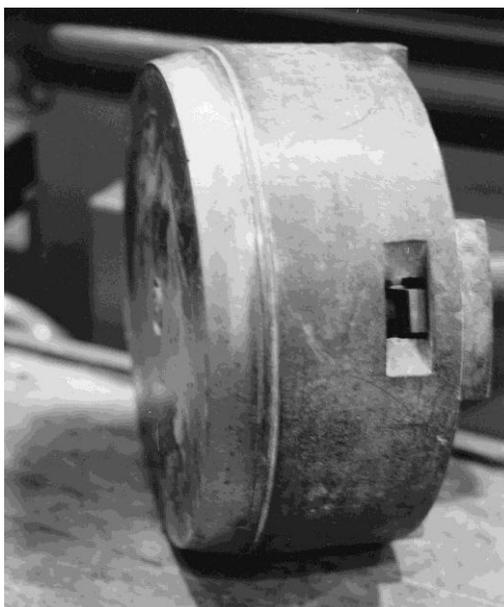


Рис.5.3. Общий вид ножевого штампа

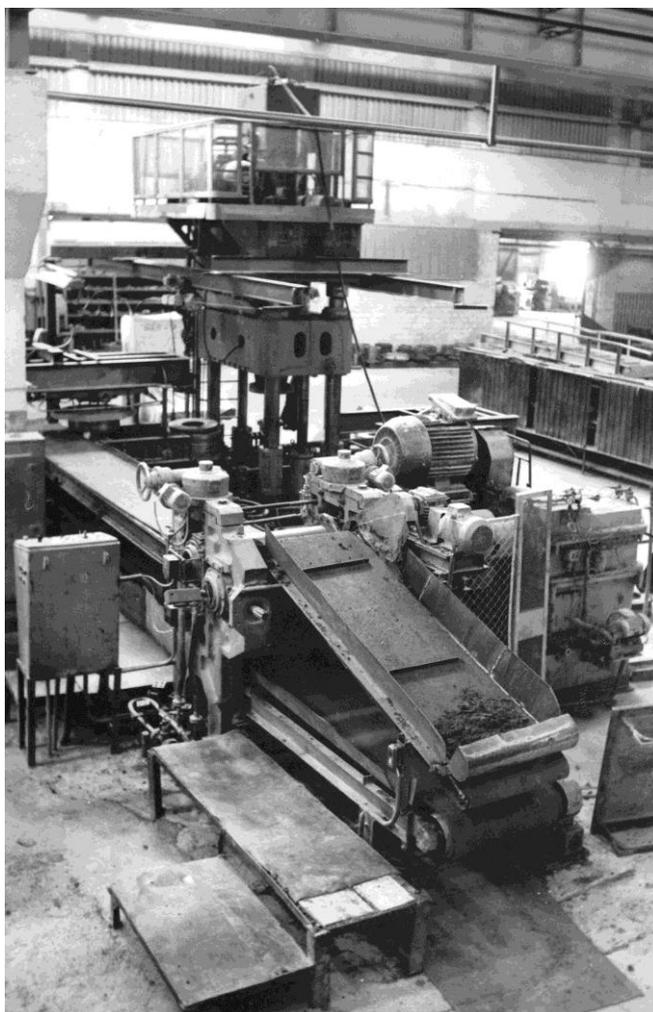


Рис.5.4. Поточно-механизированная линия для производства цилиндрических заготовок абразивных кругов

Данный раздел дополняет и экспериментально подтверждает научные выводы, полученные при математическом моделировании напряженного и деформированного состояния при обработке давлением цилиндрических заготовок абразивных кругов.

5.1. Исследование процесса получения плоских кольцевых заготовок

Применяемая конструкция инструмента для высечки кольцевых заготовок регламентирована стандартом предприятия [186]. Общий вид ножевого штампа приведен в главе 1.

В результате исследования [164] операции высечки кольцевых заготовок ножевым штампом на пневматическом прессе, входящим в состав поточно-механизированной линии, были выделены четыре участка изменения нагрузки, характеризующие не только сам процесс высечки, но и позволяющие определить их влияние на качество получаемых заготовок и состояние рабочих частей штампа.

В начале происходит плавное внедрение ножей в листовую прокат вплоть до момента отделения от него кольцевой заготовки с касанием режущих кромок в подложку. Затем в результате отсутствия возможности визуального контроля за окончательным отделением заготовки от листа, рабочий вынужден осуществлять дожим, чтобы гарантированно отделить вырезаемую часть от листа, который сопровождается кратковременным возрастанием усилия и сравнительно длительной выдержкой штампа под давлением, когда ножи уперты в подложку. Процесс заканчивается переключением пневмоцилиндра на обратный ход и падением нагрузки.

Процесс высечки осуществляется на пневматическом прессе усилием 60 кН, т.е. не требует приложения какого-либо значительной нагрузки.

Наличие и протяженность или отсутствие участка выдержки штампа под давлением зависит от состояния режущих кромок и квалификации рабочего. При остро заточенных кромках наличие этого участка не нужно. Но основная

причина – отсутствие возможности визуального контроля над окончательным отделением заготовки при такой конструкции штампа. В результате интенсивное затупление ножей и быстрый износ подложек в месте контакта с ножами, что приводит к резкому снижению качества получаемых заготовок. Несмотря на это, должный контроль за состоянием ножей и подложкой отсутствует, как и своевременная их перезаточка и перешлифовка. В дополнение можно отметить, что не нужная выдержка под давлением приводит к перерасходу энергоносителя.

На рис. 5.5 проиллюстрирован способ высечки, осуществляемый ножевым штампом.

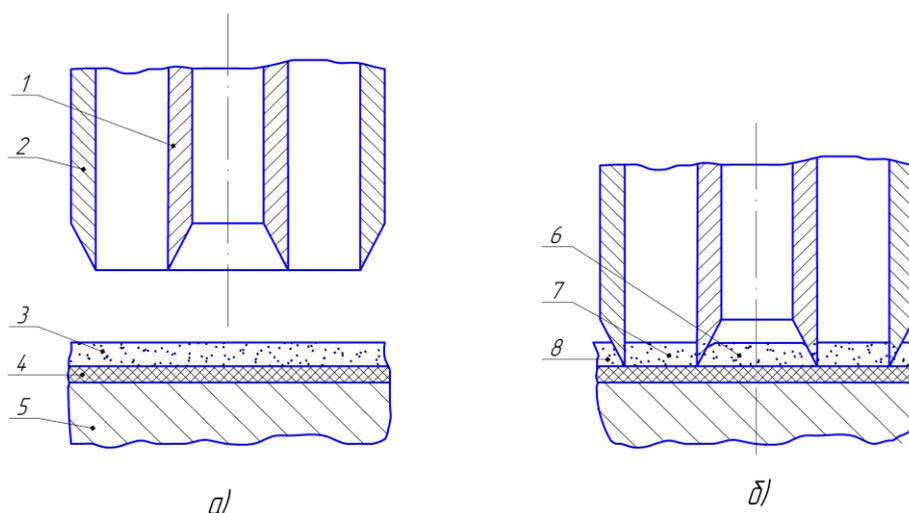


Рис.5.5. Схема высечки кольцевых заготовок абразивных кругов: а – исходное положение; б – в конце хода; 1,2 – режущие элементы; 3 – листовой прокат; 4 – подложка; 5 – стол; 6 – внутренняя высечка; 7 – кольцевая заготовка; 8 – наружный облой

Недостатки применяемого способа и конструкции штампа были отмечены в первой главе. Здесь же отметим следующее.

Проведенные измерения получаемых заготовок показали, что остро стоит проблема устранения разновысотности вырезаемой заготовки, которая возникает при прокатке пластин [187] и составляет нескольких десятков долей миллиметров от номинальной высоты круга. Этого можно избежать, если

вести операцию калибровки, которую целесообразно совместить с вырубкой вместо высечки.

5.2. Исследование процесса открытой осадки многослойных заготовок

Данные экспериментальные исследования включали в себя несколько этапов.

На первом этапе определялись допустимые размеры исходных кольцевых заготовок для эффективного осуществления первой стадии прессования – открытой осадки многослойной заготовки, величину допустимой деформации и соответствующее ей технологическое усилие.

Для решения этой задачи осуществлялась открытая осадка многослойных кольцевых заготовок между плоско-параллельными плитами с использованием образцов высотой (h_0) ≈ 100 и $53...55$ мм, с наружным диаметром (d_n) $\approx 155...157$ мм и 85 мм соответственно. Материал кольцевых заготовок – абразивно-вулканитовые смеси марок СТ и ГС. В процессе эксперимента фиксировались усилие осадки и величина деформации образцов.

Для определения влияния контактного трения на параметры процесса осадку образцов проводили в следующих условиях: 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.5.6.

Исследования [189] 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.5.7). При этом, начиная с относительной деформации $14...16\%$ на боковой поверхности многослойной заготовки образуются трещины, а при дальнейшем увеличении степени деформации – разрывы,

которые не залечиваются и после окончательного прессования. Чередование при наборе многослойного пакета разноцветных кольцевых заготовок (за счет добавки в исходную абразивно-вулканитовую смесь порошка окиси железа) позволило на темплетах наблюдать и фиксировать изменения процесса деформирования заготовок.

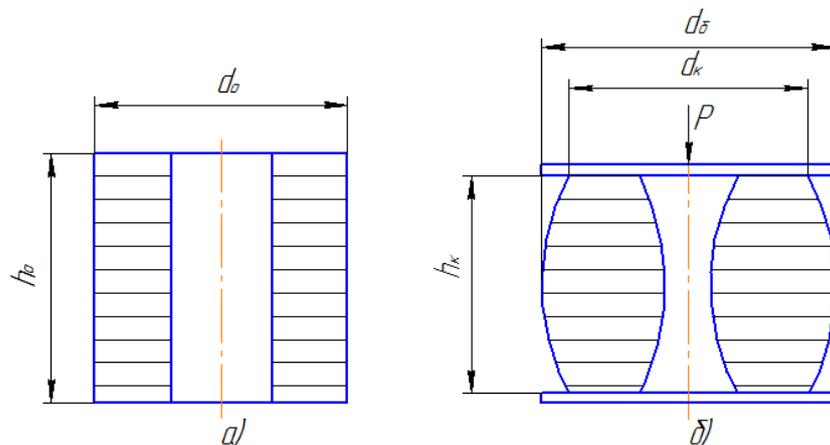


Рис.5.6. Схема замера образцов: а – в исходном состоянии; б – после осадки



Рис.5.7. Образец, осажженный между сухими металлическими плитами с относительной деформацией $\delta = 15\%$

На рис.5.8 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.

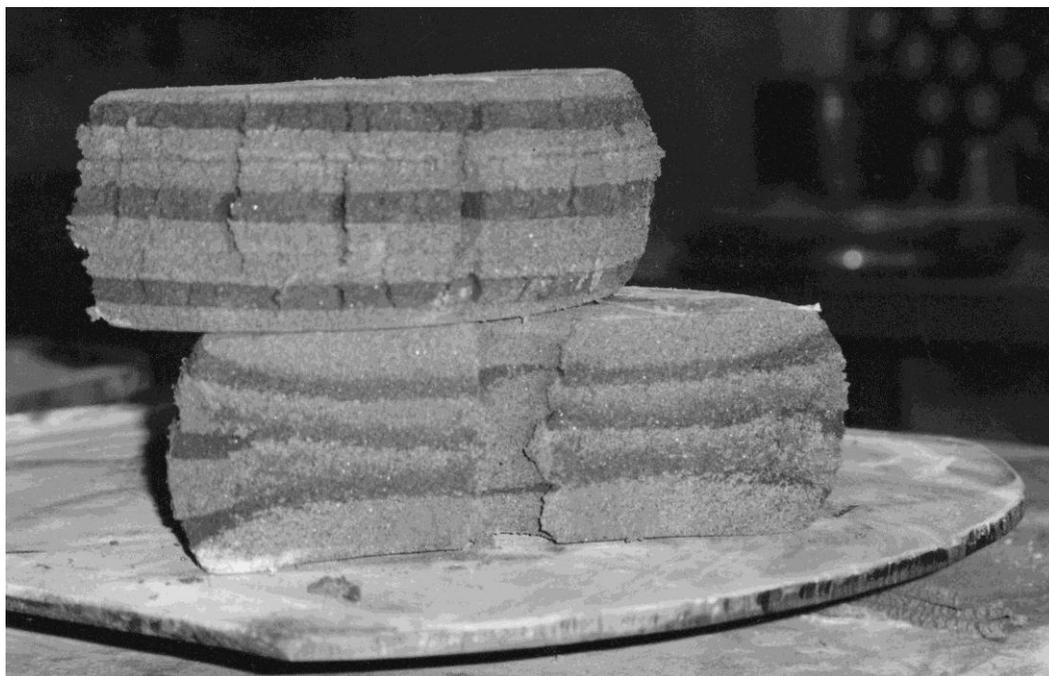


Рис.5.8. Боковая поверхность с разрывами и сечение образца, осажденного между сухими металлическими плитами

Наилучшие результаты имели место при осадке образцов между металлическими плитами рабочие поверхности, которых были покрыты листовым фторопластом (марка – «фторопласт – 4»). Полное название – политетрафторэтилен, твердый синтетический полимер с формулой $[CF_2 - CF_2 -]_n$, обладающий 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.5.9). В процессе осадки происходило равномерное увеличение наружного диаметра многослойной заготовки и уменьшение ее внутреннего диаметра.

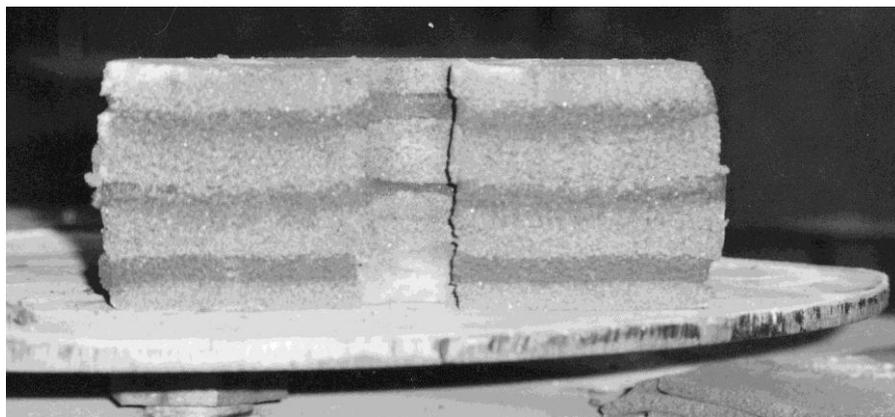


Рис.5.9. Сечение образца, осаженого между металлическими плитами с покрытием из фторопласта

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. Для сравнения было осажено два образца: один – между сухими металлическими плитами с относительной деформацией равной 15%; другой – между плитами с покрытием из фторопласта с относительной деформацией 20%.

Увеличение относительной деформации до 30% и более в условиях свободной осадки привело к выдавливанию внутренних слоев пакетной заготовки на межслойную границу. В результате часть межслойных границ оказалась на торцах отпрессованной заготовки. Было установлено, что большая деформация при свободной осадке независимо от состояния рабочей поверхности плит приводит к образованию «незалечивающихся» разрывов на боковой поверхности, глубина которых превышает припуск на механическую обработку, т.е. возникает неисправимый брак.

Несмотря на обновление и увеличение поверхности схватывания, благоприятно сказывающиеся на прочности сцепления, возникновение существенной неравномерной деформации по объему заготовки и значительное

бочкообразование накладывают ограничение на величину свободной предварительной осадки. Эти же явления не позволяют использовать высокие исходные заготовки существенно меньшим диаметром, чем внутренний диаметр кольцевой матрицы пресс-формы. Неравномерность деформации при осадке высоких многослойных заготовок вызвана тем, что в условиях значительных напряжений трения на контакте с инструментом наблюдается прилипание и, как следствие, значительное бочкообразование.

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 оказывают не столь существенное для практики влияние на уменьшение неравномерности деформации и бочкообразования по сравнению с фторопластовым покрытием.

Проведенный анализ приводит к следующим выводам и рекомендациям:

- существенному уменьшению неравномерности деформации по объему заготовки, устранению бочкообразования при свободной осадке многослойной заготовки способствует уменьшение коэффициента трения на контактной поверхности формовочных плит и обрабатываемой заготовки, при этом наибольший эффект достигается при использовании фторопластового покрытия рабочих поверхностей плит пресс-формы;

- величина относительной деформации обрабатываемой заготовки при открытой осадке ограничивается началом образования трещин на боковой поверхности, так при осадке многослойной заготовки между сухими металлическими плитами относительная деформация ограничена 10...15%, при осадке между плитами с покрытием из фторопласта относительная деформация ограничивается 20...25%;

- усилие открытой предварительной осадки, при котором достигаются установленные пределы относительной деформации, составляет $0,1 \dots 0,2P_{оп}$, где $P_{оп}$ – усилие при окончательном прессовании;

– исходя из экономических соображений и минимизации затрат на освоение нового способа производства высоких абразивных кругов на вулканитовой связке целесообразно использовать существующие пресс-формы, при этом следует внести изменение в исполнительные размеры ножевых штампов, используемых для высечки исходных кольцевых заготовок.

На основании выполненных экспериментальных исследований [42] по определению эластических свойств прессованных полуфабрикатов абразивных кругов предлагается получать кольцевые заготовки [174,188] из предварительно прокатанных пластин на вырубном штампе, у которого наружный диаметр D_1 назначается из условия

$$D_1 = (0,8 \dots 0,85)D_2,$$

где D_2 – внутренний диаметр пресс-формы для формования круга.

Диаметр внутренней режущей кромки d_1 назначать из условия

$$d_1 = (1 + \delta_1)d_0,$$

где δ_1 – коэффициент эластического восстановления диаметра отверстия; d_0 – диаметр отверстия готового круга.

Прессование пакета, набранного из кольцевых заготовок, необходимо осуществлять в пресс-форме (рис.5.10), внутренний диаметр которой D_2 назначается из условия

$$D_2 = D(1 - \delta),$$

где D – диаметр готового круга; δ - коэффициент эластического восстановления круга по наружному диаметру.

Приведенные зависимости позволяют обеспечить экспериментально установленные технологические параметры для открытой предварительной

осадки многослойной заготовки в пределах объема кольца матрицы пресс-формы.

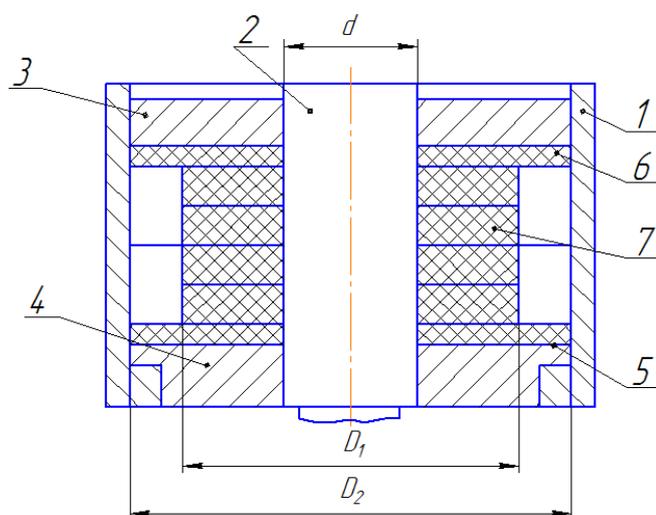


Рис.5.10. Пресс-форма в сборе с кольцевыми полуфабрикатами:

1 – кольцо пресс-формы; 2 – оправка; 3, 4 – верхняя и нижняя формовочные плиты; 5, 6 – верхняя и нижняя прокладки из материала с низким коэффициентом трения по отношению к абразивной массе; 7 – пакет кольцевых полуфабрикатов

5.3. Исследование процесса осадки многослойных заготовок в закрытых пресс-формах

Второй этап работ включал экспериментальное исследование полного цикла прессования многослойного пакета для получения окончательной заготовки круга: предварительная открытая осадка и окончательное прессование по схеме всестороннего сжатия (рис.5.11).

Для исследований использовался существующий производственный ножевой штамп, на котором вырезались заготовки следующих размеров: наружный диаметр $\approx 85,2$ мм, внутренний ≈ 31 мм, высота 7,8...8,0 мм. Размеры кольцевых заготовок и пресс-формы принимались на основании приведенных выше зависимостей. Также как и на предыдущем этапе

использовались заготовки двух цветов. Исходная пакетная заготовка собиралась из 7-ми колец, а общая высота пакета составляла 53...55 мм.

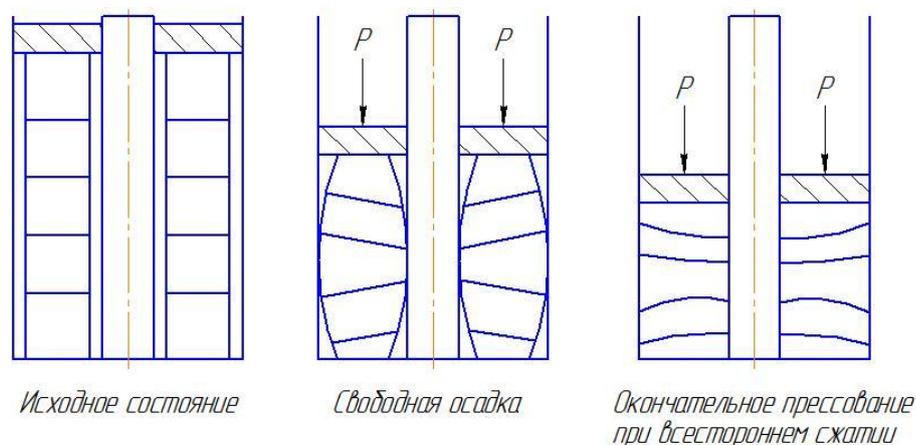


Рис.5.11. Схема последовательного прессования заготовки

При проведении исследований были осуществлены следующие варианты прессований:

- в пресс-форме между сухими плитами без открытой предварительной осадки (существующая технология);
- с выдержкой под давлением после окончательного прессования;
- с подогревом пресс-формы;
- допрессовка с переворотом заготовки;
- прессование сдвоенных заготовок с допрессовкой;
- прессование сдвоенных заготовок с переворотом и допрессовкой;
- в пресс-форме между плитами с фторопластовым покрытием с открытой предварительной осадкой.

