

Донбасская государственная машиностроительная академия

На правах рукописи

Грибков Эдуард Петрович

УДК 621.762.04/06;

621.762.4.047

**РАЗВИТИЕ НАУЧНЫХ ОСНОВ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ
ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
ДЛИННОМЕРНЫХ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ В
ОБОЛОЧКЕ**

Специальность 05.03.05 "Процессы и машины обработки давлением"

**Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук**

**Научный консультант:
доктор технических наук, профессор,
Сатонин Александр Владимирович**

Краматорск 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	6
Раздел 1. Технологические режимы, конструктивные особенности механического оборудования и методы расчета для производства длинномерных металлопорошковых изделий (состояние вопроса)	15
1.1 Виды, назначение и сортамент длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке.....	15
1.2 Виды, назначение и сортамент длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке.....	25
1.3 Конструктивные особенности механического оборудования для производства длинномерных металлопорошковых изделий.....	64
1.4 Теоретические основы процессов производства длинномерных металлопорошковых изделий.....	80
1.5 Перспективы развития технологии и оборудования процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков	93
Раздел 2. Выбор направлений и методов исследований	99
2.1 Расширение сортамента, повышение качества и снижение себестоимости готовой металлопродукции как основное направление научных исследований в области производства длинномерных изделий из металлопорошков	99
2.2 Выбор методов теоретических исследований	101
2.3 Выбор методов экспериментальных исследований	105
Раздел 3. Определение условия пластичности при описании процессов производства длинномерных металлопорошковых изделий	118
3.1 Использование условия пластичности для пористых тел при моделировании процессов изготовления порошковых лент и проволоки.....	118

3.2 Экспериментальное определение физико-механических свойств порошков различного состава	124
Раздел 4. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при производстве порошковых лент в металлической оболочке	129
4.1 Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при первичной (уплотняющей) прокатке порошкового сердечника в металлической оболочке.....	129
4.2 Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке двухслойного порошкового сердечника в металлической оболочке	166
4.3 Численное математическое моделирование процесса прокатки порошковой ленты в закрытой оболочке.....	178
4.4 Конечно-элементное математическое моделирование процессов прокатки порошковой ленты в металлической оболочке	192
Раздел 5. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении и плющении порошковой проволоки в металлической оболочке	200
5.1 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении металлопорошковых материалов в оболочке.....	200
5.2 Трехмерное конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки в металлической оболочке	221
5.3 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки	223
5.4 Трехмерное конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки в металлической оболочке	236

Раздел 6. Экспериментальное исследование процессов производства длинномерных изделий из металлопорошков в металлической оболочке	242
6.1 Экспериментальные исследования прокатки порошковых лент в металлической оболочке	242
6.2 Экспериментальное исследование процесса волочения порошковой проволоки.....	246
6.3 Экспериментальные исследования процесса плющения порошковой проволоки в металлической оболочке	251
Раздел 7. Совершенствование технологических режимов и конструктивных параметров оборудования для производства длинномерных изделий из металлопорошков в оболочке	259
7.1 Автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки порошковой ленты	259
7.2 Автоматизированное проектирование технологических режимов волочения порошковой проволоки	271
7.3 Автоматизированное проектирование процессов изготовления порошковой плющенной ленты в металлической оболочке	275
7.4 Прогнозирование отсутствия проколов оболочки при использовании различных частиц порошкового сердечника.....	280
7.5 Имитационное математическое моделирование основных показателей качества готовой порошковой ленты	291
7.6 Выбор рациональных технологических параметров для обеспечения равномерного распределения плотности по сечению порошкового сердечника.....	300
Выводы.....	309
Список использованных источников.....	313
Приложения.....	352

Приложение А . Методика и результаты экспериментального определения физико-механических свойств порошков различного состава	353
Приложение Б . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при первичной прокатке порошковых материалов в металлической оболочке (VB 6.0).....	358
Приложение В . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при прокатке двухслойных порошковых материалов в металлической оболочке (VB 6.0).....	362
Приложение Г . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при вторичной порошковых материалов в закрытой металлической оболочке (VB 6.0).....	369
Приложение Д . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при волочении порошковой проволоки (QBX 7.0).....	374
Приложение Е . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при плющении порошковой проволоки (QBX 7.0).....	377
Приложение Ж . Акты использования.....	383

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Вопросы энергосбережения, экономии материальных ресурсов и использования вторичного сырья в Украине делают актуальным развитие процессов порошковой металлургии с использованием методов обработки давлением. Использование порошковых материалов позволяет получать изделия с уникальным сочетанием эксплуатационных характеристик, которые нашли широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности в сварочном и металлургическом производстве. К длинномерным металлопорошковым изделиям относят порошковые ленты и проволоки, которые представляют собой уплотненный порошковый сердечник в металлической оболочке, герметичность которой обеспечивается при помощи замкового соединения. Производство изделий из порошковых материалов посредством непрерывных технологий, таких как прокатка и волочение, имеют ряд преимуществ и характеризуются высокой эффективностью.

Стандартами на порошковые ленты, проволоки для сварки и наплавки, а также на проволоку для внепечной обработки стали, помимо геометрических характеристик, регламентируются распределение коэффициента заполнения по длине заготовки, отсутствие проколов оболочки и обеспечение непросыпания порошка при сварке и транспортировке. Рекомендации по обеспечению качественных показателей при производстве длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке в настоящее время носят эмпирический характер и основаны на обобщении производственного опыта. Использование широкого спектра как материалов оболочки, так и порошкового сердечника требует многочисленных промышленных экспериментов по изготовлению такого вида продукции.

Качество металлопорошковых изделий в оболочке предопределяется оптимальными технологическими параметрами процессов, конструктивными параметрами оборудования и рациональным выбором исходной заготовки что обеспечивается использованием автоматизированных систем управления на основе

математического аппарата, позволяющего на стадии проектирования оборудования и технологии прогнозировать параметры технологического процесса и качество получаемой продукции.

Теоретические исследования обработки порошковых материалов давлением представлены достаточно широко в работах отечественных и зарубежных ученых. Основываясь на использовании различных условий пластичности для пористых тел в данных работах довольно точно описаны закономерности формирования плотности и напряжено-деформированного состояния, но в них исследован процесс деформации исключительно порошковой среды, в то время как при наличии оболочки определенной формы, размеров и свойств изменяется механизм пластической деформации. В итоге существующие методы расчета дают завышенные результаты по плотности порошкового сердечника и энергосиловым параметрам процессов изготовления, что приводит к снижению эксплуатационных характеристик готовой продукции и повышению затрат на производство и оборудование. Также нерешенными проблемами остаются рациональный выбор формы, геометрических характеристик, материала оболочки и сохранение её формы и целостности при совместной деформации с порошковым сердечником. Отмеченное характерно для всех процессов получения длинномерных порошковых изделий в оболочке, что в результате снижает их эффективность, поэтому развитие научных основ с учетом влияния оболочки является важной научной проблемой и обуславливает актуальность данной работы.

Связь работы с научными программами, планами, темами. Тема диссертации соответствует научному направлению одной из ведущих научных школ Донбасской государственной машиностроительной академии «Создание новых и совершенствование действующих технологий, оборудования и средств автоматизации в прокатном производстве». Работа выполнена в рамках госбюджетных научно-исследовательских работ согласно с координационными планами Министерства образования и науки Украины (№ гос. регистрации 0104U004039 приказ № 746 от 7.11.2003 г., № гос. регистрации 0110U006160, № гос. регистрации 0113U000611 приказ № 1193 от 25.10.2012 г., № гос. регистрации 0113U003979,

№ гос. регистрации 0114U002537 приказ № 1611 от 22.11.2013 г., № гос. регистрации 0115U003125 приказ № 1243 от 31.10.2014 г.), при выполнении которых автор был исполнителем, а также в рамках хоздоговорных научно-исследовательских работ с ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск) (№ гос. регистрации 0108U005803, 0113U004776) при выполнении которых автор был ответственным исполнителем.

Цель и задачи исследования. Повышение технико-экономических параметров процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в металлической оболочке на основе развития научных основ процессов деформации порошковых материалов совместно с мономатериалами, а также разработки рекомендаций по совершенствованию и автоматизированному проектированию технологических режимов работы и конструктивных параметров механического оборудования прокатных и волочильных станов.

Для достижения указанной цели в работе поставлены и решены следующие основные задачи:

- уточнить исходные предпосылки и граничные условия очага деформации при реализации различных технологических схем процессов производства порошковых лент и проволоки в металлической оболочке;
- разработать численные математические модели напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых лент и волочения порошковой проволоки в металлической оболочке;
- разработать численные математические модели основных показателей качества порошковых лент и проволоки на каждом из этапов промышленного производства;
- проанализировать влияние, выбрать критерии и разработать программные средства по автоматизированному проектированию различных технологий и оборудования для производства порошковых лент и проволоки;

– разработать и апробировать новые технические решения, а также рекомендации по совершенствованию действующих технологий и оборудования, обеспечивающих повышение технико-экономических показателей процесса производства композиционных материалов, включающих порошковые составляющие.

Объект исследования. Процессы и оборудование для производства длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке.

Предмет исследования. Основные закономерности и методы расчета механизма формирования напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества при производстве длинномерных металлопорошковых изделий в металлической оболочке.

Методы исследования. В основу теоретических исследований были положены методы теории упругости и пластичности, включающих инженерные и численные подходы, методы конечных разностей и конечных элементов, а также методы теории исследования операций, в том числе решение задач оптимизационного плана и имитационного моделирования. Экспериментальные методы включали в себя физическое моделирование и натурные исследования в лабораторных условиях, методы тензометрии, измерения геометрических параметров и механических свойств, методы математической статистики, а также экспертные оценки.

Научная новизна полученных результатов. Среди основных положений и разработок, представленных в диссертации, новыми для науки и практики являются следующие:

1 Впервые для процессов производства длинномерных металлопорошковых изделий установлено влияние формы, толщины и механических свойств материала оболочки на параметры очага деформации и показатели качества готовой металлопродукции.

2 Впервые для процесса прокатки металлопорошковых материалов в открытой и закрытой оболочке установлены закономерности формирования плотности порошка и энергосиловых параметров в зависимости от формы и

материала металлической оболочки на основе определения зон ее прогиба и прилегания и, соответственно, толщины порошкового слоя на входе в очаг деформации, что позволило повысить точность расчета технологических режимов процесса.