В существующей технологии производства шлифовальных и полировальных кругов на вулканитовой связке применяются два способа прессования многослойных кольцевых пакетов.

Один способ предусматривает прессование пакетных заготовок разной высоты по заданной величине абсолютного обжатия. Другой – приложение разных значений усилий прессования по показанию манометра, установленного на прессе для пакетных заготовок разного диаметра.

Оба способа характеризуют неудовлетворительное качество получаемых кругов, больше количество брака в виде расслоев по поверхностям контакта кольцевых заготовок.

При прессовании высоких кругов возникает разноплотность по высоте – верхняя часть спрессованного круга имеет большую плотность, чем нижняя. Неравномерное распределение плотности характеризуется перепадами величины объемного веса круга, что в свою очередь влияет на твердость. В результате такие круги имеют низкие шлифовальные и полировальные свойства, неравномерный износ и т.д. Особенно это проявляется при одностороннем прессовании (рис.5.12).

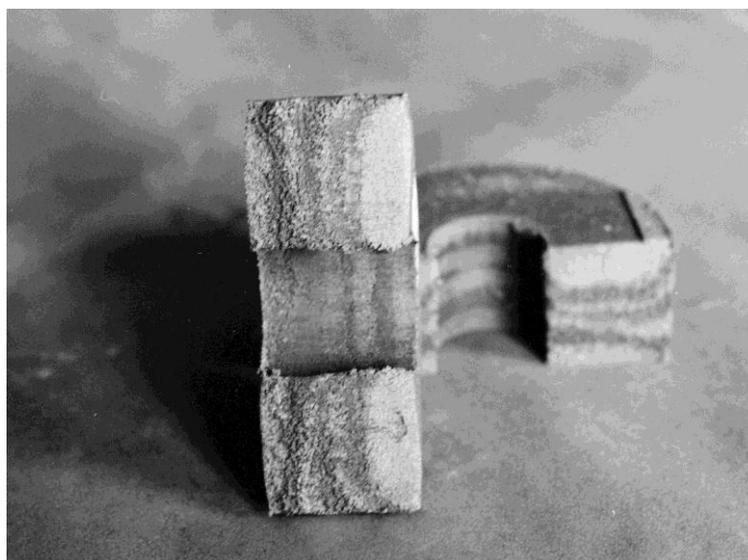


Рис.5.12. Распределение деформаций при одностороннем прессовании

По изогнутости слоев можно судить о распределении деформации исходных кольцевых заготовок.

Анализ образцов, полученных по существующей технологии, показал, что расслойные дефекты являются следствием в первую очередь неравномерной осадки пакетов из кольцевых заготовок. Характер и величина неравномерности деформации, относительный объем бочкообразования при осадке пакета зависят, прежде всего, от условия трения на контактных поверхностях, а также от параметров, характеризующих форму пакета, от кинематических и силовых

условий на контакте с инструментом и от величин термомеханических параметров процесса прессования (температуры, степени и скорости деформации). Применяемые величины абсолютных обжатий кольцевых пакетов разной высоты и разных диаметров не рациональны. При этом не учитываются условия трения на контакте, показатели формы пакетов, количество кольцевых заготовок в каждом пакете и термомеханические параметры.

Объектом последующих экспериментов были способы прессования позволяющие увеличить равномерность деформации, равноплотность, а также прессование с модифицированными контактными условиями [189].

При этом во всех экспериментах был использован положительный эффект от предварительной осадки.

Первая опытная партия прессовок была получена последовательным прессованием, т.е. открытая предварительная осадка и окончательное прессование по схеме всестороннего сжатия. На рис.5.13 показан один из полученных образцов в разрезе.

Сопоставление положения слоев в данной заготовке, с заготовкой полученной по существующей технологии (рис.5.14) позволяет заключить, что в данном случае неоднородность деформации по объему стала меньше, улучшилась равноплотность круга по высоте. Снизилось усилие прессования в среднем на 10...15%. В ходе наблюдения за процессом прессования было также отмечено, что и на выталкивание отпрессованной заготовки требуется меньшее

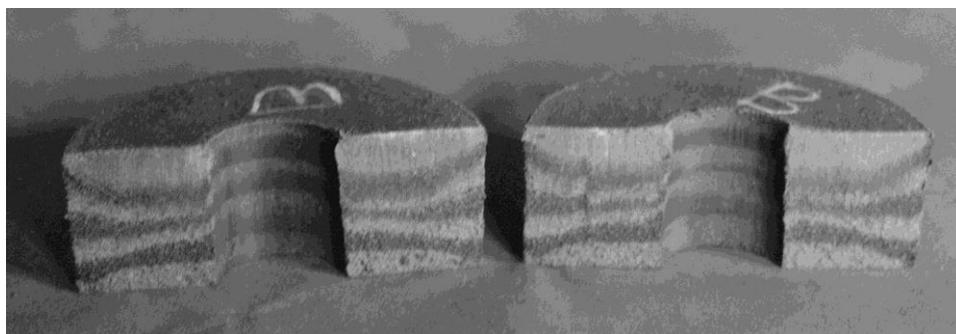


Рис.5.13. Прессованная заготовка в разрезе

усилие, в среднем на 5...7%, а сам процесс выталкивания проходит плавно, что свидетельствует о снижении бокового давления стенок матрицы на прессовку.

Это в свою очередь способствует уменьшению касательных напряжений на границе вышедшей части заготовки из пресс-формы и находящейся в ней, которые также являются одной из причин возникновения расслоев.

На рис. 5.14, 5.15 показаны боковые поверхности заготовок абразивных кругов, которые получаются при прессовании по существующей и исследуемой технологиям.



Рис.5.14. Заготовка, полученная по существующей технологии

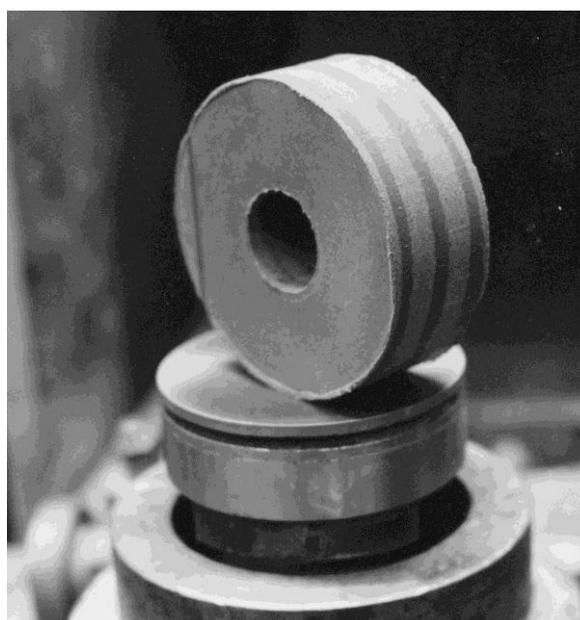


Рис.5.15. Заготовка, полученная по схеме двухстадийного прессования

Следующее опытное прессование было осуществлено по 2-х стадийной схеме между формовочными плитами, покрытыми фторопластом с подогревом пресс-формы и выдержкой под давлением. Параметры прессования: усилие – 250 кН, температура подогрева пресс-формы 45...50°C, время выдержки под давлением варьировалось в следующем интервале: 10, 20, 40, 60 с.

На рис.5.16 показаны два абразивных круга одинаковых размеров и марок. Круг на фото слева получен способом, описанным в предыдущем абзаце, справа – по существующей технологии, при усилии прессования 276 кН.



Рис.5.16. Типовые образцы кругов в разрезе

На правом образце четко просматривается выпуклость («горбушка») на верхнем торце в результате эластического восстановления заготовки. 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%.

Таким образом, равномерное распределение деформации по объему заготовки позволяет уменьшить искажение геометрической формы кругов при их эластическом восстановлении после прессования.

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).

Как видно, точность полученных заготовок абразивных кругов по новому способу достаточно высока и потребность в механической обработке минимальна. Визуальное обследование опытных кругов показало полное отсутствие расслоев, пузырчатости и микротрещин, как после прессования, так и после вулканизации. Исследованный способ также показал, что время выдержки прессовки под давлением можно ограничить до 5 с и прессование осуществлять без подогрева.

Существующие технологии прессования кругов с подогревом пресс-формы реализуют только на специальных термических прессах, имеющих ограниченное штамповое пространство, которое позволяет получать круги наружным диаметром до 100 мм и высотой до 40 мм. Способ с подогревом пресс-формы и длительной выдержкой под давлением обеспечивает получение кругов приемлемого качества, но при высоких затратах и низкой производительности.

На следующем этапе экспериментов исследовались возможности обеспечения равномерного распределения деформации по объему заготовки. Качественную оценку распределения деформации осуществляли по результатам распределения плотности прессовок по высоте сечения и кривизне расположенных слоев в сечении заготовки после прессования.

Заготовки прессовали из абразивно-вулканитовой смеси марки СТ16. Используемые кольцевые заготовки имели следующие размеры: наружный

диаметр 125 мм, высота $7\pm 0,5$ мм, диаметр отверстия 32 мм. Внутренний диаметр кольцевой матрицы пресс-формы 150 мм.

На рис.5.17 приведены две отпрессованных заготовки для высоких кругов, каждый из которых получен сложением двух предварительно отпрессованных пакетов состоящих из 8-ми кольцевых заготовок, которые перед окончательным прессованием собирались по схеме приведенной на рис. 5.11.

Прессование пакетов с различным давлением рабочей жидкости, подаваемой в гидроцилиндр пресса не оказало заметного влияния на равномерность распределения деформации по объему заготовки (рис.5.17).

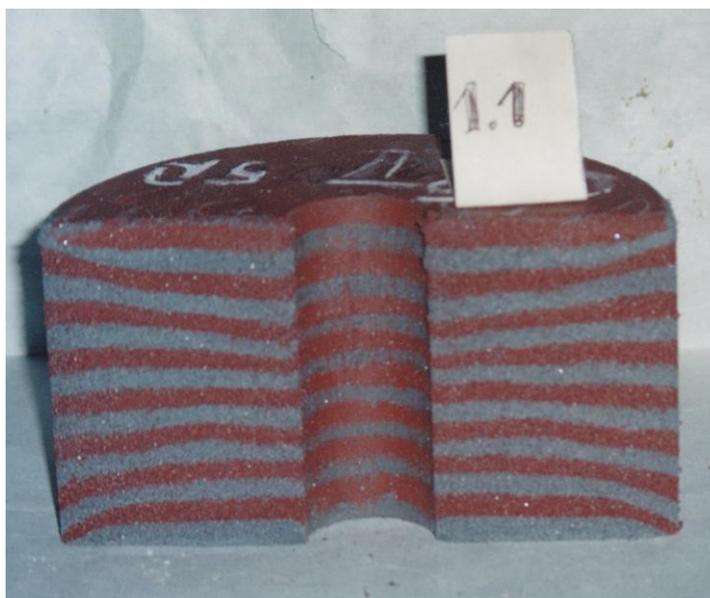
Это подтверждают и результаты измерения плотности обоих заготовок. Плотность заготовки полученной при давлении 3 МПа составляла $2,47 \text{ г/см}^3$, при давлении 5 МПа – $2,52 \text{ г/см}^3$.

Для сравнения были отпрессованы полуфабрикаты абразивных кругов умеренной высоты, полученные таким же способом.

На рис.5.18 показана одна из прессованных заготовок в разрезе, полученная из пакета состоящего из 8-ми колец без переворота.

На рис.5.19 приведен образец круга того же типоразмера, что и предыдущий, но полученный прессованием из 2-х предварительно осаженных пакетов, каждый из которых состоял из 4-х кольцевых заготовок. Перед окончательным прессованием пакеты были собраны по схеме представленной на рис.5.20.

Из представленных образцов видно, что для кругов умеренной высоты такой технологический прием как прессование кругов из сдвоенных заготовок в соответствии со схемой представленной на рис.5.11 дает положительный результат. Плотность по сечению такого круга находится в пределах $2,56...2,63 \text{ г/см}^3$, а слои, равно как и линии контакта кольцевых заготовок, после прессования остались, практически, параллельны и одинаковой толщины.



а)



б)

Рис.5.17. Прессованные заготовки для высоких кругов

Благодаря умеренной высоте заготовок уровень нормальных напряжений на всех межслойных границах становится близким друг к другу, что обеспечивает равномерность деформации по всему объему заготовки. Достижение требуемой плотности можно обеспечить за счет увеличения нормальных напряжений при прессовании, что также будет способствовать улучшению процесса адгезии на межслойных границах.

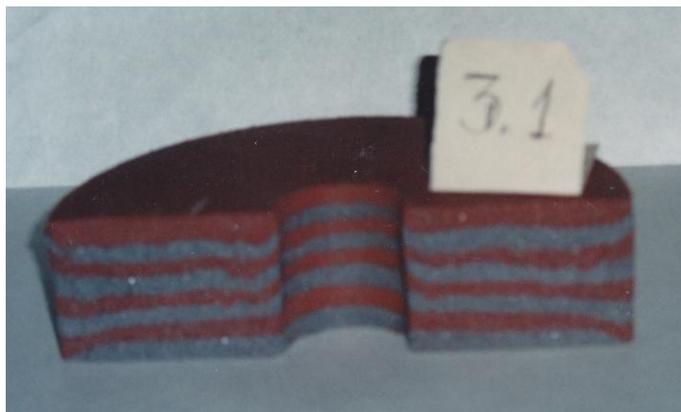


Рис.5.18. Сечение прессованной заготовки абразивного круга умеренной
высоты

Для кругов умеренной высоты повышению равномерности распределения деформации по объему способствует прессование и одинарной пакетной заготовки с переворотом после предварительного прессования (рис.5.21).

Таким образом, можно заключить, что для получения кругов умеренной высоты прессование пакетных заготовок с переворотом на 180° и двойных пакетных заготовок по схеме приведенной на рис.5.20 обеспечивает достаточную для практики равномерность распределения деформации по объему заготовки, равноплотность по сечению и низкий дисбаланс круга.

Недостаток при прессовании с переворотом – снижение производительности.

После физического моделирования различных способов прессования кругов в лабораторных условиях было проведено опытно-промышленное прессование заготовок шлифовальных кругов по рецептуре СТ без жидкого каучука с размерами 502x125x305 мм.

Для этого была использована пресс-форма с внутренним диаметром кольцевой матрицы 515 мм. Кольцевые заготовки, в отличие от существующей технологии, вырубались меньшим диаметром (490мм) для осуществления в пресс-форме свободной предварительной осадки. Рабочие поверхности формовочных плит были оснащены фторопластовыми накладками толщиной 3 мм.

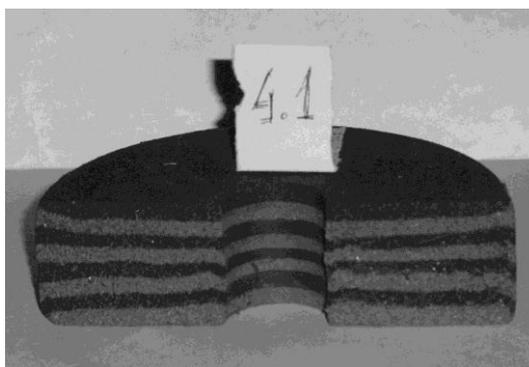


Рис.5.19. Сечение заготовки абразивного круга умеренной высоты после прессования из двойной заготовки с переворотом

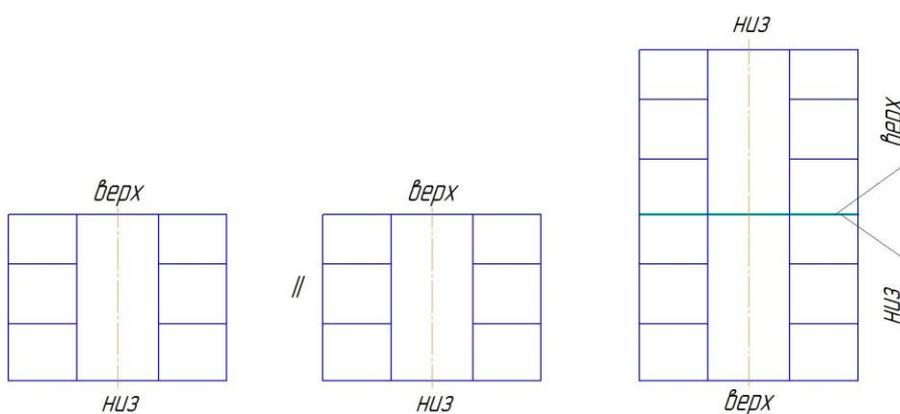


Рис.5.20. Схема сборки пакета перед окончательным прессованием

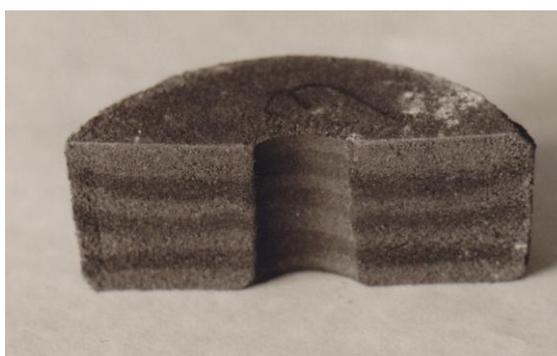


Рис.5.21. Образец, полученный прессованием из одинарной пакетной заготовки по схеме: предварительное прессование – переворот на 180° – окончательное прессование

Исходные кольцевые заготовки получали на поточно-механизированной линии «600», а прессование из пакета кольцевых заготовок на гидравлическом прессе Д2238.

Прессование проводилось по следующей схеме:

- первая подпрессовка при давлении 5 МПа;
- вторая подпрессовка при давлении 10 МПа;
- окончательное прессование до давления 16 МПа;
- выдержка под давлением окончательного прессования 30 с.

Для сравнения также были отпрессованы заготовки в соответствии с действующей технологической инструкцией.

Полученные круги разрезали по диаметру на фрагменты для обнаружения возможных дефектов.

На рис.5.22 показан фрагмент заготовки шлифовального круга, полученного по новой технологии.

Эксперименты показали, что сечение полученного круга имеет однородную структуру, расслои отсутствуют, на боковой поверхности, как и по сечению, малозаметны остаточные следы линий контакта кольцевых заготовок, из которых был собран пакет. Это свидетельствует о том, что процесс адгезии на контактных плоскостях кольцевых заготовок, собранных в пакет, прошел в достаточном объеме.



Рис.5.22. Фрагмент заготовки шлифовального круга

На рис. 5.23 приведены фрагменты сечений заготовок шлифовальных кругов, которые имели место при прессовании по существующей технологии. Значительные касательные силы трения на поверхностях контакта исходной пакетной заготовки с формующими плитами привели к возникновению растягивающих напряжений, которые стали причиной разрыва кругов. Характер и место расположения трещин подтверждают действие именно касательных сил трения. По четко выраженным следам линий контакта заготовок можно предположить о явно недостаточной адгезии между слоями пакета. Имеется также наличие остаточной бочки на боковой поверхности. Брак по расслою и разрыву кругов, наиболее часто имеющий место, может составлять до 85% от прессуемой партии заготовок.

Заготовки для шлифовальных кругов из опытной партии, полученной по новой технологии, брака по расслою не имели и полностью удовлетворяли требованиям ГОСТ 22424 – 83.

Для определения плотности полученных кругов фрагменты их серединной части разрезали на 12 кубиков и затем измеряли их плотность до, и после вулканизации. На рис.5.24 показана схема раскроя фрагмента круга, а на рис.5.25 один из результатов измерения распределения плотности по сечению круга (цифры в скобках означают номер фрагмента в сечении круга, численные значения в рамках и без рамок – значения плотности г/см^3 после вулканизации и до, соответственно).

Полученные результаты распределения плотности по сечению шлифовального круга марки СТ представлены графически на рис.5.26.

Максимальный перепад значений плотности заготовок после прессования составлял: по высоте $0,07 \text{ г/см}^3$, по диаметру – $0,03 \text{ г/см}^3$. После вулканизации соответственно $0,04$ и $0,01 \text{ г/см}^3$. Из представленных результатов видно, что заготовки, изготовленные по предложенной технологии, 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.



Рис.5.23. Характерные виды брака при прессовании шлифовальных кругов

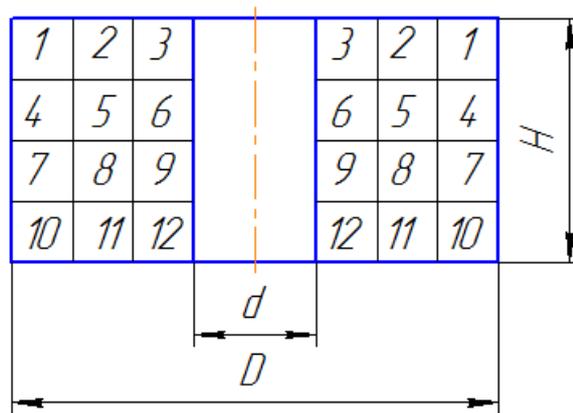


Рис.5.24. Схема раскроя круга

Верх

<i>Наружная поверхность круга</i>	2,68 (1) 2,74	2,66 (2) 2,72	2,67 (3) 2,74	<i>Отверстие круга</i>
	2,64 (4) 2,72	2,63 (5) 2,71	2,63 (6) 2,71	
	2,63 (7) 2,71	2,55 (8) 2,66	2,60 (9) 2,68	
	2,65 (10) 2,71	2,64 (11) 2,71	2,65 (12) 2,72	
	<i>Низ</i>			

Рис.5.25. Распределение плотностей по сечению круга

Наибольшие значения плотностей приходятся на верхнюю и нижнюю части круга, контактирующие с формовочными плитами, меньшее значение на среднюю часть круга. Так, разница плотностей между верхней частью и серединой составляет $0,07 \text{ г/см}^3$, а между нижней частью и серединой до $0,05 \text{ г/см}^3$.

Некоторому выравниванию плотности заготовки способствует вулканизация. Измерения показали, что в среднем разброс значений плотностей заготовки по сечению после вулканизации уменьшается на 3...5%.

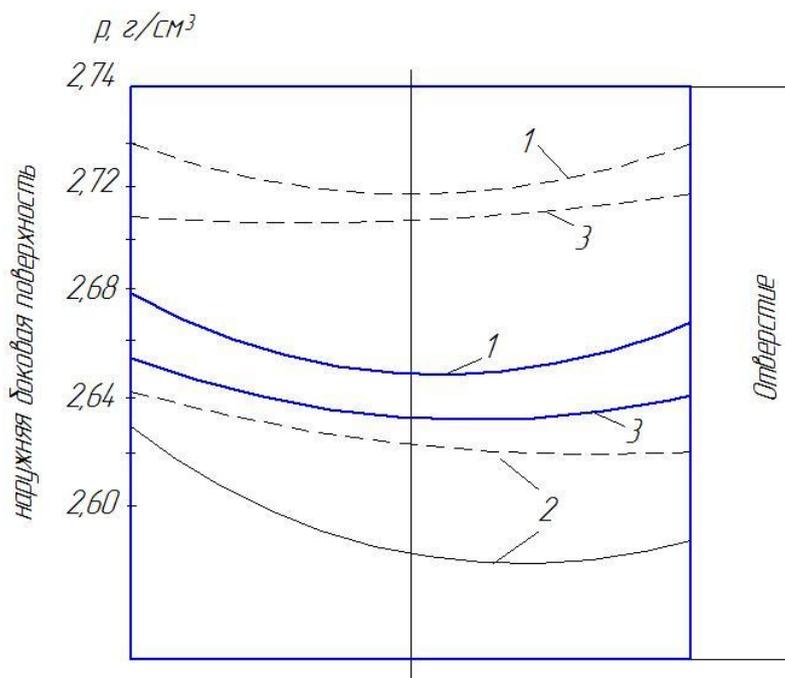


Рис.5.26. Распределение плотности по сечению круга:

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

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.

5.3.1. Исследование процесса прессования заготовок с модифицированными контактными условиями

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, дефектам прессованных заготовок.

Неоднородное напряженное и деформированное состояние, имеющее место в прессовке, на готовом круге вызывают разноплотность, разнотолщинность, разнотвердость, неоднородность структуры, дисбаланс круга, приводят к искажению геометрической формы заготовки после операции прессования и в процессе вулканизации.

Так, 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 (рис.5.27), заметная невооруженным глазом.

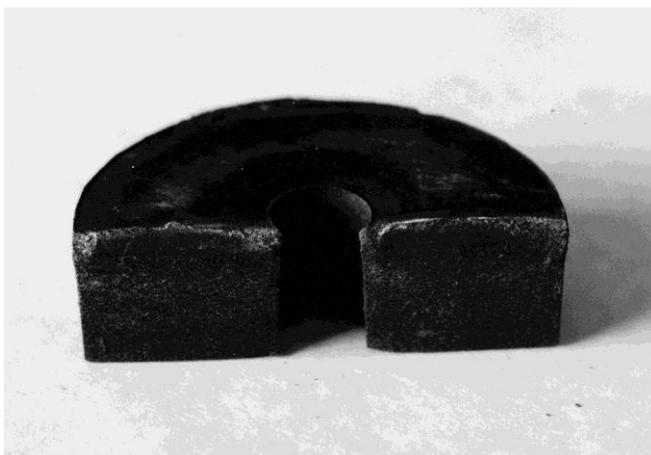


Рис.5.27. Вид абразивного круга полученного по существующей технологии

Следует считать, что максимум выпуклости соответствует максимальной величине нормального осевого напряжения, действующего при прессовании на поверхности контакта прессовки с верхней формовочной плитой. Величина этого напряжения зависит от свойств обрабатываемого материала, параметров формы прессовки, а также от силы и коэффициента трения на поверхности контакта.

Устранить описанный недостаток представляется возможным путем изменения векторов сил трения, за счет выполнения рабочей поверхности верхней формовочной плиты в виде выпуклого сегмента (рис.5.28) [190].

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.

Для назначения необходимой стрелы h сегментной поверхности были выполнены экспериментальные исследования прессуемых заготовок в зависимости от технологических параметров процесса и состава компонентов смеси.

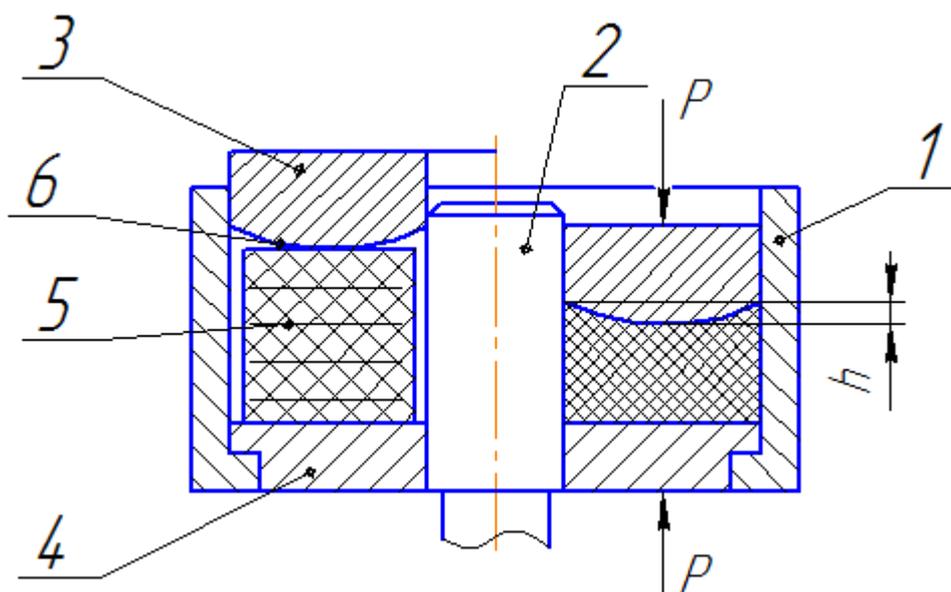


Рис.5.28. Пресс-форма с сегментной верхней формовочной плитой:
1 – корпус; 2 – оправка; 3 – сегментная верхняя формовочная плита; 4 – нижняя формовочная плита; 5 – пакет из кольцевых заготовок; 6 – рабочая поверхность сегментной формовочной плиты со стрелой h

Наибольшее влияние величина обжата оказывает на относительное эластическое восстановление проката из смесей, предназначенных для мягких полировальных кругов и наименьшее для проката из смесей, предназначенных для отрезных кругов. В результате исследований были получены численные значения эластического восстановления высот проката от относительного обжата для разных составов смесей.

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 обжата, температуры подогрева, времени нагружения.

Для выявления перечисленных зависимостей были выполнены специальные исследования [42], которые стали развитием исследований, носивших частный характер [11].

Анализ полученных результатов показал следующее.

Существенное влияние на эластическое восстановление высоты образцов оказывает температура (рис.5.29), особенно в интервале от 20° до 45°С. Учитывая, что при прессовании ряда типоразмеров шлифовальных и полировальных кругов пресс-формы предварительно подогревают, установленное явление свидетельствует в пользу необходимости четкого контроля температурного режима.

Наряду с температурой заметное влияние на эластическое восстановление высоты образца оказывает время выдержки его под нагрузкой (рис.5.30). Увеличение времени выдержки образца под нагрузкой приводит к уменьшению величины эластического восстановления высоты образца, особенно при большем значении температуры в исследуемом интервале. При этой и интенсивность изменения эластического восстановления ниже. Если для образца с комнатной температурой и зернистостью 25 мкм при увеличении времени выдержки с 10 до 60 с эластическое восстановление уменьшается в

1,62 раза, то для того же образца при температуре 70°С происходит уменьшение лишь в 1,025 раза.

Анализируя полученные зависимости для установления влияния зернистости шлифматериала на эластическое восстановление образцов по высоте можно заключить, что этот показатель не оказывает какого-либо существенного влияния на исследуемый параметр.

В подтверждение сделанного заключения рассмотрим соответствующие кривые на рис.5.30. Видно, что для образца с зернистостью шлифматериала 10 мкм при выдержке под нагрузкой 10 с при увеличении температуры с 22° до 70°С эластическое восстановление высоты образца уменьшилось в 2,36 раза, для образца с зернистостью 16 мкм – в 2,4 раза, с зернистостью 25 мкм – в 2,54 раза, с зернистостью 40 мкм – в 2 раза, т.е. максимальная разница не превышает 20%. При этом с увеличением времени выдержки образцов под давлением эта разница уменьшается.

Из рис.5.30 также видно, 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 δ по высоте прессуемых кругов

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

Опытным путем было установлено, что в случае величины сегмента со стрелой h равной δ (так для кругов марки СТ значение δ в среднем составляет 1,3 мм), на верхнем торце отпрессованного круга остается вогнутость, составляющая от 0,1 до 0,5 мм (рис.5.31б), а при h равной $(0,1 \dots 0,2) \delta$

наблюдалась заметная выпуклость в результате эластического восстановления, которая составляла 1,1...1,2 мм (рис.5.31а).

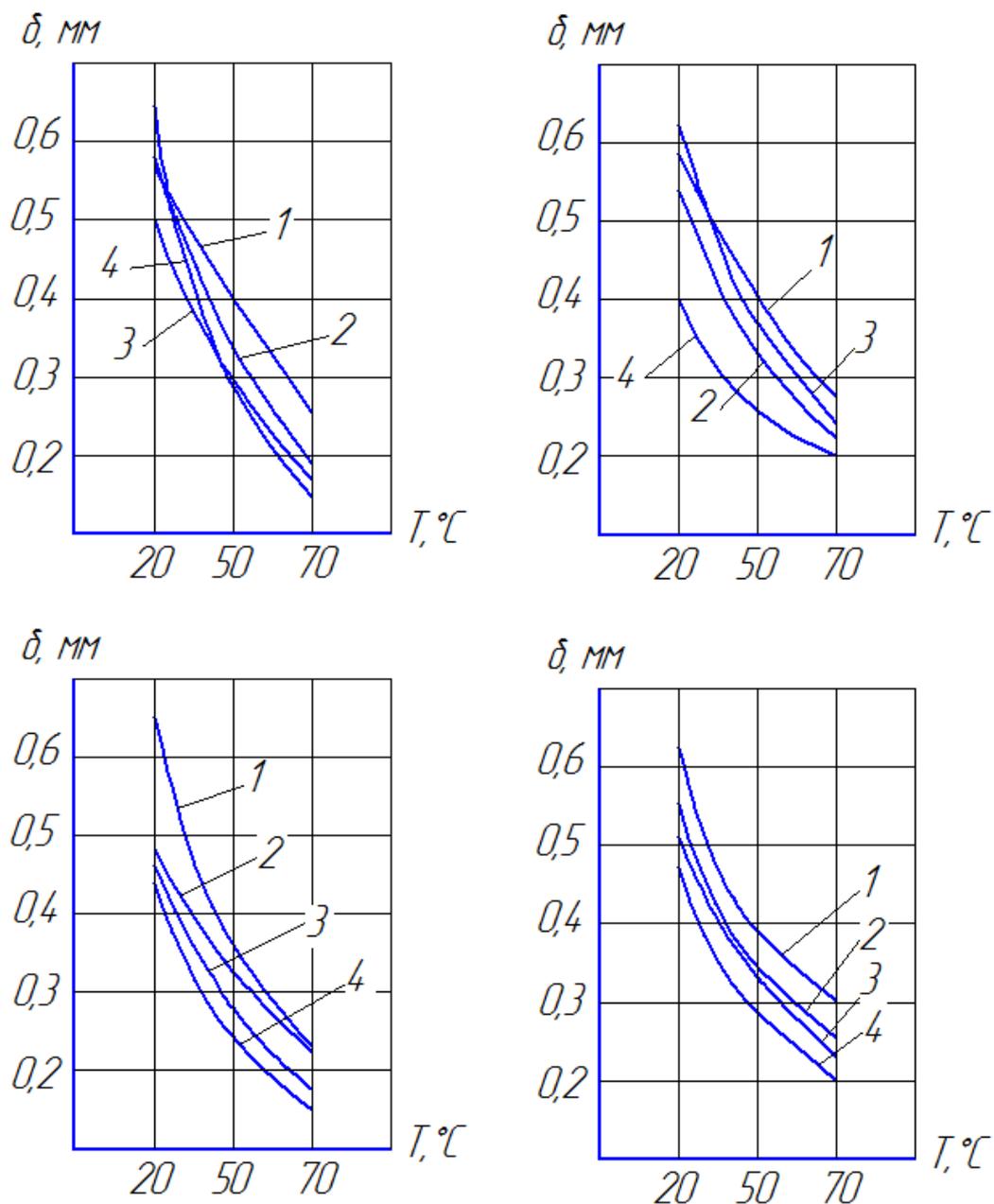


Рис.5.29. Зависимость эластического восстановления образцов от температуры по высоте с зернистостью 10 мкм (а), 16 мкм (б), 25 мкм (в) и 40 мкм (г) при выдержке под нагрузкой: 1 – 10 с; 2 – 20 с; 3 – 30 с; 4 – 60 с

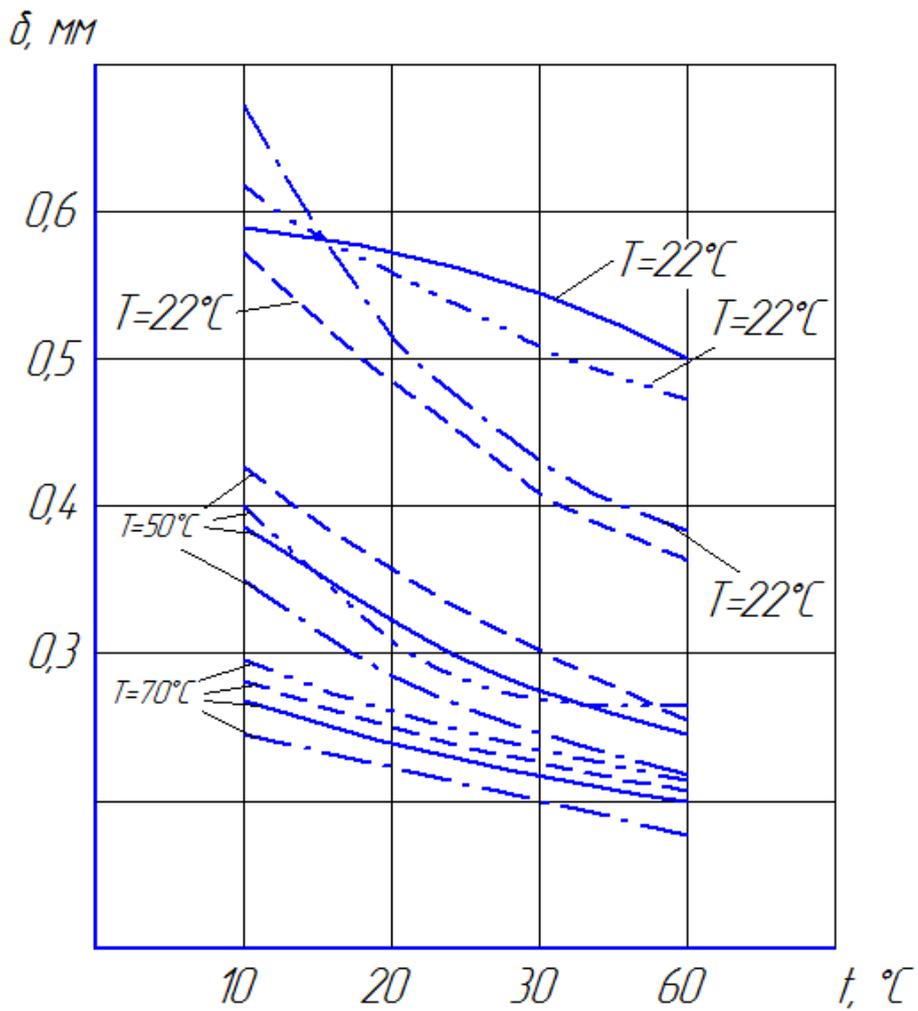
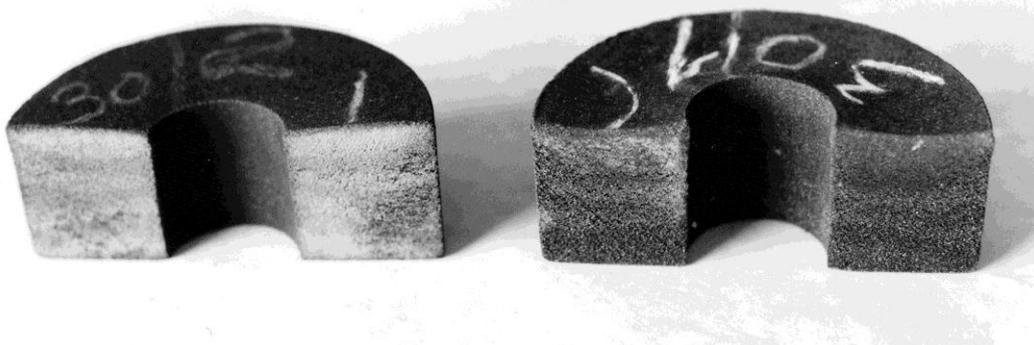


Рис.5.30. Зависимость эластического восстановления образцов по высоте от времени выдержки под нагрузкой при различных температурах:

----- — зернистость 10 мкм; ----- — зернистость 16 мкм;
 —●—●— — зернистость 25 мкм; —×—×— — зернистость 40 мкм



а)

б)

Рис.5.31. Опытно-промышленные круги

При $h = 0,8 \delta - 0,1 \dots 0,2$ мм; при $h = 0,5\delta$ была зафиксирована остаточная выпуклость, не превышающая $0,04 \dots 0,05$ мм (рис.5.34). При $h = 0,4\delta$ и $h = 0,3\delta$ остаточная выпуклость практически мало отличалась, друг от друга и в среднем не превышала $0,03 \dots 0,04$ мм.

Описанный выше способ был опробован в промышленных условиях при производстве шлифовальных кругов марки СТ с размерами $250 \times 120 \times 32$ мм. Абсолютная величина эластического восстановления размера кругов по высоте для используемого материала составляла 1,3 мм, стрела сегмента h составила 0,4 мм.

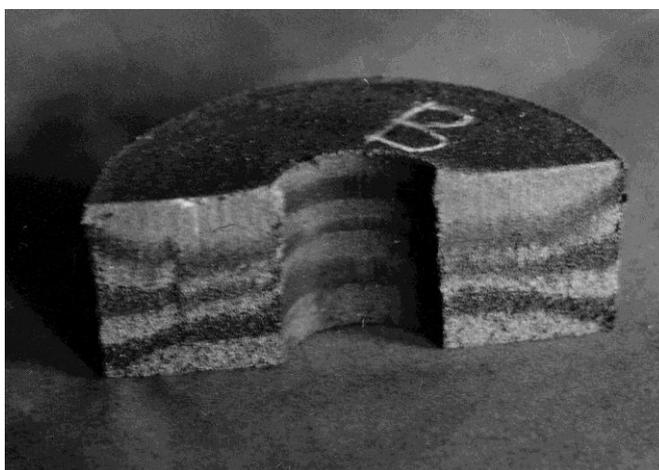


Рис.5.34. Опытно-промышленный круг

Из полученных двадцати опытнo-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.

5.4. Выводы по главе

1. Экспериментально подтверждено, что оригинальные технические решения конструкций ножей и исполнительного механизма обеспечивают благоприятные условия силового нагружения устройства и надежность работы.

2. Получено экспериментальное подтверждение научных выводов, сделанных по результатам математического моделирования напряженного и деформированного состояния цилиндрических заготовок абразивных кругов полученных обработкой давлением различными способами.

3. Экспериментально подтверждена эффективность разработанных новых способов и устройств для получения заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке, которые позволяют устранить причины, вызывающие наиболее характерные и часто встречающиеся виды брака: расслои, разноплотность, пузырчатость и др.

4. На основании экспериментальных исследований получены зависимости для определения исполнительных размеров технологической оснастки, определены рациональные значения силовых, кинематических, геометрических и текстурных параметров для обработки давлением цилиндрических заготовок.

5. Впервые дано экспериментальное обоснование причин, вызывающих возникновение расслоев, разноплотности, разнотолщинности, неоднородности структуры, к которым в первую очередь следует отнести: значительное трение на контакте заготовки с инструментом, осуществление основной деформации заготовки за счет ее центральных слоев, недостаточная величина относительной деформации заготовки открытой осадки.

6. Экспериментально установлено, что наиболее неблагоприятные условия, вызывающие безоговорочный брак при производстве кругов, имеют место в случае осадки многослойной заготовки между сухими металлическими плитами, когда из-за наличия труднодеформируемых участков в месте контакта формовочных плит с заготовкой, и возникающей неравномерной деформации по объему заготовки, происходит интенсивное бочкообразование, которое в совокупности с внутренними напряжениями приводит к образованию разрывов на боковой поверхности, формируемой заготовки и способствует появлению расслоев.

7. Повышению равномерности деформации заготовки по объему и устранению бочкообразования при осадке многослойной кольцевой заготовки способствует снижение коэффициента трения на контактной поверхности формовочных плит и обрабатываемой заготовки, которое можно обеспечить за счет покрытия рабочих поверхностей формовочных плит фторопластом.

8. Принятые на производстве режимы прессования заготовок для высоких кругов не эффективны и создают условия для возникновения разноплотности по высоте (в верхней части отпрессованной заготовки плотность выше чем в нижней), что ухудшает его полировальные свойства и увеличивает дисбаланс круга, делает его износ неравномерным. Наибольшая разноплотность имеет место при одностороннем прессовании.

9. Экспериментально установлено, что наиболее эффективно последовательное прессование многослойной заготовки круга в одной пресс-форме, включающее предварительную открытую осадку и окончательное прессование при всестороннем сжатии, при этом рабочие поверхности формовочных плит покрывают фторопластом.