3 Впервые для процесса прокатки двухслойных металлпорошковых материалов в оболочке установлены зависимости плотности слоев порошка и силовых характеристик от параметров металлической оболочки и величины обжатия слоев порошка, что позволило определить технологические режимы прокатки с учетом потребных параметров порошковой ленты.

4 Впервые для процесса плющения порошковой проволоки в оболочке установлена закономерность формирования геометрии ленты, плотности сердечника и величин энергосиловых параметров в зависимости от толщины и материала оболочки, что позволило повысить точность размеров порошковой ленты и обеспечить заданную плотность порошка.

5 Уточнен для процесса волочения порошковой проволоки в оболочке механизм формирования показателей качества продукции и обеспечения стабильности процесса в зависимости от величины обжатия проволоки и натяжений оболочки, что позволило снизить количество переходов за счет максимальных разовых обжатий.

6 Уточнено условие пластичности порошковых материалов для случаев плоского и осесимметричного напряженного состояния, что позволило повысить достоверность математических моделей процессов прокатки и волочения порошков за счет приближения к реальным взаимосвязям между напряжениями, деформациями и плотностью пористых тел.

Практическая ценность полученных результатов. Практическую ценность представляют следующие результаты, полученные в диссертационной работе:

– комплекс математических моделей и программных средств автоматизированного расчета напряженно-деформированного состояния матери-

ала и энергосиловых характеристик при изготовлении длинномерных изделий из металлопорошков в оболочке, позволяющий выполнять автоматизированное проектирование технологических режимов, осуществлять выбор оптимальных исходных параметров заготовки и конструктивных параметров оборудования;

– методика и программные средства автоматизированного расчета основных показателей качества при производстве длинномерных изделий из металлопорошков в оболочке, позволяющие определять уровень допустимых отклонений исходной плотности порошка, начальных геометрических параметров заготовки, точности изготовления рабочего инструмента в зависимости от необходимой разнотолщинности конечного продукта и допустимого диапазона отклонения необходимой плотности сердечника;

– алгоритмы автоматизированного проектирования технологических режимов процессов изготовления порошковых материалов в металлической оболочке на основе использования разработанных математических моделей, позволяющих определять оптимальные режимы обжаты и осуществлять рациональный выбор исходной заготовки;

– усовершенствованная установка для экспериментального определения физико-механических свойств порошковых материалов, основанная на прессовании заготовки в закрытой матрице и определении взаимосвязи между нормальными, радиальными напряжениями и плотностью;

– новые способы и устройства для производства порошковых лент и проволоки, позволяющие улучшить технологические, качественные и эксплуатационные характеристики продукции, повысить производительность процесса и снизить количество оборудования необходимого для его реализации;

– практические рекомендации и научно обоснованные технические решения по выбору материала, формы и толщины оболочки, соотношения толщин двухслойной порошковой композиции, назначение режимов обжа-

тий, радиусов валков и коэффициента асимметрии для реализации процессов прокатки порошковых материалов в металлической оболочке, направленные на расширение сортамента и повышение уровня потребительских свойств металлопродукции при одновременном обеспечении экономии материальных ресурсов на стадиях как создания, так и освоения технологий и оборудования;

– практические рекомендации и научно обоснованные технические решения по выбору материала и толщины оболочки, назначение количества переходов и режимов обжаты, назначение уровня натяжений для реализации процессов волочения и плющения порошковой проволоки в металлической оболочке, направленные на расширение сортамента и повышение уровня потребительских свойств металлопродукции при одновременном обеспечении экономии материальных ресурсов на стадиях как создания, так и освоения технологий и оборудования прокатных и волочильных станов.

Результаты диссертационной работы в виде программных продуктов, технических решений и практических рекомендаций использованы на ПАО «Научно-исследовательский и проектно-технологический институт машиностроения» (г. Краматорск), ЧАО «Финпрофиль» (г. Харьков), ЧАО «Краматорский завод металлических конструкций», ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск) и в Донбасской государственной машиностроительной академии. Экономический эффект за счет снижения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технологических работ составил 2653 тыс. гривен.

Отдельные положения диссертации используются на кафедре «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» Донбасской государственной машиностроительной академии в рамках преподавания ряда специальных дисциплин, а также при выполнении научно-исследовательских работ, курсовых и дипломных проектов студентами специальностей 7,8.05050311 «Металлургическое оборудование».