10. Экспериментально исследованный способ последовательного прессования позволяет:

- снизить усилие прессования на 15%, а за счет уменьшения бокового давления со стороны стенки матрицы на прессовку уменьшить усилие выталкивания на 7%;

- получать однородную деформацию по объему заготовки и практически равноплотные круги по высоте, в которых разница плотностей между верхней частью, серединой и нижней частью не превышает $0,05...0,07 \text{ г/см}^3$, а по диаметру до $0,03 \text{ г/см}^3$ за счет развитой радиальной деформации;

- уменьшить в среднем на 40% величину эластического восстановления заготовки после прессования, которое вызывает искажение геометрической формы прессовки;

- исключить возникновение расслоев за счет повышения прочности сцепления слоев заготовки в результате увеличения относительной деформации при открытой осадке в 1,6...2,0 раза по сравнению с существующей.

11. Обеспечить равномерное распределение деформации по объему заготовки и получить равноплотную структуру возможно также за счет прессования одинарной или сдвоенной пакетной заготовки с переворотом после предварительной открытой осадки.

12. Экспериментально установлено, что величина эластического восстановления прессовок обратно пропорционально зависит от температуры предварительного подогрева заготовок перед прессованием и времени их выдержки под давлением.

13. Выпуклость верхнего торца заготовки в результате эластического восстановления после прессования, возможно, устранить путем уменьшения вектора нормального давления и составляющей вектора силы трения в горизонтальной плоскости, за счет выполнения рабочей поверхности верхней формовочной плиты в виде выпуклого сегмента.

6. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ НОЖНИЦ С ТАНГЕНЦИАЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ НОЖЕЙ И ШТАМПОВ ДЛЯ РЕЗКИ СОРТОВОГО ПРОКАТА, СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСИЛИЙ ДЛЯ ПРЕССОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

6.1. Сравнительное обоснование преимуществ схемы резки с усложненной траекторией относительного перемещения проката и отделяемой части

Из выпускаемого проката не менее 1/4 его части подлежит разделке на мерные заготовки. Еще в конце 80-х годов прошлого века на совещаниях, семинарах и конференциях посвященных заготовительному производству, озвучивались задачи о необходимости создания дешевых, надежных комплексов или ножниц для мелкосерийного производства, создания универсального оборудования для резки проката диаметрами от 10 до 100 мм на одной машине.

В связи с постоянным ростом цен на металл и электроэнергию вопросы экономичного получения заготовок безотходными способами не теряют остроты.

Как было показано в разделе 1, перспективной является резка с поступательным перемещением разделяемых частей проката в двух направлениях с одновременным их вращением (см. рис. 1.7). [75 – 79].

Схема относится к способу неполной закрытой резке проката сдвигом с поперечным активным зажимом, который из известных четырех способов обеспечивает получение заготовок с наилучшими показателями геометрической точности и качества поверхности среза.

В предложенной схеме резки в сравнении с известными схемами можно выделить следующие преимущества:

- сочетание активного прижима с вращением штанги относительно ее продольной оси в процессе ее деления позволяет создать более

благоприятную схему напряженно-деформированного состояния в очаге деформации;

- используемый способ приложения нагрузки препятствует образованию утяжки, увеличению угла скоса торца и его волнистости, что способствуют повышению качества поверхности среза получаемых заготовок;

- осуществление постоянного усилия прижима разрезаемого прутка равным усилию реза, при более простом конструктивном решении в сравнении с использованием дифференцированного зажима отрезаемой заготовки;

- одновременное приложение усилий реза с двух сторон разделяемого прутка препятствует возникновению динамических нагрузок, вызываемых сколом заготовки;

- возможность применения компактного гидропривода с присущими ему преимуществами при использовании в качестве силового привода режущего инструмента;

- вследствие компактности и небольшой массы режущего устройства возможна его установка без жесткого крепления к фундаменту, что делает его мобильным при необходимости изменения места установки, являющимся не мало важным для ремонтно-механических производств;

- имеется возможность встраивания в автоматизированные комплексы и создания на его основе гибкого производственного модуля.

- эксплуатация устройства не требует высокой квалификации рабочих и обслуживающего персонала.

Проведенный сравнительный анализ показывает, что предложенная схема резки удовлетворяет основным требованиям, определяющих эффективность вновь разрабатываемых процессов для получения мерных заготовок из сортового проката, а именно:

- безотходность разделения;

- отсутствие недопустимого искажения сечения в плоскости реза, весовой и геометрической точности заготовок, оговоренных требованиями дальнейшего технологического передела;

- не значительные затраты на его изготовление;
- небольшие энергозатраты и материалоемкость устройства;
- простота и не высокая стоимость устройства, реализующего новую схему резки;
- обеспечение безопасной работы;
- возможность автоматизации процесса резки;
- отсутствие вредного шума.

6.2. Ножницы для резки проката плоскими ножами с поступательным перемещением разделяемых частей в двух направлениях с одновременным вращением

Проведенные исследования опытно-промышленной конструкции ножниц (рис. 6.1, 6,2) [78, 191 – 193] показали ее работоспособность и позволили определить пути дальнейшего совершенствования и адаптирования к производственным условиям.

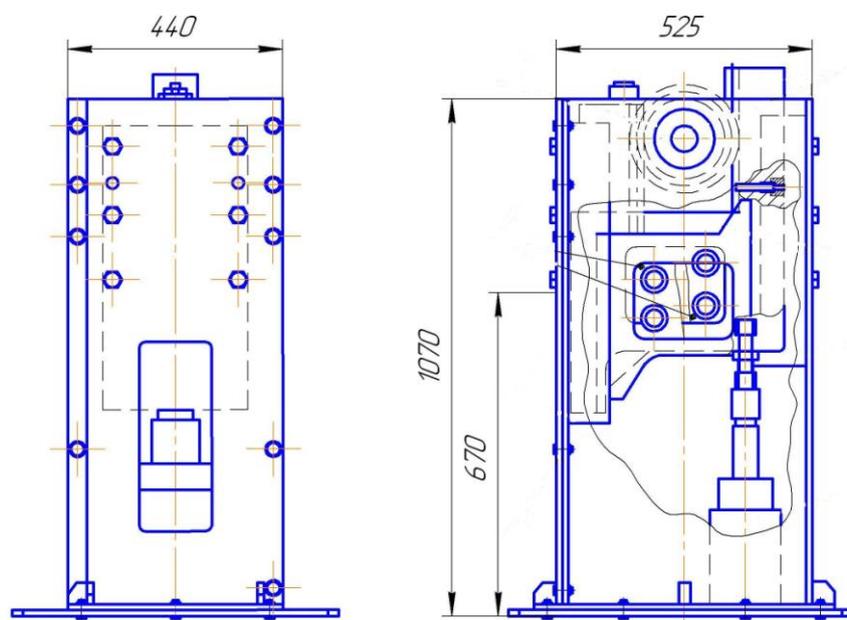


Рис.6.1. Опытная конструкция ножниц

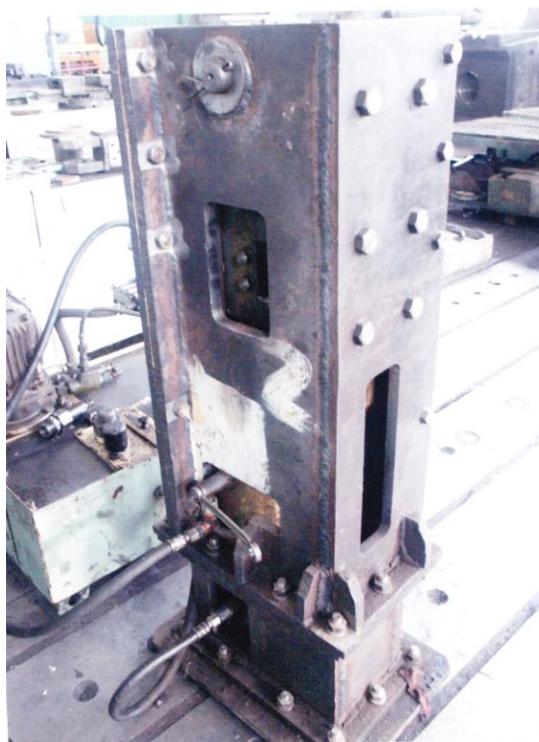


Рис.6.2. Общий вид ножниц с гидростанцией

Ножницы были изготовлены в двух экземплярах. Второй экземпляр предназначался для последующего развития и усовершенствования конструкции с учетом результатов исследований.

Предварительный анализ силового нагружения ножниц и расчеты на основании построенных схем сил воспринимаемых ими со стороны режущих и прижимных плоскостей ножей в процессе отрезки заготовки показали, что со стороны ножей на направляющие станины будут действовать значительные распорные усилия на направляющие станины, векторы которых имеют встречное направление. Наличие жесткого прижима в зоне реза, как самого прутка, так и отрезаемой заготовки при недостаточной жесткости устройства может привести к заклиниванию ножей в процессе резки.

Эффективно решить выявленную проблему представляется возможным за счет размещения ножей 1, 2 (рис.6.3) в каретках 3, 4, образующих кассету. В этом случае упомянутые выше усилия будут взаимно уравновешиваться в

пределах этой кассеты, а ножи оснащаются дополнительными направляющими 5, 6, увеличивая тем самым жесткость устройства в целом. При этом также уменьшается перекося ножей, несимметричное воздействие их на направляющие станины и исключать возникновение заклинивания ножниц в процессе резки [194].

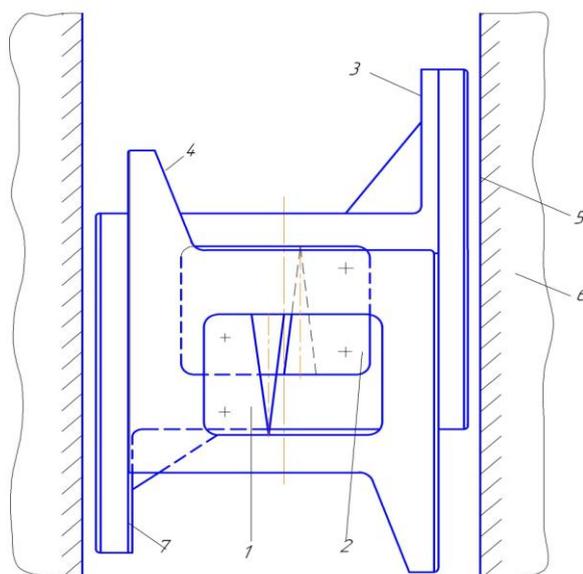


Рис.6.3. Конструкция направляющих

В следующей главе приводится экспериментальное обоснование предложенного технического решения.

Для обеспечения эффективности работы устройства в производственных условиях возникла целесообразность в регламентации угла наклона режущих кромок ножей и соответствующих им плоскостей прижима для возможности изготовления универсального режущего инструмента.

Из рассмотрения прямоугольного треугольника (рис.6.4), образованного наклонной плоскостью выступа или режущей кромкой соответствующего ножа, общим основанием (оси симметрии их наклона) и торцевой частью имеем $\operatorname{tg}\alpha = r/\pi r = 1/\pi$, где α искомый угол наклона, r – радиус разделяемого проката круглого сечения. Расчет показал, что искомый угол будет равен $17^{\circ}40'$ [195, 196].

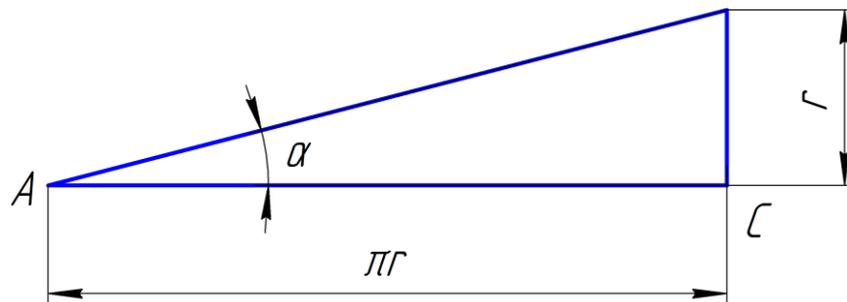


Рис.6.4. К определению угла наклона режущих кромок и прижимных плоскостей ножей

То, что тангенс угла наклона режущих кромок равен тангенсу угла наклона соответствующих им плоскостей прижима и имеет значение равное $1/\pi$, позволяет осуществлять отрезку мерной заготовки при ходе каждого из ножей равной половине ее периметра, т.е. за половину оборота отрезаемой заготовки и штанги от которой она отрезается. При этом режущая кромка каждого из ножей внедряется в разделяемый пруток на величину g .

Изготовление ножей с меньшим углом наклона рабочих плоскостей приводит к увеличению рабочего хода и соответственно продольных размеров ножей, а следовательно, габаритов ножниц и их металлоемкости. Изготовление ножей с большим углом наклона их рабочих плоскостей приведет к возрастанию усилия реза и тем самым энергозатрат, заметному смятию поверхности прутка в месте контакта с ножами.

Исполнение угла наклона рабочих поверхностей ножей равным $1/\pi$ позволит разрезать на таких ножницах штангу на мерные заготовки любого диаметра за ту же половину оборота штанги и отрезаемой от нее мерной заготовки при необходимой длине ножей и мощности привода. Это делает исполнение ножей универсальным и не требует их замены при изменении диаметра разрезаемой штанги. Таким образом, исключается необходимость иметь в большом количестве наборы ножей с различными углами наклона рабочих поверхностей. Расчетное и экспериментальное подтверждение этих выводов приводится в главе 7.

Другим выявленным недостатком являлось отсутствие возможности регулировки и настройки осевого зазора между ножами, что отрицательно влияло на качество и технологические возможности ножниц.

Для получения хорошего качества торцов при различных диаметрах и марках разрезаемого проката важно обеспечить постоянство относительного осевого зазора $z_o = z_{oc}/d$ (где z_{oc} – осевой зазор между ножами, d – диаметр отрезаемой заготовки) по всему сечению разрезаемого прутка [61].

Для устранения выявленного недостатка предлагается (рис.6.5) новое решение. Один из ножей, например 1, выполнить в виде двух частей 2 и 3, которые имеют режущую кромку 4 и прижимную плоскость 5. Части 2, 3 состыкованы между собой посредством направляющих пальцев 6 и регулировочного винта 7, при этом режущая часть ножа установлена с возможностью перемещения в горизонтальном направлении за счет регулировочного винта 7 и упругих элементов 8, смонтированных на упомянутых пальцах и винте в полости В, образованной выступом 9 и противолежащим ему пазом 10, выполненном на прилегающих плоскостях 11 и 12 [197].

Такое решение позволяет настраивать необходимый осевой зазор между режущими кромками верхнего и нижнего ножей в зависимости от марки и диаметра исходного прутка и поддерживать постоянство относительного осевого зазора z_o по всему сечению разрезаемого прутка, что позволит расширить технологические возможности ножниц за счет резки на одном устройстве штанги различного диаметра и марки материала, получать мерные заготовки с требуемой геометрической точностью торцевых поверхностей.

Определенный угол наклона режущих кромок ножей и соответствующих им плоскостей прижима, оснащение ножниц механизмом регулировки осевого зазора между режущими кромками ножей в совокупности с использованием механизма регулировки расстояния между ножами в исходном положении позволят осуществлять резку проката различного диаметра без замены ножей при необходимой мощности привода. Традиционные конструкции ножниц,

4, при этом как минимум в одной из них между продольной наклонной поверхностью 5 ножа 1 и расточкой 6 обоймы 3 установить клин 7, при этом в обойме 3 смонтирован механизм регулировки 8 с контргайкой 9 положения клина 7, взаимосвязанный с одним из его торцов, а другой торец подпружинить упругим элементом 10 относительно опорной поверхности 11 расточки 6 обоймы 3 [198].

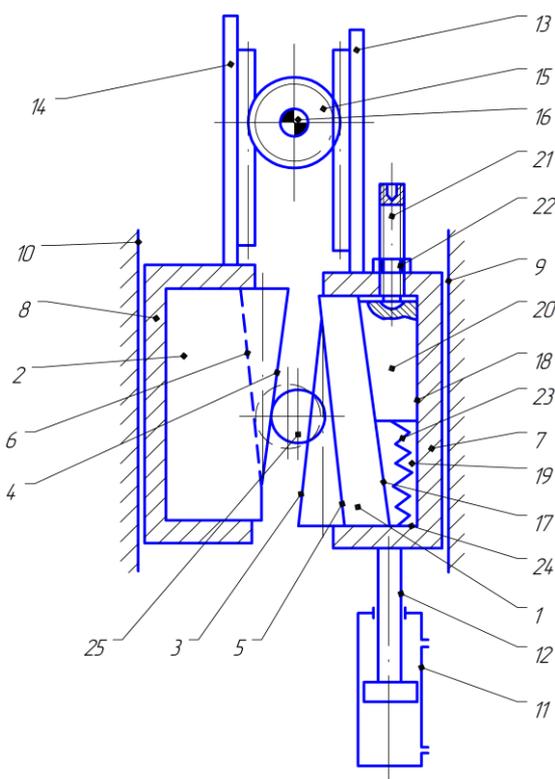


Рис.6.6. Принципиальное устройство для регулировки расстояния между ножами

В результате внесения новых конструктивных решений в первоначальную разработку [192] ножницы становятся универсальной быстро переналаживаемой машиной, более полно отвечающей условиям эксплуатации в промышленных условиях

Из практики известно, что наиболее широкая потребность в мерных заготовках приходится на диаметры до 100 мм. Для получения таких заготовок на одной режущей установке требуется оснащение ее приводом соответствующей мощности.

Также был разработан еще ряд технических решений, в основе которых лежит эта же схема резки [199 – 205]. В частности, предложено совмещение разделительной и формообразующей операции в одном устройстве [201], устройства для получения коротких заготовок [202] и предотвращения заклинивания при резке проката большого сечения [203], конструкции ножей, исключают смещение разрезаемой штанги относительно плоскости реза при тангенциальном движении [204], ножницы для одновременной резки двух прутков, в том числе разного диаметра [205].

Для резки прутков круглого сечения из сталей и цветных сплавов небольших диаметров был усовершенствован штамп, содержащий втулочный нож, взаимодействующий с клиновым ножом [206] и предложен новый штамп, осуществляющий резку кручением втулочными ножами, оснащенными приводными зубчато-клиновыми механизмами [207].

Основными недостатками известных устройств содержащих втулочный нож, взаимодействующий с клиновым ножом являются интенсивное затупление режущих кромок, неудовлетворительная стойкость применяемых подшипников качения не рассчитанных на восприятие больших нагрузок, а в случае межопорной резки ограниченные технологические возможности.

Недостатком известных штампов со втулочными ножами является неравномерность зажима разрезаемого прутка по периметру и не высокое качество получаемых заготовок.

Усовершенствованная конструкция штампа [206], представленная на рис.6.7 содержит втулочный нож 1, выполненный цельным и установленный в разъемном корпусе с возможностью вращения, состоящем из двух частей 2 и 3, стянутых между собой шпильками 5. Между втулочным ножом и двумя половинами корпуса неподвижно смонтировано антифрикционное кольцо 6 из модифицированного фторопласта. Клиновым ножом 7 с режущей кромкой 8 может быть установлен на ползуне прессы или оснащен индивидуальным приводом.

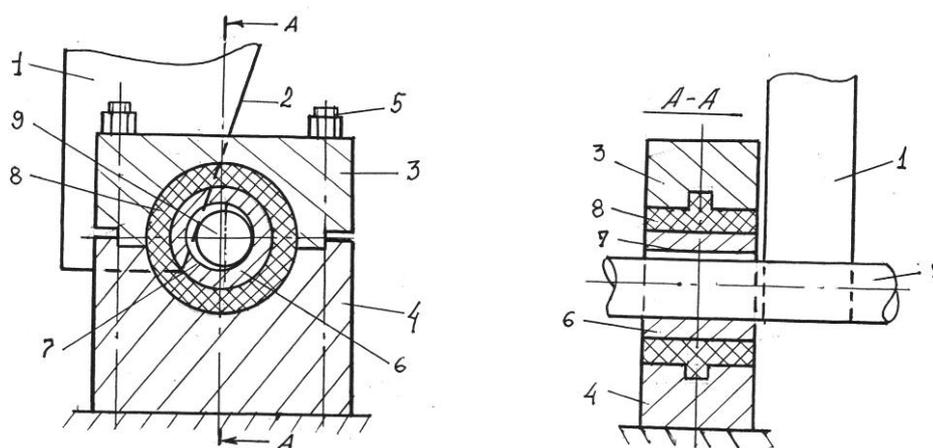


Рис.6.7. Штамп для резки прутков

Угол клинового ножа принят равным 20° . Зазор между прутком и втулочным ножом в соответствии с рекомендациями [68] составляет 3...5% от диаметра разрезаемого прутка. В качестве материала для антифрикционного кольца предлагается использовать модифицированный фторопласт ПТФЭ – фторопласт – 4, обладающий коэффициентом трения 0,08, интенсивность износа которого не превышает 0,1...0,3 мг/час, а износостойкость в 10^4 раз больше, чем у исходного материала. Твердость по Бринеллю 39,2 МПа.

Устройство отличается простотой конструкции, неприхотливостью в обслуживании и работе. Отсутствует необходимость после сборки в предварительной настройке и представляется возможным получать мерные заготовки требуемой длины без смены клинового ножа в отличие от двух опорной резки. Использование антифрикционного кольца из модифицированного фторопласта обеспечило легкое скольжение контактирующего с ним втулочного ножа с минимальными потерями на трение и восприятие технологических нагрузок длительное время без преждевременного разрушения.

Одним из основных условий для получения качественных заготовок из прутка разрезаемого во втулочных штампах является обеспечение перед началом резки его жесткого зажима. Штампы, не отвечающие этому условию, не обеспечивают получение качественной поверхности среза и необходимую точность геометрических размеров получаемой заготовки, например [61, 68].

Для обеспечения выбора поперечного зазора во втулочных ножах и последующего жесткого зажима разрезаемого прутка перед началом его резки предлагается оснастить штамп (рис.6.8) [207] дополнительной подвижной плитой 1 с зубчатыми рейками 2,3 и установить ее над основной верхней плитой 4 с зазором Δ . Основную верхнюю плиту 4 выполнить с направляющими отверстиями под упомянутые рейки. Величина зазора Δ между плитами 1 и 4 в положении начала зацепления зубчатых реек с шестернями приводов вращения втулочных цанговых ножей 11, 18 назначается из условия $\Delta \geq H$, где H – величина рабочего хода подвижного втулочного цангового ножа в плоскости реза.

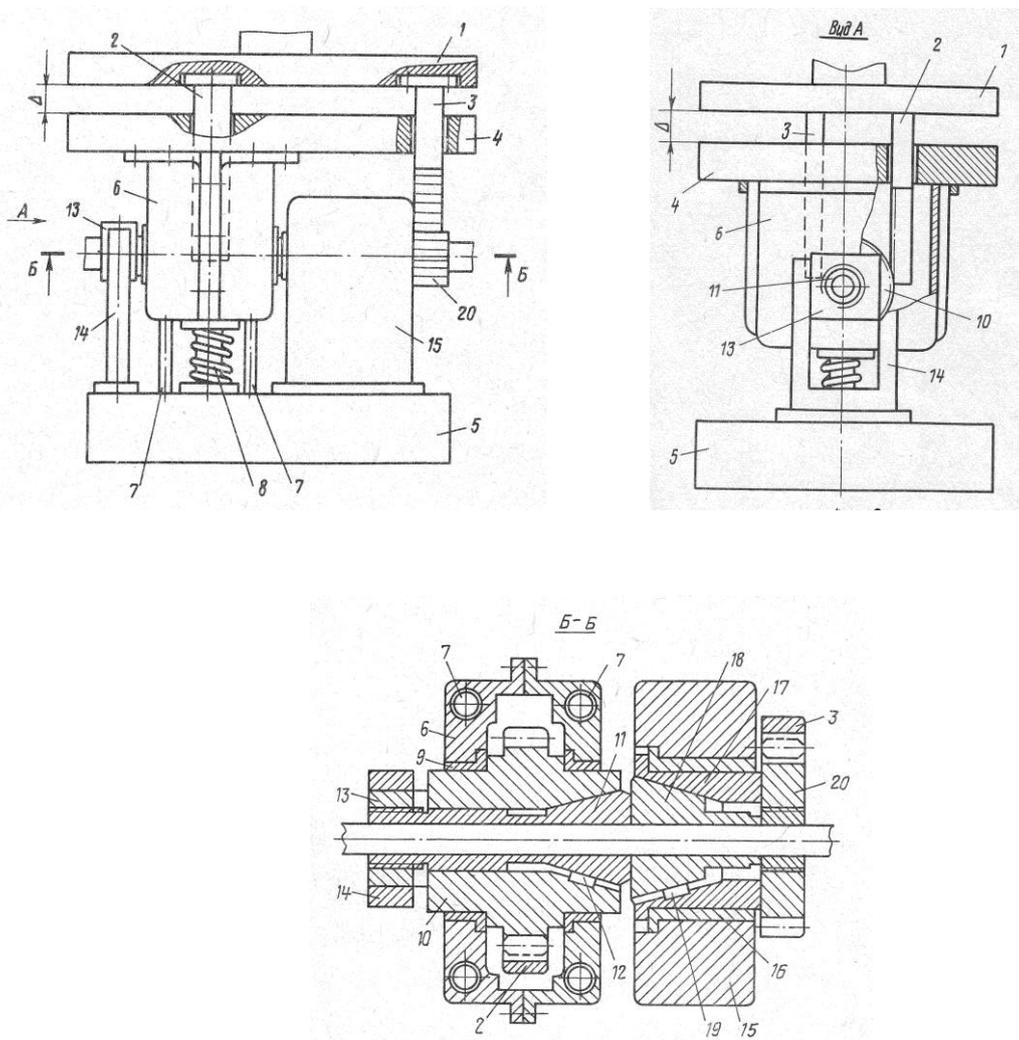


Рис.6.8. Устройство втулочного штампа

Штамп работает следующим образом. Пруток подается в отверстие втулочных ножей 11 и 18. При ходе ползуна прессы вниз с закрепленным на нем плитой 1 зубчатые рейки 2, 3, смонтированные на этой плите, через направляющие отверстия в верхней подвижной плите 4 входят в зацепление с шестернями приводов и приводят их во вращение, которое через шпонки 12 и 19 передается втулочным ножам 11 и 18. При этом хвостовик втулочного ножа 11 ввинчивается в гайку 13, зафиксированную в вилке 14, а гайка-шестерня 20 навинчивается на хвостовик втулочного ножа 18. Втулочные ножи 11 и 18 затягиваются в соответствующие конусные отверстия ножедержателей 10 и 17 и осуществляют выбор поперечного зазора во втулочных ножах и последующий жесткий зажим разрезаемого прутка. Затем дополнительная плита 1 входит в контакт с верхней подвижной плитой 4 и перемещает ее вниз с установленным на ней корпусом 6, сжимая пружину 8. При этом от прутка, продолжающегося вращаться вместе с втулочными ножами, отрезается мерная заготовка. Зубчатые рейки 2 и 3, оставаясь в зацеплении с шестерней ножедержателя 10 и гайкой-шестерней 20, во время резки препятствуют ослаблению зажима прутка.

При обратном ходе ползуна прессы штамп возвращается в исходное положение, пружина 8 разжимается, корпус 6 устанавливается соосно с корпусом 15. При этом втулочные ножи разжимаются. Затем пруток перемещают на шаг подачи и цикл повторяется.

6.3. Разработка устройств для измерений усилий технологических операций выполняемых на прессах

Многолетняя производственная практика показывает, что измерение технологических усилий, развиваемых прессами при выполнении различных операций, необходимо проводить на постоянной основе. Знание действительного технологического усилия позволяет правильно выбрать пресс и наиболее полно использовать его установочную мощность. Обоснованно

проводить последующие модернизации оборудования, предотвратить перегрузки и связанные с этим преждевременные поломки узлов и деталей, способствовать разработке более эффективных технологий и надежных конструкций технологической оснастки, а также обеспечить целый ряд других положительных факторов, хорошо известных специалистам.

6.3.1. Новые конструкции механических усилителей деформации

Принцип действия применяемых измерителей усилия пресса основан на измерении деформаций (напряжений) в материале его базовой детали (как правило, станины) посредством установленного на ней чувствительного элемента.

Ранние зарубежные и отечественные конструкции указателей усилий основывались на регистрации деформации станины посредством штанги, закрепленной на ней неподвижно одним из концов с помощью резьбового соединения, при этом другой конец штанги воздействовал на наконечник измерительной ножки индикатора, поворачивая стрелку [208]. Индикаторы усилия с индикатором линейных перемещений в качестве показывающего прибора, равно как и 3-х позиционные сигнализаторы усилия с сильфонным усилителем не дали необходимого эффекта при эксплуатации прессов.

Более поздние разработки [209 – 212] предусматривали использование чувствительного элемента оснащенного тензодатчиками, электрический сигнал с которых поступал на усиливающее и запоминающее устройство. Такие измерители позволили повысить точность измерений, но не обеспечивали при этом стабильность показаний из-за постоянного ослабления принятого резьбового соединения измерителя с силовым элементом пресса (станины), на котором он смонтирован, вызванного вибрацией пресса и растягивающими напряжениями в станине в процессе работы машины.

Несовершенство конструкций чувствительных элементов, используемых в измерительных устройствах (отсутствие необходимой точности и надежности

в работе при высокой трудоемкости в изготовлении, монтаже и эксплуатации), препятствует стабильности измерений и достоверности получаемых результатов на необходимых временных интервалах.

На основе анализа известных технических решений [208 – 213] были разработаны новые конструкции чувствительных элементов – механических усилителей деформации [214, 215] (рис.6.9).

Обе конструкции представляют собой пластины в одной из которых (рис.6.9а) чувствительный элемент выполнен в виде участка с уменьшенным поперечным сечением, во втором в виде перемычек между боковыми поверхностями пластины и отверстием в ней (рис.6.9б). В конструкции на рис.6.9а рабочие тензодатчики наклеиваются на боковые поверхности перемычки, а компенсационные на верхней поверхности чувствительного элемента. В конструкции на рис.6.9б соответственно на поверхности отверстия.

Для повышения чувствительности пластина приваривается непосредственно к станине пресса, в ее наиболее нагруженной части. При работе пресса станина деформируется вместе с чувствительным элементом, и сигнал с датчиков поступает на электронный контрольно-измерительный прибор.

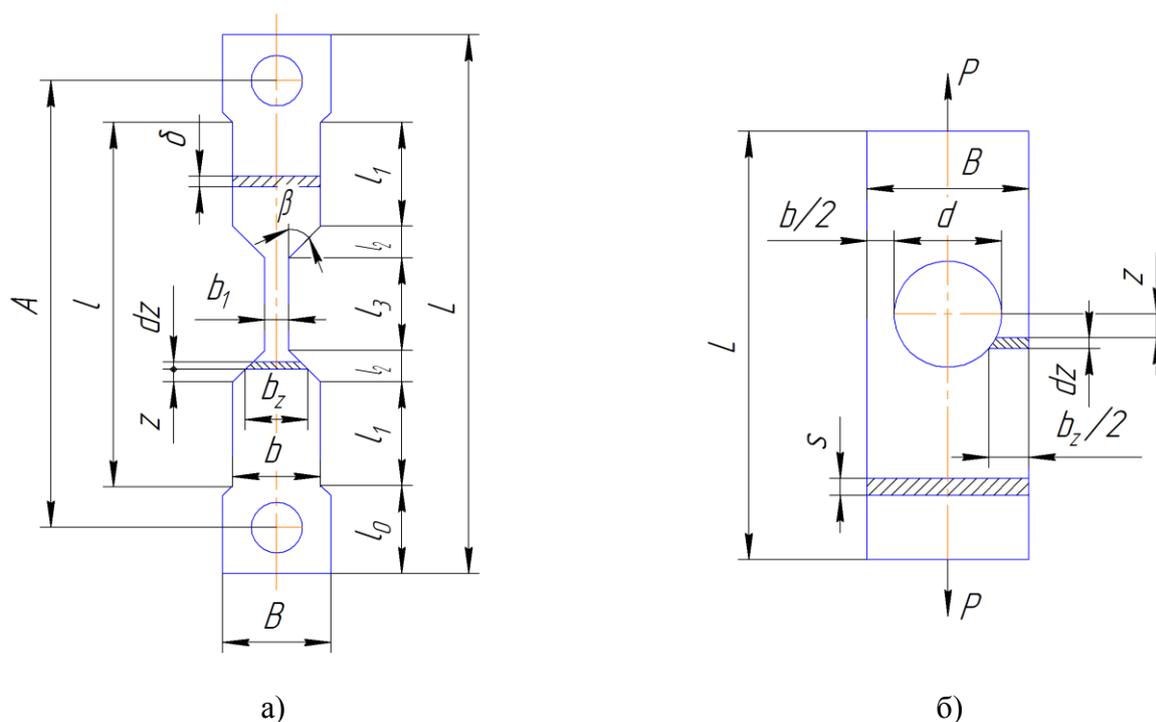


Рис.6.9. Конструкции механических усилителей деформации

Предложенное конструктивное исполнение измерителя с чувствительным элементом обеспечивает плотное его прилегание к станине прессы без необходимости использования дополнительных соединительных деталей и создания предварительного натяга устройства. Таким образом, устраняются основные причины, приводящие к низкой надежности и нестабильности результатов измерений. Любая из двух пластин проста в изготовлении и монтаже. Выполненные разработки были использованы в течение нескольких лет в составе измерительных комплексов при определении усилий разделительных и формообразующих операциях на механических и гидравлических прессах в производственных условиях [92].

6.3.2. Расчет исполнительных размеров чувствительных элементов измерителя

После приваривания усилителя к станине между ними образуется замкнутая силовая цепь, из чего следует, что деформация станины будет равна сумме деформации всех участков измерителя

$$\Delta l = 2\Delta l_1 + 2\Delta l_2 + \Delta l_3, \quad (6.1)$$

где Δl – удлинение базового размера станины при работе прессы; Δl_1 , Δl_2 , Δl_3 – удлинения соответствующих участков механического усилителя деформации (рис.6.1а).

Используя закон Гука, зависимость (6.1) можно записать в следующем виде

$$\sigma_{сн} l / E = 2Pl_1 / EF_1 + (2P/E) \int dz / F_z + Pl_3 / EF_3, \quad (6.2)$$

где $\sigma_{сн}$ – напряжение в станине вызываемое действием технологического усилия; P – условное обозначение силы приложенной к концам усилителя, которая возникает в результате удлинения станины; F_1 , F_3 – площади

поперечного сечения соответствующих участков усилителя; F_z – текущее значение площади поперечного сечения усилителя на участке l_2 ; dz – переменная интегрирования на участке l_2 .

Из соотношения

$$(b_z - b_1)/(b - b_1) = (l_2 - z)/l_2, \quad (6.3)$$

следует, что

$$b_z = b - z(b - b_1)/l_2, \quad (6.4)$$

а так как

$$F_z = \delta b_z, \quad (6.5)$$

где δ – толщина пластины то, подставляя полученное значение в подынтегральную часть выражения (6.2) и решая интеграл, получим

$$\int dz/\delta[(b-z(b-b_1)/l_2)] = l_2/\delta(b-b_1)[\ln(b-z(b-b_1)/l_2)] = [l_2/\delta(b-b_1)]\ln(b/b_1). \quad (6.6)$$

Подставляя в уравнение (7.2) значение интеграла, приняв для упрощения $b/b_1 = \alpha$, а вместо площадей их значения, выраженные через размеры соответствующих участков, принимая толщину пластины измерителя постоянной на всей длине, а также принимая отношение

$$\sigma_{my}/\sigma_{ст} = k, \quad (6.7)$$

где k – коэффициент усиления чувствительного элемента измерителя и полагая, что материал станины и измерителя имеют одинаковое значение E , после преобразований получаем зависимость

$$l = k\{(2l_1/\alpha) + [2l_2/(\alpha - 1)]\ln\alpha + l_3\}. \quad (6.8)$$

Заменив левую часть выражения (6.8) на сумму $2l_1+2l_2+l_3$ и решая его относительно l_1 , подставляя значение

$$l_2 = b_1(\alpha - 1)/2\text{tg}\beta \quad (6.9)$$

и принимая $l_3 = nb_1$ окончательное выражение

$$l_1 = \alpha b_1[(k \ln \alpha + 1 - \alpha)/\text{tg}\beta + n(k - 1)]/2(\alpha - k). \quad (6.10)$$

Уравнение (6.10) имеет решение при $\alpha > k$.

Решая уравнения (6.9) и (6.10), подставляя в них требуемое значение коэффициента усиления чувствительного элемента и выбираемые по конструктивным соображениям α , b_1 , β , n можно определить все остальные размеры усилителя.

В табл. 6.1 в качестве примера приведены размеры механических усилителей деформации, которые были смонтированы на сортовых кривошипных ножницах усилием 40, 16, 10, 8 МН и использовались в течение нескольких лет для измерения и контроля усилий резки сортового проката.

Также на основе закона Гука можно определить необходимый коэффициент усиления для конструкции механического усилителя деформации, приведенной на рис.6.1б.

Таблица 6.1

Размеры механических усилителей деформации

ПАРАМЕТРЫ (мм)						
B	b	b ₁	l ₁	l ₂	l ₃	A
40	30	8	60	35	250	220
40	30	8	80	30	280	250
50	40	6	70	30	280	250
50	40	6	130	30	390	360

$$\sigma_{\text{ст}}L/E_{\text{ст}} = P(L-d)/EBS + (2P/E) \int_0^{d/2} dz / F_z, \quad (6.11)$$

где $\sigma_{ст}$ – напряжение в станине; $E_{ст}$, E – модули упругости материалов станины и механического усилителя деформации; P – усилие, возникающее на концах пластины в результате удлинения станины; $F_z = b_z s$ – текущее значение площади поперечного сечения чувствительного элемента на участке с отверстием; dz – переменная интегрирования на том же участке.

В результате решения уравнения (6.11), при котором дополнительно вводятся коэффициенты k_p и k_t , после соответствующих преобразований получим

$$k_p = \frac{k_t \beta}{1 + b/L \{ \beta [(2\beta \sqrt{2\beta - 1}) \operatorname{arctg} \sqrt{2\beta - 1} - 1 - \pi/2] + 1 \}}, \quad (6.12)$$

где k_t – теоретический коэффициент концентрации напряжений; $\beta = V/b$.

Для определения значения k_p необходимо конструктивно задаться размерами V и L отношением β и выбрать значение k_t , в зависимости от отношения d/V по известным графическим зависимостям. При отношении $d/V = 0,75 \dots 0,95$ значение $k_t = 2$.

6.4. Выводы по главе

1. Предложенные новые решения позволяют на основе разработанной опытной модели создать универсальные ножницы для резки проката круглого сечения, наиболее полно удовлетворяющие производственным условиям.

2. Конструкцию ножниц отличает компактность, низкая металло- и энергоёмкость, возможность изготовления на любом предприятии машиностроительных и металлургических отраслей промышленности.

3. Разработанные новые конструкции штампов для резки прутков обеспечивают получение мерных заготовок с качественной поверхностью среза и достаточной точностью геометрических размеров. Штампы просты в эксплуатации и наладке.

4. Предложенные конструкции измерителей усилий развиваемых прессами при выполнении технологических операций обеспечивают стабильность и точность измерений и могут быть рекомендованы к применению на любых механических и гидравлических прессах.

5. Введение измерителя усилий в состав электронно-измерительного комплекса и систему управления прессом обеспечивает их непрерывную работу с выводом на печать величины усилий технологической операции при каждом рабочем ходе пресса, сигнализацию и отключение муфты при возникновении перегрузки, счет получаемых изделий, получение реальной информации о действительной загрузке прессов по времени.

6. Выполненные технические разработки защищены десятью патентами РФ на изобретения и тремя патентами на полезную модель.

7. РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НОЖНИЦ

Исследуемую механическую схему разделения сортового проката круглого сечения, как показал сопоставительный анализ, можно отнести к одному из вариантов поперечной вальцовки [80].

При разделение круглого проката плоскими клиновыми ножами с тангенциальным движением из представленной классификации (табл.1.1) наиболее предпочтительна не полностью закрытая схема с активным прижимом.

Наиболее предпочтительна из перечисленных схем не полностью закрытая с активным прижимом, которая была использована при построении математических моделей для теоретического исследования процесса резки сортового проката круглого сечения плоскими клиновыми ножами [76 – 79, 113, 125, 127].

Исследуемый процесс разделения – процесс не стационарный, поскольку в каждый момент времени очаг деформации, а следовательно и все кинематические, геометрические и энергосиловые параметры изменяются.

Как было установлено в ранее отмеченных работах, начальная стадия приходится на момент начала движения ножей после подачи исходного прутка в зазор между ножами. При этом площадь контакта между деформирующим инструментом и разделяемым металлом локализована в линию.

Вследствие симметрии процесса относительно ножей, контактная линия располагается на диаметре заготовки перпендикулярно поверхности ножей и отклоненной от осей Z и Y на угол α .

По мере внедрения ножей в месте контакта возникают нормальные напряжения σ к образующей ножей и касательные τ к ним, которые приводят к упругим деформациям в виде сдвига.

С увеличением нормальной составляющей контактных напряжений, в определенный момент, наступает следующий этап разделения, который

характеризуется возникновением пластических деформаций, приводящих к смещению отрезаемой заготовки от прутка по плоскости раздела. При этом в месте контакта ножа с заготовкой возникает деформация смятия, что приводит к увеличению площади контакта за счет увеличения ее ширины (рис.7.1) [78, 127].

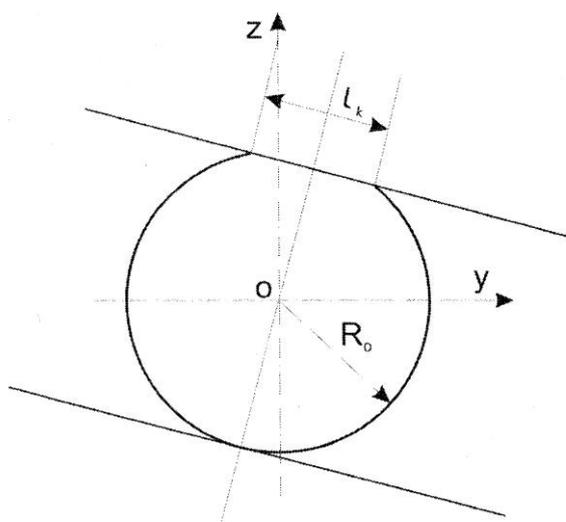


Рис.7.1. Образование пластической деформации местного характера

Этот этап разделения непосредственно связан с нарушением в той или иной степени правильности геометрической формы отрезаемой заготовки, связанной в частности с образованием продольной и поперечной вмятин. Рассмотрим подробнее взаимосвязь геометрии и кинематики очага деформации с параметрами режущего инструмента и формой получаемых заготовок в плоскости разделения.

7.1. Расчетное обоснование конструкции режущего инструмента и исследование влияния его на параметры резки, форму и размеры получаемых заготовок

При разделении сортового проката на мерные заготовки в штампах или на сортовых ножницах широко используемым способом резки сдвигом большое

значение имеет соотношение формы и размеров полости ножа и разрезаемой штанги (прутка). Идентичность форм полости ножа и поперечного сечения проката способствует уменьшению деформации смятия поперечного сечения отрезаемой заготовки [68].

Предварительный теоретический анализ процесса разделения проката плоскими клиновыми ножами с тангенциальным движением показал, что в начале процесса резки в месте контакта ножа с отрезаемой заготовкой также возникает деформация смятия, которая приводит к увеличению площади контакта за счет увеличения ее ширины (рис.7.1) [78]. При этом исследуемая схема резки, в отличие от используемых содержит ножи не соответствующие сечению разделяемого проката. Рассмотрим имеющуюся возможность уменьшения деформации смятия проката в зоне реза для данной схемы разделения проката.