Личный вклад соискателя. Все основные научные результаты автором получены самостоятельно. При проведении исследований, результаты которых опубликованы в соавторстве, автору принадлежит разработка математических моделей, алгоритмов и программных средств, участие в проведении экспериментов, анализ и обобщение результатов теоретических, а также экспериментальных исследований, разработка практических рекомендаций и участие во внедрении их в промышленное производство процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обговаривались на международных, всеукраинских и региональных научно-технических (НТК) и научно-практических (НПК) конференциях, в том числе: международных НТК (МНТК) по проблемам исследования и совершенствования технологий и оборудования обработки давлением 2002-2015 гг. (г. Краматорск, ДГМА); IX региональной НТК (г. Мариуполь, 2002); IX МНТК «Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів» (г. Запорожье, 2003); I МНТК «Машинобудування та металообробка–2003» (г. Кировоград, 2003); XI региональной НТК (г. Мариуполь, 2004); международной НПК (МНПК) «Интеллект молодых – производству 2005» (г. Краматорск, 2005); III, V МНТК «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (г. Краматорск, 2005, 2007); VIII НТК ПАТ «АМК» (г. Алчевск, 2007); I, II МНТК «Машини та пластична деформація металів» (г. Запорожье, 2007, 2012); международном научном семинаре «Научно-технический прогресс в металлургии» (г. Череповец, Россия, 2012); IX, X международных конференциях «Стратегия качества в промышленности и образовании» (г. Варна, Болгария, 2013, 2014); III МНТК «Азовмаш – 2013» (г. Мариуполь, 2013); I МНТК «Научно-технический прогресс в чёрной металлургии» (г. Череповец, Россия, 2013); I МНПК «Актуальные проблемы в машиностроении» (г. Новосибирск, Россия, 2014); VI МНТК «Ресурсозбереження та енергоефективність процесів та обладнання обробки тиском в ма-

шинобудуванні та металургії» (г. Харков, 2014); X МНТК «Пластична деформація металів» (г. Днепропетровск, 2014); VI МНТК «Теоретичні та практичні проблеми в обробці матеріалів тиском і якості фахової освіти» (г. Киев, 2015); на НТК профессорско-преподавательского состава ДДМА (г. Краматорск, 2002-2014); научных семинарах НТУУ «КПИ» (г. Киев) и Национальной металлургической академии Украины (г. Днепро), научном семинаре при специализированном совете Д 12.105.01 ДГМА (2016 г.).

Публикации. Материалы диссертационной работы опубликованы в 64 работах, в том числе 31 статья в специализированных изданиях, 7 – в зарубежных изданиях, из них 4 статьи в международных научных журналах включенных в базу данных Scopus. 7 статей опубликованы без соавторов. Также материалы опубликованы в 3 коллективных монографиях. Новые технические решения защищены 14 патентами Украины на полезную модель.

Представленные ниже результаты выполнены при содействии преподавателей и сотрудников факультета машиностроения Донбасской государственной машиностроительной академии, сотрудников научно-исследовательских институтов, инженерно-технических работников машиностроительных и металлургических предприятий, которым автор искренне признателен за неоценимую помощь в организации работ, а также за весьма полезные советы и замечания, высказанные на всех этапах совместных обсуждений, от постановки задач до получения и оценки результатов.

РАЗДЕЛ 1
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ, КОНСТРУКТИВНЫЕ
ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И МЕТОДЫ
РАСЧЕТА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ
МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ
(СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА)

**1.1 Виды, назначение и сортамент длинномерных
металлопорошковых изделий в оболочке**

Длинномерные металлопорошковые изделия в виде порошковых лент и проволоки нашли широкое применение в сварочном и сталеплавильном производстве. Отличительной особенностью данных изделий является возможность применения порошкового сердечника практически любого химического состава [1]. Использование порошковых лент и проволоки является одним из направлений механизации, автоматизации и повышения производительности труда при изготовлении различных металлических конструкций, а также при упрочнении и восстановлении изношенных деталей, узлов, агрегатов в металлургической, энергетической, горнодобывающей, дорожно-строительной и других областях промышленности.

Порошковые ленты отличаются конструкцией оболочки, особенностями плавления и массопереноса электродного материала. Их использование позволяет расширить диапазон наплавленного материала по химическому составу, повысить производительность наплавочных работ, расширить возможность использования частиц компонентов сердечника по их размерам.

Наибольшее применение порошковые ленты нашли при механизированной электродуговой наплавке. За счет высокого коэффициента заполнения, отдельного плавления оболочки и сердечника порошковые ленты позволяют наплавлять высоколегированные и композиционные сплавы. При помощи порошковой ленты решаются те задачи легирования, которые трудно достижимы

для порошковой проволоки. Сравнительно небольшая ширина порошковой ленты позволяет более равномерно распределить сердечник по сечению, устраняет его высыпание, а необходимая ширина наплавленного слоя достигается поперечным перемещением электрода при наплавке [2...6].

В настоящее время находят широкое промышленное применение порошковые ленты различного сечения, выпускаемые по ГОСТ 26467-85, которые отличаются формой, конструктивными размерами, количеством замковых соединений, областью применения, производительностью плавления [7...21]. Для наплавки износостойких сплавов применяются в больших объемах порошковые ленты, которые имеют в сечении форму, близкую к прямоугольнику (рис. 1.1). Порошковая лента имеет оболочку, состоящую из одной или двух металлических лент, заполненную порошковым наполнителем, в некоторых случаях в сердечник вводят легированную проволоку или ленту. Изготавливают порошковые ленты различных размеров: толщиной 2...4 мм, шириной 6...60 мм. Порошковые ленты малой ширины 6...12 мм имеют лучшее уплотнение сердечника в оболочке, большую жесткость, что упрощает их подачу в зону плавления через механизм наплавочного аппарата и стабильность плавления. В качестве оболочки используются, как правило, пластичные материалы в виде металлических лент толщиной от 0,1 до 1,0 мм.