Напряжение смятия в зоне контакта ножей и деформируемого металла можно определить из общеизвестной зависимости

$$\sigma = \frac{P}{F_{см}} = \frac{P}{l_k b_n} \leq [\sigma_{см}], \quad (7.1)$$

где, P – усилие резки; $F_{см}$ – площадь поверхности смятия; l_k – ширина поверхности смятия; b_n – ширина ножа.

Откуда ширина поверхности смятия проката в зоне реза [78]

$$l_k = \frac{P}{\sigma_{см} b_n}. \quad (7.2)$$

Из формулы следует, что при одинаковом усилии резки вариативным параметром, в определении ширины поверхности смятия является ширина

ножа. На рис. 7.2 представлена зависимость ширины поверхности смятия проката в зоне реза от ширины ножа и разрезаемой марки стали.

Из полученных зависимостей (рис.7.2), следует, 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.

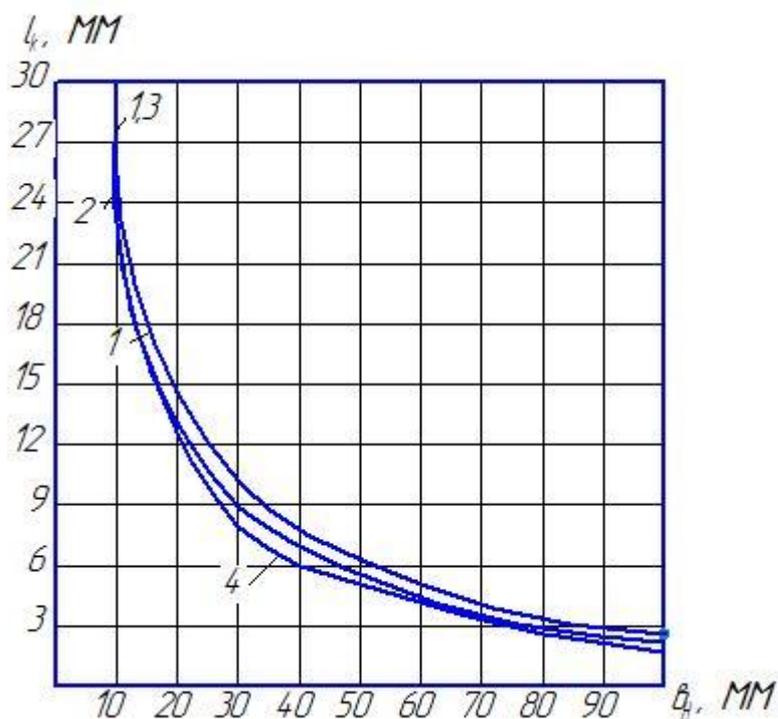


Рис. 7.2. К определению ширины площади контакта ножей с поверхностью разрезаемого проката из средне- и высоко углеродистых (1 – сталь 20, 2 – сталь 45, 3 – сталь 60) и легированных (4 – сталь 40ХН2МА) сталей

Согласно геометрии очага деформации (рис.7.1) для исследуемой схемы вертикальное (h) и горизонтальное (l_y) перемещения ножей связаны между собой зависимостью

$$h = l_y \cdot \sin \alpha, \quad (7.3)$$

где α – угол наклона режущей кромки ножа.

Приведенная зависимость позволяет при заданном угле наклона α режущих и прижимных кромок ножей и величине смещения h отрезаемой заготовки за счет ее пластического сдвига относительно штанги определить величину рабочего хода ножей. Или решить обратную задачу – при заданном рабочем ходе и величине внедрения ножей в разделяемую штангу определить угол α , обеспечивающий заданные параметры.

В процессе конструирования ножей для исследуемого устройства при проведении расчетного анализа их геометрических параметров (угол наклона режущих и прижимных кромок, длина и ширина ножей) было установлено, что наиболее целесообразно осуществлять отрезку мерной заготовки при ходе каждого из ножей равным половине ее периметра, т.е. за половину оборота отрезаемой заготовки и штанги от которой она отрезается. Положительный эффект от данного решения описан в гл.6. При этом режущая кромка каждого из ножей внедрится в разделяемую штангу на величину ее радиуса. Т.е. при идеальных условиях полное отделение отрезаемой заготовки произойдет за счет пластического сдвига без скола (хрупкого разрушения). Расчеты показали [198], что это возможно, если тангенс угла наклона режущих кромок ножей и соответствующих им прижимных плоскостей будет равен $1/\pi$ или $17^\circ 40'$ (см. гл. 6).

Сравнение результатов расчетов полученных с использованием формулы (7.3) и по зависимости $\text{tg}=1/\pi$ показало полное совпадение, что может свидетельствовать о достоверности описанного технического решения.

Проведенные исследования позволили установить величину рабочего хода ножей в зависимости от угла наклона их режущих кромок (рис.7.3) и диаметра разрезаемых штанг (рис.7.4).

Использование полученных зависимостей на проектном этапе позволило обоснованно назначить исполнительные размеры ножей, геометрические и кинематические параметры режущего устройства.

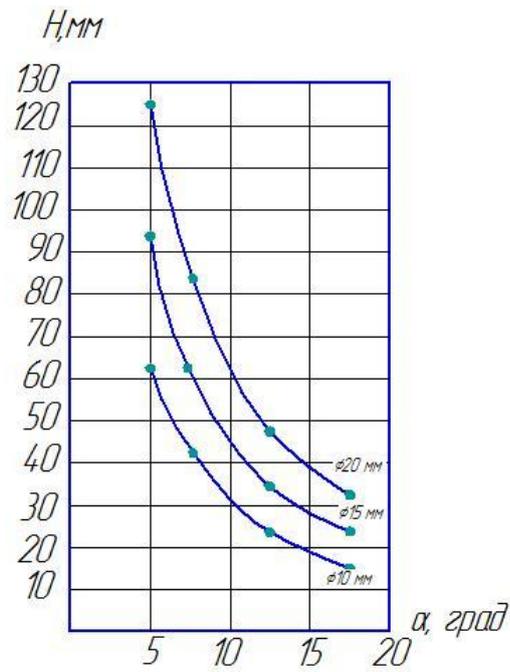


Рис.7.3. Зависимости рабочего хода (H) ножей от угла (α) наклона режущих кромок

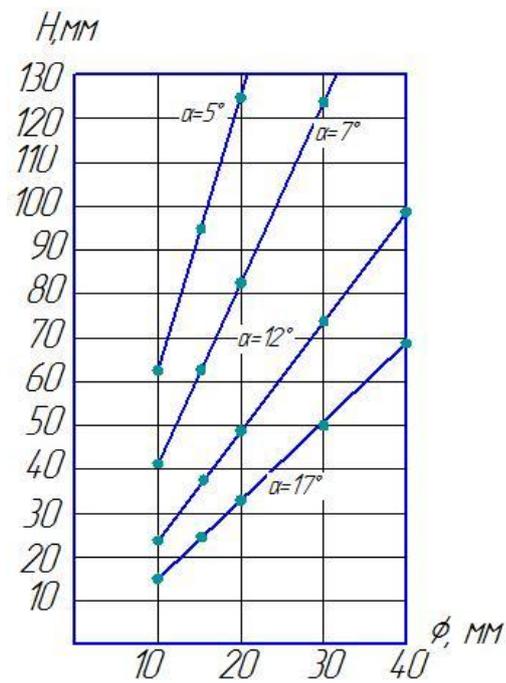


Рис.7.4. Зависимость рабочего хода ножей от диаметра разрезаемой штанги

7.2. Экспериментальное обоснование конструкции режущего инструмента и исполнительного механизма ножниц с тангенциальным движением ножей

Проведенное опытное опробование новой конструкции ножниц, показало их работоспособность и эффективность использованной механической схемы резки, предусматривающей тангенциальное движение плоских ножей. Были получены экспериментальные кривые изменения усилия реза для ряда марок сталей. Произведена оценка качества полученных заготовок в соответствии с обще принятыми показателями [78]. Выполнен эксперимент, подтвердивший адекватность предложенного расчета исполнительных размеров инструмента [195].

Для обоснования достигаемого положительного эффекта в результате использования в новом устройстве оригинальных технических решений при выполнении конструкции ножей и исполнительного механизма были проведены дополнительные эксперименты.

Для определения кинематических и силовых параметров процесса резки, а также показателей качества отрезаемых заготовок было изготовлено несколько ножей с различными углами наклона режущих и прижимных кромок (5° , 7° , 12° , $17^\circ 40'$, 22° , 25°) [195]. При этом в каждом случае, угол наклона режущей кромки был равен углу наклона прижимной. В качестве примера на рис.7.5 приведены две разновидности исполнения ножей, которые также использовались в первоначальных исследованиях.

В процессе экспериментов разрезался пруток из стали 20 диаметрами 10, 15 и 20 мм в холодном состоянии с записью осциллограмм усилия резки и хода ножей.

На рис. 7.6 приведены некоторые из полученных осциллограмм при резке прутков различного диаметра и при разных углах наклона режущих и прижимных кромок.

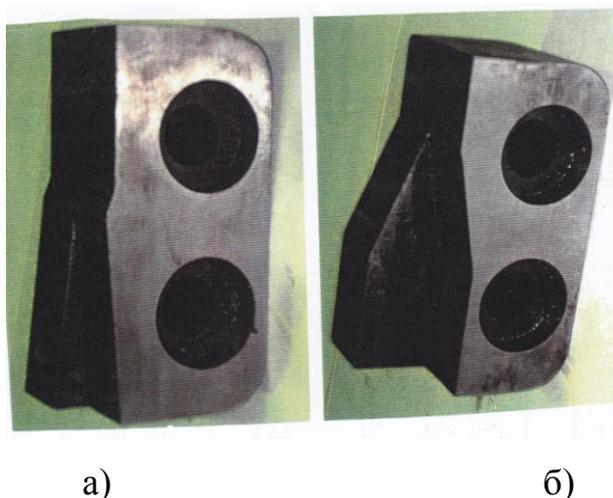


Рис.7.5. Конструкции ножей с углами наклона режущих и прижимных кромок 5° (а) и $17^\circ 40'$ (б)

Анализ полученных осциллограмм показал следующее.

Резка прутков с углом наклона режущих и прижимных кромок 5° требует совершения достаточно большого рабочего хода ножей. Так, при резке прутка диаметром 10 мм величина рабочего хода до полного отделения отрезаемой части от прутка составляла 56...60 мм, при диаметре 15 мм – 85...90 мм. При этом заготовка до полного отделения совершала почти два оборота относительно своей оси.

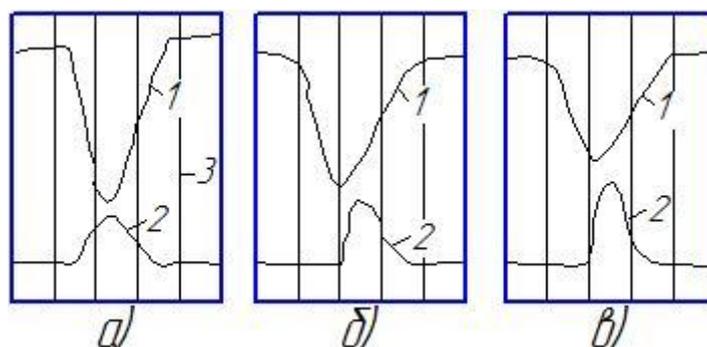


Рис. 7.6. Осциллограммы резки заготовок (материал прутка: сталь 20, диаметр 15 мм) с углом наклона рабочих кромок ножей: а – 5° ; б – 12° ; в – $17^\circ 40'$; 1 – перемещение ножа; 2 – усилие отрезки; 3 – отметка времени

Последующая резка прутков с большим углом наклона рабочих частей ножей привела к заметному уменьшению величины рабочего хода. Например,

для отрезки заготовки от прутка тем же диаметром 10 мм при угле наклона рабочих частей равным 12° уже потребовался ход, не превышавший 20 мм, а при разрезке прутка диаметром 20 мм – 40...45 мм. При этом заготовка до полного отделения совершала уже только около одного оборота.

Отрезка заготовок из прутков различного диаметра с углом наклона $17^\circ 40'$ согласно патенту [199] осуществлялась менее чем за пол-оборота за счет возникновения небольшого скола в конце хода. При этом величина рабочего хода ножей при резке прутков диаметрами 10, 15 и 20 мм соответственно составляла 13, 20 и 28 мм.

Изменение усилия резки при увеличении угла наклона режущих кромок в пределах оговоренных значений было не значительным.

Отрезка заготовок с углом наклона режущих и прижимных кромок больше 17° (22° , 25°) привела не только к заметному смятию поверхности прутка в месте контакта с ножами, но и существенному искажению торцевой поверхности в плоскости раздела за счет того, что окончательное разделение прутка стала происходить за счет неуправляемого хрупкого разрушения.

Об изменении усилия отрезки.

В предыдущих случаях при увеличении угла наклона режущих кромок с 5° до $17^\circ 40'$ возрастание усилия отрезки при разделении одного и того же прутка не превысило 12%, наряду с повышением интенсивности внедрения ножей в заготовку до достижения предела прочности разделяемого материала. При больших углах наклона режущих кромок рост усилия превысил 20%.

Таким образом, можно отметить, что исполнение угла наклона рабочих поверхностей ножей равным $1/\pi$ ($17^\circ 40'$) позволяет разрезать на таких ножницах штангу на мерные заготовки любого диаметра за половину оборота штанги и отрезаемой от нее мерной заготовки при необходимой длине ножей и мощности привода. Это делает исполнение ножей универсальным и не требует их замены при изменении диаметра разрезаемой штанги.

Вследствие вертикального расположения режущего инструмента нагрузки от технологического усилия воспринимаются направляющими ножей

и станиной, на которой они расположены, что будет приводить к повышенному износу направляющих, возникновению перекоса ножей, а в случае недостаточной жесткости ножниц вызвать их заклинивание (см.гл. 6).

Конструкторское решение [192], описанное в гл. 6 позволило решить эту проблему, разместив ножи в каретках, образующих кассету. Для оценки эффективности принятого технического решения были проведены экспериментальные исследования, в процессе которых записывались осциллограммы напряжения в станине и на приводном штоке силового гидроцилиндра при резке различного проката в холодном состоянии.

Из осциллограмм (рис.7.7) видно, что изменения напряжения в станине ножниц в процессе резки заготовок из мало и средне углеродистых сталей, а также из сталей 65Г, 40ХН2МА имеют плавный характер, а после окончательного отделения отрезаемой заготовки от штанги динамические нагрузки отсутствуют. Величина напряжений в станине при наибольшем усилии резки 156 кН, зафиксированном при резке проката из стали 40ХН2МА, диаметром 20 мм не превышала 6% от $\sigma_{вр}$ материала станины (сталь 20).

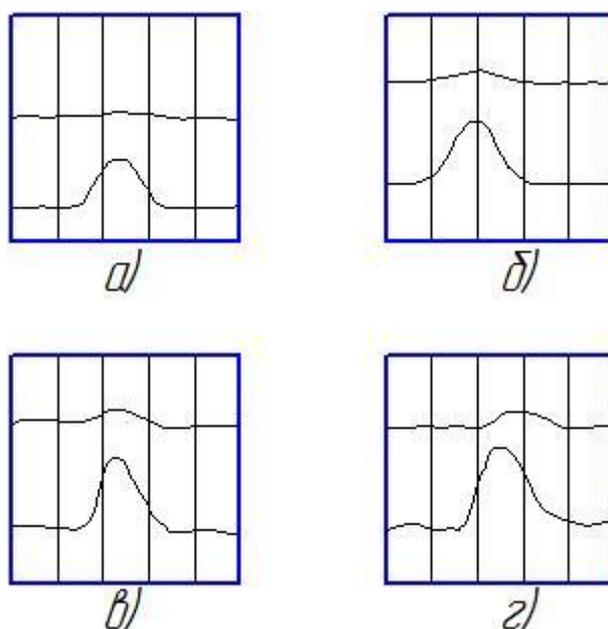


Рис.7.7. Осциллограммы напряжений в станине (1) и на приводном штоке гидроцилиндра (2) при резке проката: а – сталь 20, диаметр 15 мм;

б – сталь 20, диаметр 20 мм; в – сталь 60, диаметр 20мм;

г – сталь 45, диаметр 20 мм;

Полученные результаты показывают, что в случае вертикального расположения ножей размещение их в замкнутой кассете позволят разгрузить направляющие и станину от нагрузок, вызываемых технологическим усилием.

7.3. Выводы по главе

1. Расчетом и экспериментальными исследованиями подтверждена правильность и эффективность принятых технических решений при конструировании режущего инструмента исполнительного механизма ножниц.

2. Использование разработанных конструкций механических усилителей деформации для измерения усилий резки сортового проката на кривошипных ножницах в промышленных условиях показали их работоспособность и получение достоверных и стабильных результатов измерений. Полученные результаты полезны для технологов и конструкторов.

3. Анализ полученных результатов измерения усилий резки позволил внести соответствующие коррективы в технологию резки и в конструкцию используемого инструмента, разработать необходимые инструкции по контролю над режимом нагрева штанг перед резкой.

4. Введение измерительного устройства в систему управления сортовыми ножницами позволило предотвратить перегрузки и связанные с этим преждевременные поломки узлов и деталей, рационально перераспределить разрезаемый прокат между ножницами соответствующих усилий.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РАБОТЕ

Представленные в диссертационной работе результаты теоретических и экспериментальных исследований способствуют развитию теории и практики получения мерных заготовок из сплошного проката и структурно-неоднородных смесей, что в сочетании с разработанными новыми технологиями, инструментом и оборудованием позволяет решить крупную народнохозяйственную проблему в заготовительном производстве металлургической и машиностроительной отраслей промышленности.

1. Разработан дискретно-локальный метод минимизации невязок на основе приближенного удовлетворения переопределенной системы уравнений, решающий проблему минимизации не квадратичных функционалов.

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 при закрытом прессовании.

3. Получена полная информация об основных показателях НДС для различных вариантов деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций. Выполнен анализ взаимосвязи НДС с условиями деформации.

4. Впервые дана численная оценка параметров НДС и интегральных характеристик процессов деформации абразивно-вулканитовых композиций.

5. Установлены наиболее неблагоприятные с точки зрения вероятности нарушения сплошности участки деформируемой заготовки.

6. Математические модели, алгоритмы и программы расчета основных параметров процессов формования заготовок для абразивных кругов являются основой для совершенствования технологических операций и обоснованного выбора режимов деформации.

7. Экспериментально-аналитический метод исследования прочности сцепления компонентов многослойной заготовки выходит за рамки проблем, связанных с расслоением абразивных кругов. Метод может быть успешно использован для определения прочности сцепления, например, металлических композиционных материалов.

8. Нетрадиционные алгоритмы и функционалы, предложенные в работе, позволяют сократить время вычислительных процедур, а дискретно-локальный метод минимизации функционалов в значительной мере решить проблему неквадратичных функционалов, что позволяет рекомендовать соответствующие разработки диссертации для использования в научных и учебных целях.

9. Определены конструктивные и технологические параметры для новой конструкции ножниц с тангенциальным движением плоских клиновых ножей, наиболее полно удовлетворяющие производственным условиям. Выполненные технические разработки защищены патентами РФ на изобретения и полезные модели.

10. Внедрение новых способов и устройств для производства заготовок для абразивных кругов на вулканитовой связке позволило получить экономический эффект более 85 млн. руб. в ценах 2009 года за счет сокращения безвозвратного брака, расширения номенклатуры выпускаемого инструмента, уменьшения энергозатрат, предотвращения непроизводительного расхода сопутствующих материалов, уменьшения потребностей в механической обработке. Новизна технических решений защищена патентами РФ на изобретения.

11. Экономический эффект от использования новой конструкции измерителя технологических усилий составил 230 руб. на 1 тонну продукции за счет предотвращения преждевременных поломок возникающих при перегрузках, сокращения простоев, вызванных внеплановыми ремонтами и затрат на их проведение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трусовский В.И. Анализ технологии вырубki заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке. Трусовский В.И.; Павлов В.А.; Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Л.А. Баркова. – Челябинск: Изд – во ЧГТУ, 1997. С. 118 – 122.
2. Трусовский В.И. Производство абразивных отрезных кругов на вулканитовой связке. Монография. Барков Л.А.; Павлов В.А.; Чаплыгин Б.А.; Дятлов В.Н.; Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г. / Под ред. Чаплыгина Б.А. – Челябинск: Изд – во ЧГТУ, 1997. – 145 с.
3. Трусовский В.И. Производство вулканитовых абразивных кругов. Монография. Барков Л.А.; Чаплыгин Б.А.; Павлов В.А.; Дятлов В.Н.; Трусовский В.И.; Шеркунов В.Г. / Под ред. Павлова В.А. – Челябинск: Изд – во ЮУрГУ, 1998. – 332 с.
4. Трусовский В.И. Повышение качества и эффективности производства абразивных кругов на вулканитовой связке. Павлов В.А.; Трусовский 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.
5. European Abrasives Directory. – UK: Material Technology Publications, 1998. – 321 p.
6. Павлов В.А. Производство абразивных материалов ведущими фирмами Европы. Павлов В.А.; Дятлов В.Н.; Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. С.3 – 12.
7. Павлов В.А. Состояние производства абразивных материалов и инструмента на предприятиях России и Урала. Павлов В.А.; Дятлов В.Н.; Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и

композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Бакова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. С.28 – 38.

8. Павлов В.А. Абразивная промышленность развитых стран Европы. Павлов В.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. с. 3 – 8.

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

10. Трусовский В.И. Промышленные исследования процессов вальцевания и каландрования на линии № 3 АО «Росси» / Шеркунов В.Г., Трусовский В.И., Павлов В.А.; Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. С.79 – 83.

11. Чаплыгин Б.А. Исследование пластических и эластических свойств вулканитовых пластин перед каландрованием. Чаплыгин Б.А.; Дятлов В.Н.; Павлов В.А. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1997. С.102 – 111.