Наиболее успешно порошковые ленты (рис. 1.2) используются при наплавке деталей засыпных аппаратов доменных печей [22...25] бесконусных загрузочных устройств [22; 26], пил углеразмольных мельниц [22; 26], биметаллических износостойких листов [24; 25], дорожно-строительной техники [27...29], ножей горячей резки металла [26], запорной арматуры тепловых и атомных электростанций [30; 31] и многих других деталей металлургической, горнодобывающей и энергетической промышленности.

Разработка большинства составов, организация промышленного производства и широкое внедрение – заслуга сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона. В разные годы существенный вклад в разработку составов и технологии наплавки порошковыми лентами также внесли специалисты таких организаций, как ЦНТИ

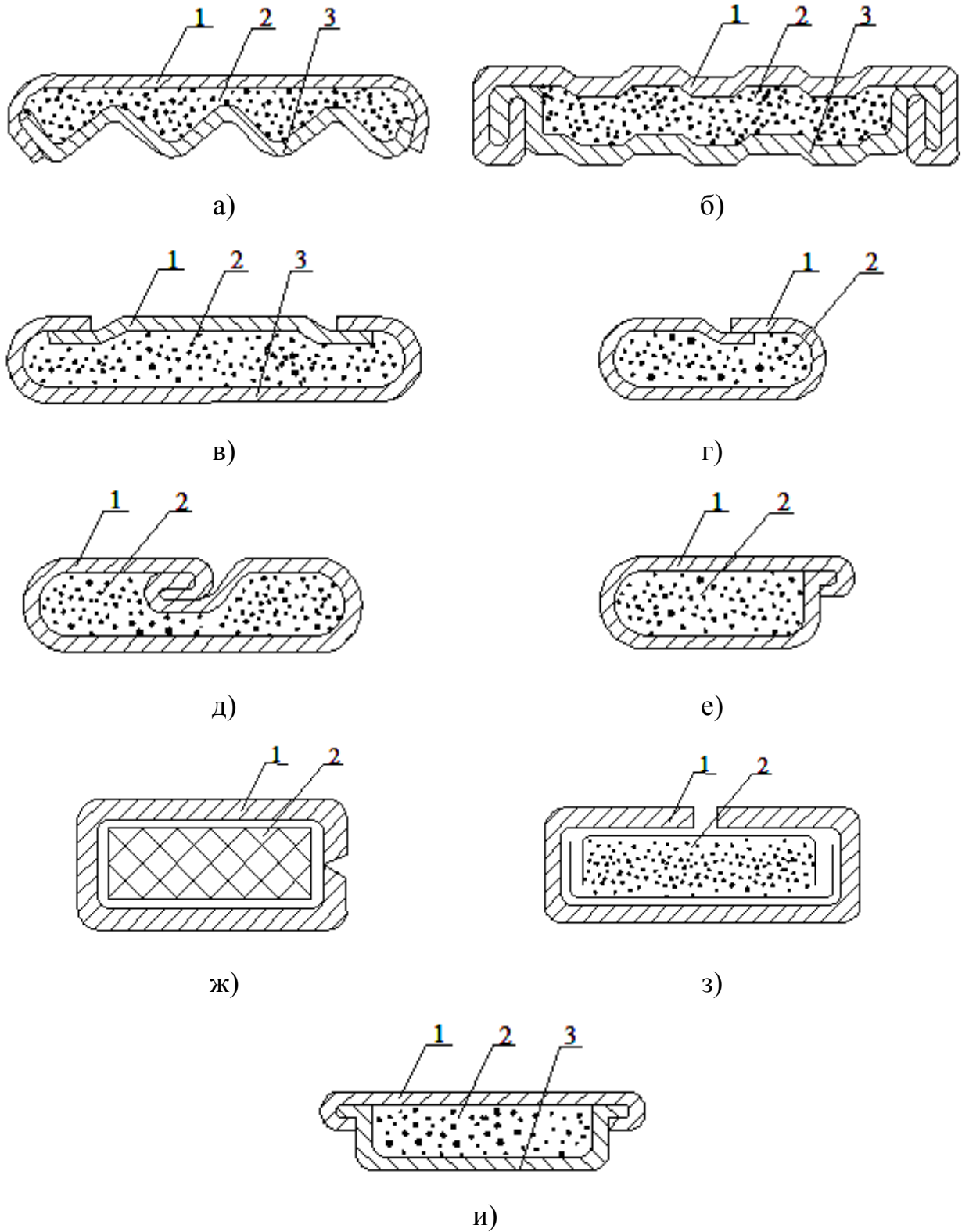


Рисунок 1.1 – Сечения порошковых электродных лент: 1 – верхняя часть оболочки; 2 – сердечник; 3 – нижняя часть оболочки

ВНИИСТ (г. Москва, РФ), [32; 33], НТУУ «Киевский политехнический институт» [20; 34...36], Приазовского государственного технического университета, ПАО «Азовмаш» (г. Мариуполь), [17; 37], ДГУ (г. Днепропетровск) и многие другие.

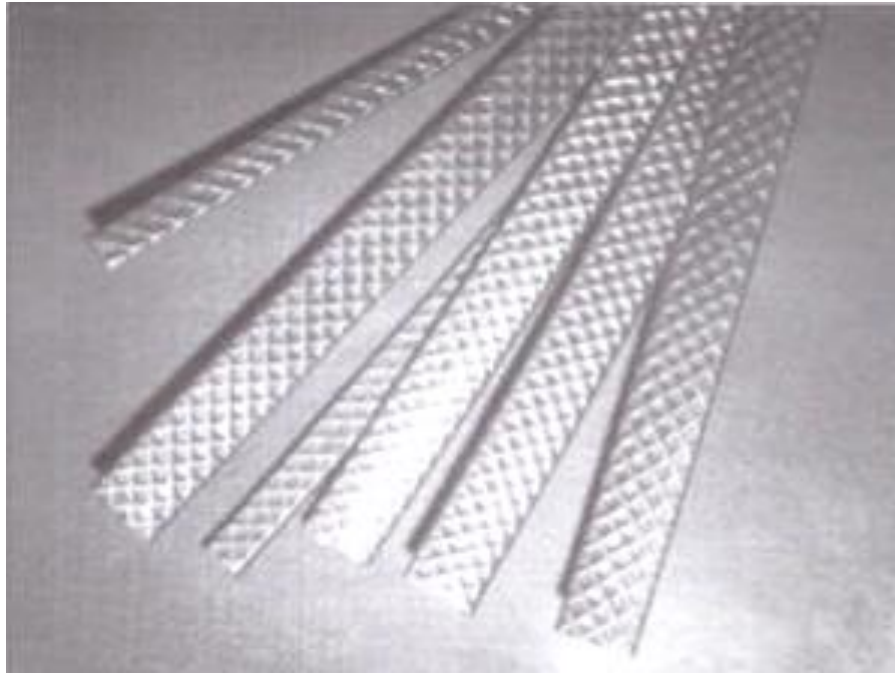


Рисунок 1.2 – Общий вид порошковой ленты

Применение порошковой проволоки на производстве и в строительстве явилось новым шагом в технике и технологии сварки. Ее применение позволило решить проблемы механизации сварочных и наплавочных работ на монтаже в открытых цехах и полевых условиях, повысить производительность процессов в 2...5 раз при высоком качестве металла швов и соединений, снизить трудоемкие и тяжелые ручные операции по очистке конструкций от брызг.

Порошковая проволока – это непрерывный электрод, состоящий из металлической оболочки и находящегося в ней порошкового сердечника [38...40].

Порошковые проволоки могут быть двух видов по способу применения и защиты от атмосферы – это порошковая газозащитная проволока и порошковая самозащитная проволока.

Сварочная порошковая проволока широко применяется при сооружении металлургических комплексов, корпусов реакторов атомных электростанций, крупных резервуаров, при изготовлении угольных комбайнов, тяжелых кранов, бульдозеров, скреперов, экскаваторов, трелевочных тракторов, практически всей номенклатуры сельскохозяйственной техники [39].

Технология изготовления легированной и высоколегированной проволоки сплошного сечения – дорогой и сложный процесс, под силу только крупным комбинатам и метизным заводам, так как технология волочения с малыми обжати-ями и многократными промежуточными отжигами связана с большими затратами средств и времени, этих недостатков лишена технология изготовления порошковой проволоки.

В самозащитных порошковых проволоках, при использовании которых не требуются флюсы или защитные газы, в шихту сердечника порошковой проволоки вводят также газо- и шлакообразующие компоненты, раскислители и элементы, обладающие большим химическим сродством к азоту. В этом случае наплавку можно вести без флюса и защитных газов [39].

Порошковые проволоки изготавливают согласно ГОСТ 26271-84. Чаще всего используются порошковые проволоки диаметром 3,6 мм для наплавки под флюсом и 2,0-3,0 мм для наплавки открытой дугой. Для наплавки под флюсом крупногабаритных деталей применяют проволоку диаметром 5,0-6,0 мм.

Оболочкой для большинства проволок, предназначенных для сварки и наплавки сталей, сплавов и чугуна, служит холоднокатаная лента толщиной 0,2...0,8 мм из низкоуглеродистой стали, имеющей высокую, необходимую для формирования и волочения проволоки пластичность. При изготовлении порошковых проволок для сварки и наплавки цветных металлов используют ленту из металла соответствующего состава.

Размеры ленты по толщине и ширине определяются технологией изготовления проволоки заданного диаметра. Лента поставляется в рулонах или кругах

с внутренним диаметром не менее 150 мм. Поверхность ее покрыта консервационной смазкой. Поступающая лента перед изготовлением проволоки очищается от масла и загрязнений.

Сердечником порошковой проволоки служит шихта. Компоненты шихты должны отвечать определенным требованиям по химическому составу и грануляции. Крупность частиц порошков, входящих в состав шихты, определяет сыпучесть последней и, как следствие, качество дозирования при заполнении проволоки.

Сердечник проволоки представляет собой смесь порошков минералов, руд, металлов, ферросплавов, других веществ, обеспечивающих стабильное и устойчивое ведение процесса сварки и получение сварных соединений с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

Компоненты сердечника по своему основному функциональному назначению подразделяют на газообразующие, шлакообразующие, стабилизирующие и легирующие материалы, раскислители и специальные добавки. Многие материалы выполняют в процессе сварки несколько функций.