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

13. Судаков Н.В. Математическая модель и принципиальные особенности процесса прокатки пористого упруго вязкого материала с наполнителем из твердых включений. Судаков Н.В.; Чаплыгин Б.А.; Павлов В.А. // Машины и

технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. С. 60 – 67.

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

15. Чаплыгин Б.А. Многомерные реологические модели. Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. С. 141 – 147.

16. Чаплыгин Б.А. Условия пластического течения уплотняемых и неуплотняемых материалов. Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. С. 150 – 155.

17. Павлов В.А. Теория и технология прокатки вулканитовых абразивных смесей. Монография. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. – 309 с.

18. Барков Л.А. Новые технологии и устройства для производства сверхвысоких заготовок вулканитовых абразивных кругов. Барков Л.А.; Дятлов В.Н. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. С. 27 – 34.

19. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.

20. Малов А.Н. Технология холодной штамповки. – М.: Изд. оборон. пром-ти, 1958. – 375 с.

21. Аверкиев Ю.А., Аверкиев А.Ю. Технология холодной штамповки. М.: – Машиностроение, 1989. – 304 с.

22. Ходырев В.А. Применение полиуретана в листоштамповочном производстве. – Пермь: Пермское книжное изд-во, 1973. – 217 с.

23. Трусовский В.И. Анализ технологии вырубki заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке. В.И.Трусовский 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: Издательство ЧГТУ, 1997. С.118 – 122.

24. Технологические инструкции по изготовлению вулканитовых и гибких полировальных кругов. – Челябинск: Южно-Уральский ЦНТИ, 1970, 220 с.

25. Марченко С.В. Совершенствование технологии изготовления отрезных кругов на вулканитовой связке. Марченко С.В.; Гитенко С.Д. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / По ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1999. С. 181 – 183.

26. Чаплыгин Б.А. Получение высоких абразивных кругов на вулканитовой связке. Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1999. С. 81 – 94.

27. Дятлов В.Н. Прессование высоких заготовок абразивных кругов при регулируемом удельном давлении. Дятлов В.Н.; Чаплыгин Б.А.; Барков Л.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 1999. С. 124 –133.

28. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия, 1991. – 432 с.

29. Дятлов В.Н. Теория, технология и оборудование для производства высоких вулканитовых кругов. Избранные труды Российской школы по проблемам науки и технологий. – М.: РАН, 2002. – 187 с.

30. Любомудров В.Н., Васильев Н.Н., Фальковский Б.И. Абразивные инструменты и их изготовление. – М.: Машгиз, 1953. – 376 с.

31. Основы проектирования и технология изготовления абразивного и алмазного инструмента / В.Н.Бакуль, Ю.И.Никитин, Е.Б.Верник и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 296 с.

32. Гуревич А.С. Оборудование для производства абразивных инструментов – М. – Л.: Машиностроение, 1964. – 260 с.

33. Абразивные материалы и инструмент: Каталог / Под ред. В.Н.Тыркова. – М.: НИИ по машиностроению, 1986. – 358 с.

34. Оборудование и оснастка предприятий абразивной и алмазной промышленности / В.А.Рыбаков, В.В.Авакян, О.С.Масевич и др. – Л.: Машиностроение, 1981. – 271 с.

35. Дятлов В.Н. Разработка новых процессов и устройств для формования заготовок кругов из вулканитовых абразивных смесей: Автореф. канд. дис. – Челябинск: ЮУрГУ, 1998. – 22 с.

36. Чаплыгин Б.А. Создание прогрессивного производства вулканитового инструмента на основе моделирования процессов обработки давлением, новых способов, устройств: Автореф. докт. дис. – Магнитогорск: МГТУ, 1999. – 35 с.

37. Дятлов В.Н. Исходные материалы для абразивного инструмента. Дятлов В.Н. // Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч. тр. / Под ред. Чаплыгина Б.А. – Челябинск: Изд. ЧГТУ, 1997. С. 63 – 73.

38. Чаплыгин Б.А. Технология производства полировальных абразивных кругов на вулканитовой связке. Чаплыгин Б.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 1999. С. 31 – 41.

39. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Лагунов Ю.В. Абразивные материалы. – Л.: Машиностроение, 1984. – 230 с.

40. Молчанов С.А. Новый абразивный материал гекор и высокоэффективный шлифовальный инструмент на его основе / Молчанов С.А.; Мочиленский В.И.; Куров А.А. // Инструмент. 1996. № 2. С.4 – 5.

41. Абразивные материалы и инструменты 1991 – 1995. – Часть 3. Шлифовальная шкурка. Шлифовальные материалы: Номенклатурный каталог. – М.: ВНИИТЕМП, 1990. – 84 с.

42. Трусковский В.И. Эластические свойства прессованных полуфабрикатов абразивных кругов на вулканитовой связке. Трусковский В.И.; Шеркунов В.Г.; Дятлов В.Н. / Механика и процессы управления. Серия

Технология и машины обработки давлением. Труды XXXIII Уральского семинара. – Екатеринбург, 2003. С. 130 – 132.

43. Патент № 2127426 РФ, МПК⁷ G01N 11/00. Способ испытания свойств каучукосодержащих смесей [Текст] / Барков Л.А, Павлов В.А, Трусковский В.И. и др. // Оpubл. 10.03.1999, Бюл. № 7.

44. Патент № 2148249 РФ, МПК⁷ G01L 1/04. Составной валковый торсиометр [Текст] / Трусковский В.И., Барков Л.А., Павлов В.А. и др. // Оpubл. 27.04.2000, Бюл. № 12.

45. Качанов Л.Н. Основы теории пластичности. – М.: Металлургия, 1979. – 321 с.

46. Павлов В.А. Развитие теории и практики процессов обработки давлением в производстве вулканитового инструмента: Автореф. докт. диссертации. – Магнитогорск: МГТУ, 2001. – 44 с.

47. Карпинос Д.М., Тучинский Л.Н., Вишняков Л.Р. Новые композиционные материалы. – Киев: Вища школа, 1977. – 312 с.

48. Волков С.Д., Ставров В.П. Статистическая механика композитов. – Минск: Изд-во БГУ, 1978. – 206 с.

49. Композиционные материалы / Под ред. Л. Браутмана и Р. Крока. – М.: Мир, 1978. – Т.2. – 563 с.

50. Соколкин Ю.В., Ташкинов А.А., Механика деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел. – М.: Наука, 1984. – 115 с.

51. Prager W.J. Appl./Mech. V. 36. P. 542 – 544 (1969).

52. Победря Б.Е. Механика композиционных материалов. – М.: Изд-во МГУ, 1984. – 336 с.

53. Кристенсен Р. Введение в механику композитов. – М.: Мир, 1982. – 327 с.

54. Бабушкин Г.А., Буланов В.Я., Сеницкий И.А. Металлические композиты. Введение в феноменальную теорию. – Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1987. – 312 с.

55. Залазинский А.Г. Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. – Екатеринбург: Изд-во УРО РАН, 2000. – 320 с.

56. Патент № 2107609 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ производства абразивного инструмента на вулканитовой связке [Текст] / Барков Л.А., Трусовский В.И., Дятлов В.Н. // Оpubл. 27.03.1998, Бюл. № 9.

57. Патент № 2149750 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ формования заготовок абразивного инструмента и устройство для его осуществления [Текст] / Барков Л.А., Трусовский В.И., Дятлов В.Н. // Оpubл. 27.05.2000, Бюл. № 15.

58. Тимошенко С.П., Гудвер Д. Теория упругости / Пер. с англ.; Под ред. Г.С.Шапиро. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

59. Чаплыгин Б.А., Дятлов В.Н., Павлов В.А. Сопротивление деформации и относительное эластическое восстановление вулканитовых абразивных смесей и полуфабрикатов при формовании. Чаплыгин Б.А.; Дятлов В.Н.; Павлов В.А. // Машины и технология обработки материалов давлением: Сб. науч. тр. / Под ред. Баркова Л.А. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1999. С. 7 – 10.

60. Финкель В.М., Головин Ю.И., Родюков Г.Б. Холодная ломка проката. – М.: Металлургия, 1982. – 192 с.

61. Соловцов С.С. Совершенствование резки прутков на заготовки. // Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 9. С. 3 – 7.

62. Тимошенко В.А., Эрлих А.И., Пульбере А.И. Резка сортового проката и труб на заготовки. – Кишинёв: Штиница, 1986. – 112 с.

63. Ренне И.П., Бокман М.А. Деформация при плоском неустановившемся течении. – В кн.: Исследования в области пластичности и обработки металлов давлением. Тула: Приокское кн. изд-во, 1968.

64. Синицын В.Т. Влияние скорости деформирования на геометрическую точность резки круглого проката в штампе. – В кн.: Повышение точности и автоматизации штамповки иковки. М.: Машиностроение, 1967, с.51 – 59.

65. Мещерин В.Т., Соловцов С.С. Резка точных заготовок из сортового проката. – М.: Машиностроение, 1971. – 39 с.

66. Томленов А.Д. Теория пластического деформирования металлов. М.: Металлургия, 1982. – 192 с.
67. Ковка и штамповка: Справочник. В 4-х т. / Ред.совет: Е.И.Семенов (пред.) и др. – М.: Машиностроение, 1986. Т.1. Материалы и нагрев. Оборудование. Ковка / Под ред. Е.И.Семенова, 1985. – 568 с.
68. Соловцов С.С. Безотходная резка сортового проката в штампах. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.
69. Мещерин В.Т., Соловцов С.С., Тимонин А.И. Параметры точной резки сортового проката в штампах при высоких скоростях деформирования. // Автомобильная промышленность. 1973. № 7. С. 27 – 29.
70. Мещерин В.Т., Соловцов С.С., Тимонин А.И. Влияние высоких скоростей резки на качество заготовок, отрезаемых от сортового проката. // Кузнечно-штамповочное производство. 1972. № 8. С. 22 – 25.
71. Михаленко В.П., Антонов Ю.В. Распределение контактных напряжений при резке материалов в штампах. // Вестник машиностроения. 1975. № 6. С. 79 – 82.
72. Тимощенко В.А. Нарастание деформации и разрушение заготовки при резке. // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1989. № 8. С.87 – 90.
73. Коваленко В.Ф. Анализ схем холодной резки сортового проката сдвигом. // Кузнечно-штамповочное производство. 1968. № 5. С.18 – 21.
74. Коваленко В.Ф. Исследование резки сдвигом сортового проката при пульсирующей нагрузке. – В кн. Разработка и исследование технологических процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1968, с.73 – 83.
75. Трусковский В.И. Развитие и совершенствование способов и механических схем резки. Трусковский В.И.; Закиров Р.А. // Наука и технологии. Серия: Технологии и машины обработки давлением: Избранные труды Российской школы. – М.: РАН, 2005. С.129 – 134.
76. Трусковский В.И. Математическое моделирование НДС проката в очаге деформации при резке плоскими клиновыми ножами. Закиров Р.А.;

Трусковский В.И.; Шеркунов В.Г. // Сб. научн. тр. 1-ой Российской научно-технической конференции «Кузнецы Урала 2005» – Екатеринбург, 2005. С. 153 – 156.

77. Трусковский В.И. Численное моделирование процесса разделения сортового проката плоскими клиновыми ножами. Закиров Р.А.; Трусковский В.И. // Современные достижения в теории и технологии пластической обработки металлов: Сб. тр. международной науч.-техн. конф.– С-Петербург, 2005. С. 34 – 36.

78. Закиров Р.А. Совершенствование безотходного производства мерных заготовок на основе разработки и исследования новых технологий и оборудования для поперечной деформации. Автореферат диссертации на соиск. уч. степени кандидата технических наук. – Челябинск, 2007. – 20с.

79. Трусковский В.И. Математическая модель напряженного деформированного состояния в очаге деформации при резке плоскими клиновыми ножами. // Абразивный инструмент и металлообработка: Сб. науч. тр. / Под ред. Трусковского В.И. – Челябинск: Изд. ЦНТИ. 2001. С.103 – 106.

80. Теория прокатки / А.И.Целиков, А.Д.Томленов, В.И.Зюзин и др. – М.: Металлургия, 1982. – 335 с.

81. Рудь В.И., Шевченко М.М. Устройство для резки прутков. / Кузнечно-штамповочное производство. 1998. № 11. С.37 – 38.

82. Соловцов С.С. Приоритетное направление совершенствования производства точных коротких заготовок из сортового проката. / Кузнечно-штамповочное производство. 1990. № 7. С.8 – 11.

83. Соловцов С.С., Лисунец Л.Н., Атанасов А.М. Эффективный технологический процесс изготовления коротких заготовок из алюминиевого проката. / Кузнечно-штамповочное производство. 1992. № 5. С.10 – 12.

84. Роганов Л.Л., Исаев А.В. Сдвиговая отрезка заготовок ножами с клиновыми выступами. / Кузнечно-штамповочное производство. 1989. № 4. С.15 – 19.

85. Леонов И.С. Ножницы для резки листового и сортового проката / Леонов И.С., Фуга Г.П., Крылов Г.Л. и др. М.: Машиностроение, 1981. – 320 с.
86. Катрахов А.Н. Комплекс с ножницами для резки круглого и квадратного проката. – Кузнечно-штамповочное производство, 1987, № 2, с. 35 – 36.
87. Катрахов А.Н., Куркин И.М. Автоматизированный комплекс на базе ножниц для не полностью закрытой разрезки сортового проката. – Кузнечно-штамповочное производство, 1988, № 2, с.36 – 37.
88. Катрахов А.Н. Кривошипные ножницы для резки заготовок.– Кузнечно-штамповочное производство, 1999, № 5, с.35 – 36.
89. Макшанов Л.Я., Кудинов И.Е., Удалов П.П. Оборудование для раскроя сортового проката. – Кузнечно-штамповочное производство, 1981, № 5, с.26 – 28.
90. Hill Acme. Machine Systems For Metals And Metalworking. Каталог Фирмы.
91. Основные направления развития оборудования для резки проката за рубежом. Обзор. – М.: Машиностроение, 1976. – 56 с.
92. Трусовский В.И. Измерители технологических усилий для кузнечно-прессовых машин. – Контроль. Диагностика. 2012, № 7, с. 68 – 71.
93. Кузнечно-штамповочное оборудование / Банкетов А.Н., Бочаров Ю.А., Добринский Н.С. и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 576 с.
94. Охрименко Я.М. Технология кузнечно-штамповочного производства. – М.: Машиностроение, 1976. – 560 с.
95. Кононенко В.Г. Высокоскоростное формоизменение и разрушение металлов. – Харьков: Вища школа. Изд-во при Харьковском университете, 1980. – 231 с.
96. Кириенко П.Г. Скоростная машина для резки проката / Кириенко П.Г., Кобрин В.Н., Федосиенко И.Г. и др. – Кузнечно-штамповочное производство, 1998, № 11, с. 35 – 37.

97. Кононенко В.Г. Оборудование и технология импульсной обработки материалов. Л.: Машиностроение, 1968. – 50 с.

98. Соловцов С.С., Тимонин А.И. Положительное влияние высокой скорости на качество коротких заготовок, отрезаемых от прутка. – Кузнечно-штамповочное производство, 1977, № 3, с. 25 – 27.

99. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. Учебник для ВУЗов. – М.: Металлургия, 1986. – 686 с.

100. Тимощенко В.А. Комплексные исследования и совершенствование разделительных процессов обработки металлов давлением (обобщение опыта работы Кишиневского политехнического института). – Кузнечно-штамповочное производство, 1992, № 5, с. 12 – 15.

101. Соловцов С.С. Состояние и перспективы развития разделительных процессов обработки металлов давлением. – Кузнечно-штамповочное производство, 1981, № 8, с. 34 – 36.

102. Тимощенко В.А., Тока А.В. Чистовая обработка толстолистовых заготовок. – Кишинев: Штиница, 1984. – 88 с.

103. Тимощенко В.А., Богоев В.С. Разделение листового металла эластичными средами. – Кишинев: Штиница, 1988. – 107 с.

104. Безухов Н.И. Теория упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1969. – 258 с.

105. Андреев Г.В. Поперечно-клиновая прокатка / Андреев Г.В., Клушин В.А., Макушок Е.М. и др. – Минск: БелНИИТИ, 1974. – 146 с.

106. Бурман З.И. Суперэлементный расчет подкрепленных оболочек / Бурман З.И., Аксенов В.М., Лукашенко В.И. и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 256 с.

107. Бурман З.И., Тимофеев М.Т. Математическое обеспечение для матричных расчетов тонколистовых пространственных конструкций с применением МКЭ // Вопросы оптимального использования ЭЦВМ в расчете сложных конструкций: Сб. науч. тр. КГУ. Казань, 1973, с. 87 – 94.

108. Голенков В.А., Радченко С.Ю. Технологические процессы обработки металлов давлением с локальным нагружением заготовки. – М.: Машиностроение, 1977. – 226 с.

109. Голенков В.А., Кондрашов В.И., Зыкова З.П. Математическое моделирование процессов обработки материалов давлением. Уч. пособ. – М.: Машиностроение, 1994. – 272 с.

110. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.

111. Радченко С.Ю., Маркин Н.И., Филин А.В. Исследование процесса отрезки точных коротких заготовок. – Заготовительное производство в машиностроении, 2003, № 3, с. 45 – 48.

112. Закиров Р.А. Математическая модель разделения проката плоскими клиновыми ножами // Наука и технологии. Избранные труды Российской школы «К 70-летию Г.П.Вяткина». – М.: РАН, с. 20 – 21.

113. Томсен Э., Янг К., Кобаяши Ш. Механика пластической деформации при обработке металлов. – М.: Машиностроение, 1969. – 503 с.

114. Соловцов С.С., Круглова Е.Д. Расчет поля напряжений в очаге пластической деформации при неполной закрытой резке. – Известия ВУЗов. Машиностроение, 1972, № 11, с. 140 – 144.

115. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во Уральского государственного технического университета – УПИ, 2001. – 836 с.

116. Коликов А.П. Новые процессы деформации металлов и сплавов: Учебное пособие для ВУЗов / Коликов А.П., Полухин В.И., Крупин А.В. и др. – М.: Высшая школа, 1986. – 351 с.

117. Унксов Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. – М.: Машгиз, 1957. – 164 с.

118. Унксов Е.П. Инженерная теория пластичности. Методы расчета усилий деформирования. – М.: Машгиз, 1959. – 268 с.

119. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М.: Машиностроение, 1971. – 232 с.
120. Смирнов-Аляев Г.А. Механические основы пластической обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1968. – 240 с.
121. Смирнов-Аляев Г.А. Сопротивление материалов пластическому деформированию. – М.: Машгиз, 1961. – 234 с.
122. Соколов Л.Д. Сопротивление металлов пластической деформации. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 284 с.
123. Смирнов В.С. Сопротивление деформации и пластичность металлов (при обработке давлением) / Смирнов В.С., Григорьев А.К., Пакудин В.Я. и др. – М.: Metallurgiya, 1975. – 272 с.
124. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов. 2-е изд. перераб и доп. Справочник. – М.: Metallurgiya, 1983. – 352 с.
125. Целиков А.И. Поперечно-клиновое прокатание в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1982. – 214 с.
126. Шеркунов В.Г., Трусовский В.И. К определению геометрии и кинематики очага деформации при резке сортового проката на ножницах с тангенциальным движением инструмента // Труды VI Международной научно-практической конференции «Научно-технический прогресс в металлургии». – Алматы, РИК по учебной и методической литературе, 2011, с. 253 – 258.
127. Тимощенко В.А. Обобщение и разработка разделительных процессов обработки металлов давлением. Автореферат диссертации на соиск. уч. степени доктора технических наук. – Краматорск, 1989. – 37с.
128. Тимощенко В.А., Ермилов В.В., Эрлих А.И. Исследование деформирования заготовки при резке сортового проката сдвигом. – Кузнечно-штамповочное производство, 1977, № 12, с. 26 – 28.
129. Колмогоров В.Л. Пластичность и разрушение. М.: Metallurgiya, 1977. – 230 с.

130. Михаленко В.П., Антонов Ю.В. Распределение контактных напряжений при резке материала в штампах. – Вестник машиностроения, 1975, № 6, с.79 – 82.
131. Тимощенко В.А., Собакин Е.Д. Исследование напряженного состояния при резке полосы сдвигом. – Известия ВУЗов. Машиностроение, 1979, № 10, с.126 – 130.
132. Михайлов Ю.А., Глазунов Ю.Т. Вариационные методы в теории нелинейного тепло и массо-переноса. – Рига. – Зинатне, 1985. – 260 с.
133. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1979. – 744 с.
134. Колмогоров В.Л., Карпов С.В., Федотов В.П. Математическая модель осадки на прессе осесимметричного тела // Обработка металлов давлением: Сб. науч. тр. – Свердловск: УПИ, 1978. – Вып. 5. – с.23 – 27.
135. Теорияковки и штамповки / Т.П.Унксов, У.Джонс, В.Л.Колмогоров, Р.Д.Витнер и др. – М.: Машиностроение, 1992. – 720 с.
136. Михайлов А.В. Замена функционала виртуальных скоростей и напряжений последовательностью квадратичных функционалов. – Обработка металлов давлением. Межвузовский сб. – Свердловск. – Изд. УПИ им. С.М.Кирова, 1986, с.19 – 23.
137. Писаренко Г.С., Можаровский Н.С. Уравнения и краевые задачи теории пластичности и ползучести. – Киев: Наукова думка. – 1981. – 496 с.
138. Морозов Е.Н., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. – М.: Наука, 1980. – 256 с.
139. Степанский Л.Г., Унксов Е.П. О приближенном решении некоторых плоскодеформированных и осесимметричных пластических задач. – М.: Изв. АН СССР. Механика и машиностроение, №1, 1961, с. 261 – 279.
140. Саккаев Ю.Г. Оценка решения одной плоской задачи теории пластичности / Инженерный журнал. Т.2, вып.4, 1962, с.12 – 29.
141. Ильюшин А.А., Поздеев А.А. Метод гидродинамических приближений / Инженерный журнал. Т.1, вып.4, 1961, с.18 – 26.

142. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1979.– 321 с.
143. Ворович И.И., Красовский Ю.П. О методе упругих решений // АН СССР. – 1959. Т.126, вып.4, с. 740 – 743.
144. Быков Д.Л. О некоторых методах решения задач теории пластичности // Упругость и неупругость. М.: МГУ, 1974, вып.5, с. 119 – 139.
145. Биргер И.А. Некоторые общие методы решения задач теории пластичности // ПММ. – 1951. Т.15, вып.6, с. 765 – 770.
146. Федотов В.П., Трубин В.Н., Голомидов А.И. Определение напряженного состояния по деформированному при ковке. – Обработка металлов давлением. – Межвузовский сб. – Свердловск. Изд УПИ им. С.М.Кирова, 1986, с. 139 – 144.
147. Полищук Е.Г., Портнов М.В., Вайсбурд В.А. Определение полей напряжений для жестко-пластических сред. – Обработка металлов давлением. Межвузовский сб. – Свердловск. - Изд.УПИ им. С.М.Кирова, 1989, с. 9 – 13.
148. Коновалов В.А., Михайлов А.В., Степанов В.П. Напряженно-деформированное состояние при радиальном сжатии двухслойной трубы. – Обработка металлов давлением. – Межвузовский сб. – Свердловск. – Изд. УПИ им. С.М.Кирова, 1986, с. 128 – 133.
149. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости: Пер. с англ. / Под ред. Г.С.Шапиро. – 2-е изд. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
150. Залазинский А.Г. Пластическое деформирование структурно неоднородных материалов. – Екатеринбург: УрОРАН, 2000, ISBN 5 – 7691 – 0987 – 4.
151. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
152. Судаков В.Н., Шеркунов В.Г. Совершенствование алгоритмов определения напряженно-деформированного состояния в задачах обработки материалов давлением. – Научно-технические ведомости СПбГПУ. Выпуск 51. 2007, с.92 – 94.

153. Судаков Н.В., Трусовский В.И., Шеркунов В.Г. Разработка нетрадиционных функционалов и алгоритмов расчета напряженно-деформированного состояния // Сб. тр. 7-ой международной науч.-техн. конф. – Екатеринбург, 2013. С. 62 – 78.

154. Mathcad 6.0 PLUS. Финансовые, инженерные и научные расчеты в среде Windows 95. Изд. 2-е, стереотипное. – М.: Информационно издательский дом «Филин», 1997. – 712 с.

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

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

157. Патент № 2149748 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Поточно-механизированная линия для производства абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Чаплыгин Б.А., Павлов В.А. др. // Оpubл. 27.05.2000, Бюл. № 15.

158. Патент № 94186 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Поточно-механизированная линия для производства абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Забирко Д.А. // Оpubл. 20.05.2010, Бюл. № 14.

159. Патент № 2221687 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ получения заготовок абразивных кругов на вулканитовой [Текст] / Дятлов В.Н., Трусовский В.И., Гитенко С.Д. и др. // Оpubл. 20.01.2004, Бюл. № 15.

160. Патент № 2227778 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Штамп вырубной [Текст] / Дятлов В.Н., Трусовский В.И., Гитенко С.Д. и др. // Оpubл. 27.04.2004, Бюл. № 12.

161. Патент № 2103155 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Штамп для вырубki кольцевых заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., В.А. Павлов В.А., Л.А. Барков Л.А. и др. // Оpubл. 27.01.1998, Бюл. № 3.

162. Патент №2127164 РФ, МПК⁷ В21D 28/14. Ножевой штамп [Текст] / Трусовский В.И., Барков Л.А., Чаплыгин Б.А. и др. // Оpubл. 10.03.1999, Бюл. № 7.

163. Патент №2149073 РФ, МПК⁷ В21D 28/14. Штамп вырубной [Текст] / Трусовский В.И., В.Н. Дятлов В.Н., Б.А. Чаплыгин Б.А. и др. // Оpubл. 20.05.2000, Бюл. № 14.

164. Анализ технологии вырубki заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке / В.И.Трусовский, В.А.Павлов, Чаплыгин Б.А. и др. – Машины и технология обработки давлением порошковых и композиционных материалов: Сб. науч.тр. – Челябинск, Издательство ЧГТУ, 1997, с.118 – 122.

165. Патент № 2101165 РФ, МПК⁷ 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.

166. Патент № 2138386 РФ, МПК⁷ 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.

167. Патент № 16470 РФ, МПК⁷ В24D 5/00. Отрезной круг на вулканитовой связке [Текст] / В.И. Трусовский В.И., Павлов В.А, Гитенко С.Д. и др. // Оpubл. 10.01.2001, Бюл. №1.

168. Патент № 2202463 РФ, МПК⁷ В24D 18/02. Способ изготовления заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Барков Л.А., Зарщиков А.В., Трусовский В.И. и др. // Оpubл. 20.04.2003, Бюл. № 11.

169. Патент № 2147984 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Заготовка для производства абразивного инструмента и устройство для ее получения [Текст] / Трусовский В.И., Барков Л.А., Павлов В.А. и др. // Оpubл. 27.04.2000, Бюл. № 12.

170. Патент № 2224635 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ производства абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Барков Л.А., Павлов В.А. и др. // Оpubл. 27.02.2004 Бюл. № 6.

171. Патент № 2096166 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ формования абразивного инструмента [Текст] / Барков Л.А., Трусовский В.И., Павлов В.А. и др. // Оpubл. 20.11.1997, Бюл. № 18.

172. Патент № 2174906 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ формования абразивного инструмента [Текст] / Барков Л.А., В.А. Павлов В.А., Трусовский В.И. и др. // Оpubл. 20.10.2001, Бюл. №29.

173. Патент № 2180284 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ производства абразивного инструмента [Текст] / Трусовский В.И., Павлов В.А., Шеркунов В.Г. // Оpubл. 10.03.2002, Бюл. № 7.

174. Патент № 2164858 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ формования абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Барков Л.А., В.Н. Дятлов В.Н. // Оpubл.10.04.2001, Бюл. № 9.

175. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя; в 3-х т. Т.1 – 5-е изд., перераб и доп. – М.: Машиностроение, 1980, с.243.

176. Патент № 2149096 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ производства абразивных кругов и устройство для его осуществления [Текст] / Трусовский В.И., Барков Л.А., Дятлов В.Н. и др. // Оpubл. 20.05.2000, Бюл. № 13.

177. Патент № 2198782 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Устройство для прессования абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Павлов В.А., Барков Л.А. и др. // Оpubл. 20.02.2003, Бюл. № 5.

178. Патент № 2107609 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ производства абразивного инструмента и устройство для его осуществления [Текст] / Барков Л.А., Трусовский В.И., Павлов В.А. и др. // Оpubл. 27.03.1998, Бюл. № 9.

179. Патент № 2228255 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Устройство для производства абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Дятлов В.Н., Трусовский В.И. // Оpubл. 10.05.2004, Бюл. № 13.

180. Патент №2227777 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ производства абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Л.А. Барков Л.А., Трусовский В.И., Дятлов В.Н. и др. // Оpubл. 27.04.2004. Бюл. № 12.

181. Патент № 2207947 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ производства заготовок чашечных шлифовальных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Павлов В.А., Барков Л.А., Трусовский В.И. и др. // Оpubл. 10.07.2003. Бюл. № 19.

182. Патент № 2074553 РФ, МПК⁷ В22F 3/03. Пресс-форма для прессования тонких пластин из порошкового материала [Текст] / Трусовский В.И., Л.А. Барков Л.А., Сорокин А.В. и др. // Оpubл. 27.02.1997. Бюл. № 6.

183. Патент № 2100185 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Пресс-форма для прессования тонких изделий из порошкового материала [Текст] / В.И. Трусовский В.И., Барков Л.А., Самодурова М.Н. и др. // Оpubл. 21.12.1997, Бюл. № 36.

184. Трусовский В.И. Оборудование для обработки давлением порошков и порошковых заготовок / Л.А.Барков, В.И.Трусовский, С.А.Мымрин и др. – Челябинск: Металл, 1992. – 296 с. (монография).

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

186. Стандарт предприятия СТПЗ-1-77. Технологическая оснастка. Штампы вырубные. Челябинский завод шлифовального инструмента.

187. Трусовский В.И., Павлов В.А. Исследование процесса прокатки вулканитовых листов. – Машиностроитель, 2000, с.8 – 10.

188. Трусовский В.И. О эффективности открытой осадки пакетных заготовок при производстве абразивного инструмента на вулканитовой связке. – Технология машиностроения, 2014, № 1 с.

189. Трусовский В.И. Совершенствование технологии прессования заготовок для шлифовальных и полировальных абразивных кругов на вулканитовой связке. – Справочник. Инженерный журнал, 2013, №6, с. 10 – 16.

190. Патент № 2155671 РФ, МПК⁷ В24D 18/00. Способ формования абразивных кругов на вулканитовой связке [Текст] / Трусовский В.И., Барков Л.А., Павлов В.А. и др. // Оpubл. 10.09.2000, Бюл. № 25.

191. А.С. № 1355379 SU, МПК⁷ В23D 15/00. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Барков Л.А., Иванов С.К., Трусовский В.И. // Оpubл. 30.11 1998, Бюл. № 44.

192. Патент № 44565 РФ, МПК⁷ В23D 15/00. Ножницы для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И., Закиров Р.А., Шеркунов В.Г. // Оpubл. 27.03.2005, Бюл. № 8.

193. Трусовский В.И. Сортовые ножницы с тангенциальным движением ножей. – Абразивный инструмент и металлообработка: Сборник научных трудов. – Челябинск: Издательство ЦНТИ, 2001, с. 97 – 103.

194. Патент № 2063847 РФ, МПК⁷ В23D 15/02. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Яшин В.И., Шевцов В.С., Трусовский В.И. и др. // Оpubл. 20.07.1996, Бюл. № 20.

195. Трусовский В.И., Шеркунов В.Г. К назначению угла наклона плоских клиновых ножей для резки сортового проката на ножницах с тангенциальным движением инструмента. – Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И.Носова, №3 (39) сентябрь 2012, с. 21 – 24.

196. Трусовский В.И., Шеркунов В.Г. Ножницы для резки сортового проката и толстостенных труб. – Metallurg, №11, 2012, с. 63 – 67.

197. Патент № 2271900 РФ, МПК⁷ В23D 15/02. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл. 20.03.2006, Бюл. № 8.

198. Патент № 116390 РФ, МПК⁷ В23D 15/00. Ножницы для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл.27.05.2012, Бюл.№15.

199. Патент № 2283732 РФ, МПК⁷ В23D 15/02. Ножницы для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И., Закиров Р.А. // Оpubл. 20.09.2006, Бюл. № 26.

200. Патент № 2290281 РФ, МПК⁷ В23D 15/02. Ножницы для резки заготовок круглого сечения [Текст] / В.И. Трусовский В.И., Закиров Р.А. // Оpubл. 27.12.2006, Бюл. № 36.

201. Патент № 2274520 РФ, МПК⁷ В23D 15/02. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И., Закиров Р.А., Шеркунов В.Г. // Оpubл. 20.04.2006, Бюл. № 9.

202. Патент № 2277033 РФ, МПК⁷ В23D 15/02. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И., Закиров Р.А., Шеркунов В.Г. // Оpubл. 27.05.2006, Бюл. № 15.

203. Патент № 2279952 РФ, МПК⁷ В23D 15/00. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И., Закиров Р.А. // Оpubл. 20.07.2006, Бюл. № 20.

204. Патент РФ № 2279953 РФ, МПК⁷ В23D 15/00. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И., Закиров Р.А., Патук Е.В. // Оpubл. 20.07.2006, Бюл. № 20.

205. Патент № 43484 РФ, МПК⁷ В23D 15/00. Ножницы для резки заготовок круглого сечения [Текст] Трусовский В.И., Закиров Р.А., Шеркунов В.Г. // Оpubл. 27.01.2005, Бюл. № 3.

206. Патент № 116391 РФ, МПК⁷ В23D 15/00. Устройство для резки заготовок круглого сечения [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл. 27.05.2012, Бюл. № 15.

207. А.С. №1459822 SU, МПК⁶ В23D 23/00. Штамп для разделения пруткового материала [Текст] / Трусовский В.И., Иванов С.К. // Оpubл. 23.02.1989, Бюл. № 7.

208. Коваленко В.Ф., Санников С.С., Струков П.И. Тарировка кривошипного горячештамповочного пресса НКМЗ усилием 4000 т методом крешеров. – Кузнечно-штамповочное производство, 1960, №11, с. 35-37.

209. Патент США № 3621927, Кл. 177 – 211, 1971.
210. А.С. №419745 СССР, МПК⁶ В30В 15/28, G01L1/06. Устройство для измерения усилий пресса [Текст] / Н.И.Амелехин, Э.С.Ковалев, М.М.Розенблат и др. // Оpubл. 15.03.74, Бюл. № 10.
211. А.С. № 705283 СССР, МПК⁶ G01L1/06. Устройство для измерения усилий. [Текст] / Б.Р.Михасишин // Оpubл. 25.12.79, Бюл. № 47.
212. Розенблат М.М., Ковалев Э.С. Тензометрический измеритель усилия кривошипных прессов. – Кузнечно-штамповочное производство, 1982, №11, с. 22 – 23 с.
213. Тензометрия в машиностроении. Справочное пособие. Под ред. Р.А.Макарова. М.: Машиностроение, 1975. 288 с.
214. Патент № 2219505 РФ, МПК⁷ G01L1/06, В30В 15/28. Измеритель усилия пресса [Текст] / Трусовский В.И. // Оpubл. 20.12.2003, Бюл. №35.
215. Трусовский В.И. Измеритель усилия пресса. – Вестник ЮУрГУ. Машиностроение. Выпуск 6. № 1[41], 2005, с. 185 – 186.

ПРИЛОЖЕНИЕ

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по научной работе
Южно-Уральского
государственного университета
Ваулин С.Д.



2013 г.

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
ОАО «Уральская кузница»
В.В. Бондарев



г.

А К Т производственных испытаний

Настоящий акт свидетельствует о том, что в цехе № 21 ОАО «Уральская кузница» (г.Чебаркуль, Челябинской обл.) проведены производственные испытания изготовленных заводом по проекту Южно-Уральского государственного университета новой конструкции ножниц для резки прутков круглого сечения.

При исполнении основных и вспомогательных узлов конструкции ножниц были использованы следующие технические решения, защищенные авторскими свидетельствами и патентами на изобретения и полезные модели РФ: а.с. SU № 1355379 (устройство для резки проката круглого сечения); № 44565 (ножницы для резки сортового проката); № 2283732 (конструкция ножей с оптимальным углом наклона рабочих кромок); № 2063847 (кассеты для крепления ножей); № 2290281 (направляющая проводка для подачи прутка в зону реза); № 2279953 (конструкция ножей, исключаяющая смещение разрезаемой штанги относительно плоскости реза при тангенциальном движении ножей).

В ходе испытаний осуществлялась разрезка прутков из углеродистых марок сталей диаметром от 15 до 20 мм, что обусловлено возможностями используемой гидростанции.

Конструкция ножниц обеспечивает получение мерных заготовок с достаточной геометрической точностью и качеством плоскости разделения.

От ЮУрГУ

Заведующий кафедрой
М и ТОМД, профессор, д.т.н.
Шеркунов В.Г.

К.т.н, доцент кафедры М и ТОМД
Трусковский В.И.

От ОАО «Уральская кузница»

Главный механик
ОАО «Уральская кузница»
Захаров В.Н.

Ведущий инженер ОГМ
Патук Е.В.

УТВЕРЖДАЮ
Технический директор
ОАО «Уральская кузница»



А К Т
промышленного внедрения

Настоящий акт свидетельствует о том, что в цехе № 27 ОАО «Уральская кузница» (г.Чебаркуль, Челябинской обл.) по проекту Южно-Уральского государственного университета на сортовых кривошипных ножницах с номинальными усилиями 40, 16, 10 и 5,5 МН были установлены устройства для регистрации технологических усилий резки сортового проката согласно патенту РФ № 2219505 «Измеритель усилия пресса».

Введение измерительного устройства в систему управления кривошипными ножницами позволило предотвратить их перегрузки и связанные с этим преждевременные поломки ответственных и дорогостоящих узлов и деталей, сократить простои, вызванные необходимостью проведения внеплановых ремонтов. Полученные значения действительных технологических усилий отрезки позволили рационально перераспределить разрезаемый прокат по сечению между ножницами соответствующих усилий, а часть проката перевести на резку в холодном состоянии.

В результате эксплуатации внедренных устройств среднегодовой экономический эффект за счет сокращения простоев вызванных внеплановыми ремонтами и затрат на их проведение составил 230 руб. (двести тридцать руб.) на 1 тонну продукции.

От ЮУрГУ

Заведующий кафедрой М и ТОМД
профессор, д.т.н. Шеркунов В.Г.

к.т.н., доцент кафедры М и ТОМД
Трусковский В.И.

От ОАО «Уральская кузница»

Главный механик
Захаров В.Н.

Ведущий инженер ОГМ
Патук Е.В.



ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
Уральский научно-исследовательский институт
абразивов и шлифования

ОАО «УралНИИАШ»

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 81 т/ф (351) 265-56-46, e-mail: normativ_abraziv@mail.ru

17.04.2012 № 84-2/2

Акт внедрения

Настоящим актом подтверждается практическое использование лабораторией вулканитового инструмента ОАО «УралНИИАШ» следующих разработок, изложенных в диссертационной работе сотрудника Южно-Уральского Государственного университета к.т.н., Доцента кафедры «Машины и технология обработки материалов давлением» Трусковского В.И.:

1. Методика исследования и математическая модель определения напряженно-деформированного состояния процесса прессования заготовок для вулканитовых кругов.
2. Методика исследования и математическая модель определения параметров вырубki кольцевых и сплошных заготовок вулканитового инструмента.
3. Устройство для замера и методика определения силовых параметров прессового оборудования.

Генеральный директор
д.т.н., профессор



Заведующая лабораторией
вулканитового инструмента

Чаплыгин Б.А.

Гитенко С.Д.



454007 ЧЕЛЯБИНСК ПР. ЛЕНИНА 2А
ТЕЛ. 33-85-15 ФАКС 77-23-95
ТЕЛЕТАИП 124626 «ШЛИФ»

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что за период 1999 – 2008 г.г. в рамках выполнения хозяйственных работ № 1999114, №2002039, №2003491 в действующее производство внедрены следующие изобретения:

Патент РФ. №2149748. Поточно-механизированная линия для производства абразивных кругов на вулканитовой связке; Патент РФ № 2227778. Штамп вырубной; Патент РФ. № 2103155. Штамп для вырубки кольцевых заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке; Патент РФ. №2127164. Ножевой штамп. Патент РФ. №2149073. Штамп вырубной; Патент РФ. №2103155. Штамп для вырубки кольцевых заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке; Патент РФ. № 2101165. Устройство для вырубки абразивных кольцевых заготовок на вулканитовой связке; Патент РФ. № 2138386. Пресс-форма для производства отрезных абразивных кругов; Патент РФ № 16470. Отрезной круг на вулканитовой связке; Патент РФ № 2096166. Способ формования абразивного инструмента; Патент РФ № 2174906. Способ формования абразивного инструмента; Патент РФ № 2164858. Способ формования абразивных кругов на вулканитовой связке; Патент РФ № 2127426. Способ испытаний каучукодержащих смесей.

Освоение новых технологий, оборудования и технологической оснастки обеспечило:

1. Расширение сортамента продукции на 14%. В частности, впервые в России освоено производство отрезных кругов высотой 0,1 мм, армированных отрезных кругов, кругов с поднутрением, сверхвысоких (более 500 мм) кругов для бесцентрового шлифования.

2. Увеличение числа потребителей отечественной абразивной продукции на 13%. Продукция реализуется более чем на 400 предприятиях России и стран СНГ.

3. Экономический эффект в ценах 2009 г составил более 85 млн.руб.

Генеральный директор ЗАО «Росси»  Н.М. Кузнецов

Начальник техотдела  Е.К. Литвинцев

Гл. бухгалтер  Т.И. Муртазина

Р.С. 262101 В ТРАКТОРЗАВОДСКОМ
ОТДЕЛЕНИИ ИНДКОМБАНКА
Г. ЧЕЛЯБИНСКА МФО 278058



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

пр. Ленина, 76, г. Челябинск, Россия, 454080
Тел./факс (351) 267-99-00, <http://www.susu.ac.ru>, E-mail: admin@susu.ac.ru,
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001



УТВЕРЖДАЮ
Декан по учебной работе

Шмидт А.В.

«4» 12 2013 г.

АКТ

об использовании результатов научных исследований в учебном процессе

Настоящий акт подтверждает, что результаты научных исследований, представленные в диссертации «Развитие теории и практики производства заготовок обработкой давлением на основе совершенствования методов анализа НДС, создания новых способов и устройств» на соискание ученой степени доктора технических наук, выполненной к.т.н., доцентом кафедры «Машины и технология обработки материалов давлением» Трусовским Виктором Ивановичем используются в учебном процессе.

Полученная информация об основных показателях напряженно-деформированного состояния для различных вариантов деформации сплошных и полых цилиндрических заготовок из абразивно-вулканитовых композиций при открытом и закрытом прессовании, предложенные нетрадиционные функционалы и алгоритмы определения напряженного и деформированного состояний излагаются в курсе лекций «Прикладная механика сплошных сред».

Конструкторско-технологические разработки направленные на создание новых способов и устройств для получения заготовок абразивных кругов на вулканитовой связке используются в лекционном курсе «Технология обработки давлением порошковых материалов», в курсовом и дипломном проектировании.

Выполненные новые разработки в области оборудования для разделения сортового проката на мерные заготовки, предложенные новые устройства для измерения технологических усилий, методика определения их исполнительных размеров рассматриваются в курсе лекций «Кузнечно-штамповочное оборудование», а также используются в дипломном проектировании.

Декан физико-металлургического факультета

Михайлов Г.Г.

Ученый секретарь кафедры «Машины и технология обработки материалов давлением»

Экк Е.В.