По своему составу сердечники порошковых проволок могут относиться к пяти видам: рутил-органическому, карбонатно-флюоритному (основному), флюоритному, рутиловому и рутил-флюоритному [39; 40].

Часть материалов поставляется в виде порошков с гранулометрическим составом, близким к требуемому. Поэтому такие материалы перед изготовлением проволоки подвергаются лишь контрольному просеву и при необходимости—сушке. В виде порошка поставляются рутиловый концентрат, флюоритовый концентрат, крахмал, глинозем, железный порошок, натрий кремнефтористый и ряд других материалов.

При изготовлении порошковой проволоки не только определяют композицию ее сердечника, но и выбирают рациональную конструкцию сечения. Для наплавочных порошковых проволок преимущественно применяют простую конструкцию оболочки: трубчатую или трубчатую с нахлестом (рис. 1.3).

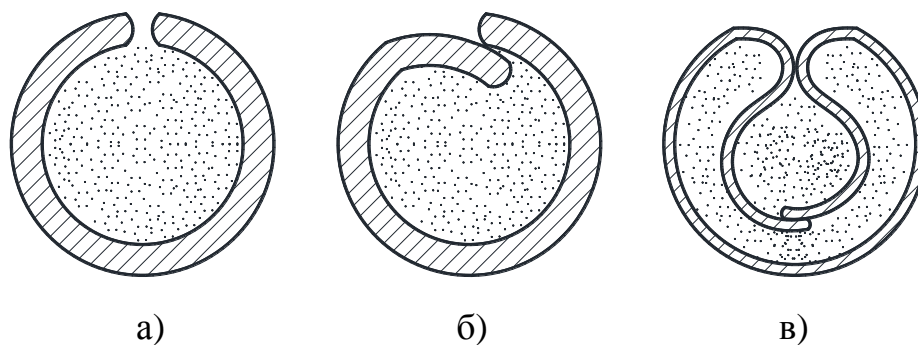


Рисунок 1.3 – Конструкции поперечных сечений порошковых проволок согласно ГОСТ 26101-84: а – трубчатая стыковая; б – трубчатая с нахлестом кромки; в – двухслойная

Порошковые проволоки в зависимости от основного назначения имеют отличающиеся системы классификации [39; 40].

Для сварочных порошковых проволок наиболее важны класс свариваемого металла, способ применяемой защиты, возможность использования для сварки в различных пространственных положениях, гарантируемые показатели механических свойств наплавленного металла. Наплавочные порошковые проволоки, прежде всего, классифицируют по химическому составу наплавленного металла, назначению наплавки.

Классификация сварочных и наплавочных порошковых проволок по таким показателям, как вид сердечника, производительность процесса, сварочно-технологические свойства, гигиенические характеристики, не производится. Требования к этим и некоторым другим показателям определяют в стандартах и технических условиях на проволоку [39].

Одним из основных показателей качества изготовления порошковой проволоки является величина и равномерность заполнения оболочки шихтой сердечника.

Значения коэффициента заполнения для сварочных порошковых проволок находятся в пределах 5...40%, наплавочных – 15...45%.

Порошковая проволока должна удовлетворять ряду технических требований, определяющих возможность и целесообразность ее промышленного применения. Общие технические требования для всех видов проволоки по сварочно-технологическим свойствам следующие: легкое возбуждение дуги и устойчивое горение; плавление проволоки без чрезмерного разбрызгивания электродного металла; хорошая растекаемость образующегося при сварке и наплавке шлака и легкое отделение его после охлаждения; хорошее формирование сварного шва или наплавленного валика без недопустимых дефектов; надежное и без затруднений перемещение подающими механизмами.

Поверхность проволоки должна быть гладкой, без вмятин, надрывов, без следов коррозии, масла и других загрязнений. Допускаются продольные риски и следы волоочильной смазки. Для снятия волоочильной смазки с поверхности порошковой проволоки чаще всего используют ее термообработку при температуре 150...250 °С в течение 2...4 ч. Недопустимо высыпание порошка-наполнителя из конца проволоки.

Порошковая проволока поставляется в свободных и формованных мотках или намотанной на стандартные катушки. Размеры мотков готовой проволоки ограничены по внутреннему и наружному диаметрам, масса мотка не должна превышать 80 кг; спутывание проволоки в мотке недопустимо. Каждый моток должен состоять из одного отрезка проволоки.

Мотки или катушки (для ряда проволок – обернутые в водонепроницаемую бумагу или помещенные в мешки из полиэтиленовой пленки) укладывают в металлические барабаны (бочки) со сварными или закатанными швами. Для предупреждения увлажнения сварочной порошковой проволоки в каждый барабан помещают силикагель в количестве 0,5—1% массы проволоки.

Наибольшее применение имеют проволоки для сварки углеродистых и низколегированных сталей. Порошковая проволока для сварки легированных сталей, чугуна, цветных металлов и сплавов выпускается в небольших количествах.

Классификация, сортамент и технические требования на порошковую проволоку для сварки углеродистых и низколегированных сталей с временным сопротивлением до 900 МПа регламентируются ГОСТ 26271-84.

Для заполнения проволоки применяется порошкообразная смесь из железного порошка и ферросплавов – ферромарганца, феррохрома, феррованадия, ферровольфрама, с небольшой добавкой графита. Соотношение составных частей в проволоке, например для наплавки стали марки ЗХ2В8, следующее: 65% стальной ленты, 15% железного порошка, 4% феррохрома, 13% ферровольфрама, 1% феррованадия, 2% ферромарганца и графита. Этому соответствует следующий состав шихты: 43% железного порошка, 12% феррохрома, 37% ферровольфрама, 3,3% феррованадия, 4,5% ферромарганца, остальное графит.

Наплавку порошковой проволокой производят под слоем флюса или в среде углекислого газа. Порошковая проволока внедряется также для сварки в нижнем положении в условиях сварочно-монтажных работ. Применение порошковой проволоки повышает производительность процесса сварки.

Для сварки стали Ст. 3 порошок имеет следующий химический состав: 0,18...0,2% углерода, 1,9...2,5% марганца, 0,9...1,0% кремния, остальное железо; для сварки теплоустойчивой стали 15ХМ берется порошок следующего состава: 0,12...0,14% углерода, 2...2,2% марганца, 0,9...1,1% кремния, 0,8...1% хрома, 0,45...0,5% молибдена, серы и фосфора не более 0,03% каждого, остальное железо.

Порошковая проволока для внепечной обработки металлического расплава представляет собой тонкостенную трубку значительной протяжённости, заполненную порошкообразным наполнителем [41]. Параметры проволоки регламентируются ДСТУ 7217:2011.

Материал наполнителя порошковой проволоки может быть самым разным. В зависимости от цели того или иного технологического процесса в качестве наполнителей используются силикокальций, кальций металлический, графит, кальций вместе с алюминием, магнийсодержащие лигатуры и другие самые раз-

личные материалы. Фракция порошка также может быть разной. Оболочка порошковой проволоки изготавливается из стальной ленты и имеет надежный замок.

Предназначена порошковая проволока для внепечной обработки сплавов: для легирования, модифицирования, раскисления, десульфурации.

В расплав порошковая проволока вводится с помощью специального устройства – трайб-аппарата. При помощи трайб-аппаратов порошковую проволоку с заданными скоростью и расходом материала вводят в металл при доводке металла на установках типа «ковш-печь». Такой способ ввода ограничивает тепловой поток на реагент в начале обработки, предотвращает его взаимодействие с расплавом в верхних слоях металла, способствуя плавлению реагента в нижних горизонтах жидкого металла, что увеличивает время контакта и позволяет более эффективно использовать элементы, имеющие низкие температуры плавления, кипения и малую растворимость в металле.

Порошковая проволока может использоваться практически в любых чугуно-сталеплавильных производствах, независимо от емкости сталеразливочных ковшей, для окончательной корректировки химического состава металла, его рафинирования от серы и неметаллических включений, а также изменения состава и формы модифицирования последних.

Металлическая оболочка при применении порошковой проволоки служит для обеспечения жесткости в момент пробивания шлака и защиты от окисления при прохождении шлакового слоя, регулирует глубину введения модификатора, а также защищает порошковую проволоку от реагентов во время хранения и транспортировки.

Применение в проволоке того или иного порошкового сердечника обусловлено конкретным производственным процессом.

Длинномерные металлопорошковые изделия в виде порошковых лент и проволоки регламентируются стандартами по конструктивному исполнению, типоразмерам, геометрическим характеристикам, коэффициентом заполнения и его распределением по длине заготовки.

1.2 Технологии изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке

Процесс изготовления порошковой ленты можно разделить на два основных этапа: подготовка смеси компонентов (сердечника и шихты) и формирование ленты прокаткой на стане (рис. 1.4, 1.5). Подготовка компонентов включает дробление, помол и рассев на фракции. Приготовление смеси компонентов предусматривает расчет оптимального состава, взвешивание и смешивание. Наиболее распространенные способы изготовления длинномерных металлопорошковых изделий – волочение (для порошковых проволок) и прокатка (для порошковых лент). Волочение обеспечивает высокую производительность процесса и точность изготовления порошковых электродов, позволяет изготавливать конструкции оболочки различной сложности, в широких пределах варьировать количество переделов [42; 43]. Указанные преимущества приводят к снижению себестоимости производства таких порошковых электродов [44]. Однако при волочении нельзя в составе шихты использовать частицы с размерами более диаметра волокна или близкие к этому параметру для предотвращения обрывов оболочки [45]. Ограничение размеров частиц снижает номенклатуру производства порошковых электродов. При волочении не всегда можно добиться требуемого уплотнения сердечника в оболочке. Особенно это характерно при содержании в сердечнике твердых частиц и частиц больших размеров, в сравнении с частицами других компонентов.

Изготовление порошковых лент с профилированием металлической оболочки путем прокатки через систему формирующих роликов и уплотнение сердечника при совместном обжатии с оболочкой в двухвалковой клети позволяет устранить некоторые недостатки, присущие процессу волочения. При прокатке в составе сердечника не ограничивается размер частиц компонентов. Размер частиц определяется глубиной профиля металлической ленты–оболочки порошкового электрода, причем уплотнение возможно обеспечить за один проход, не вызывая изменения толщины металла оболочки и его вытяжку. Изготавливать

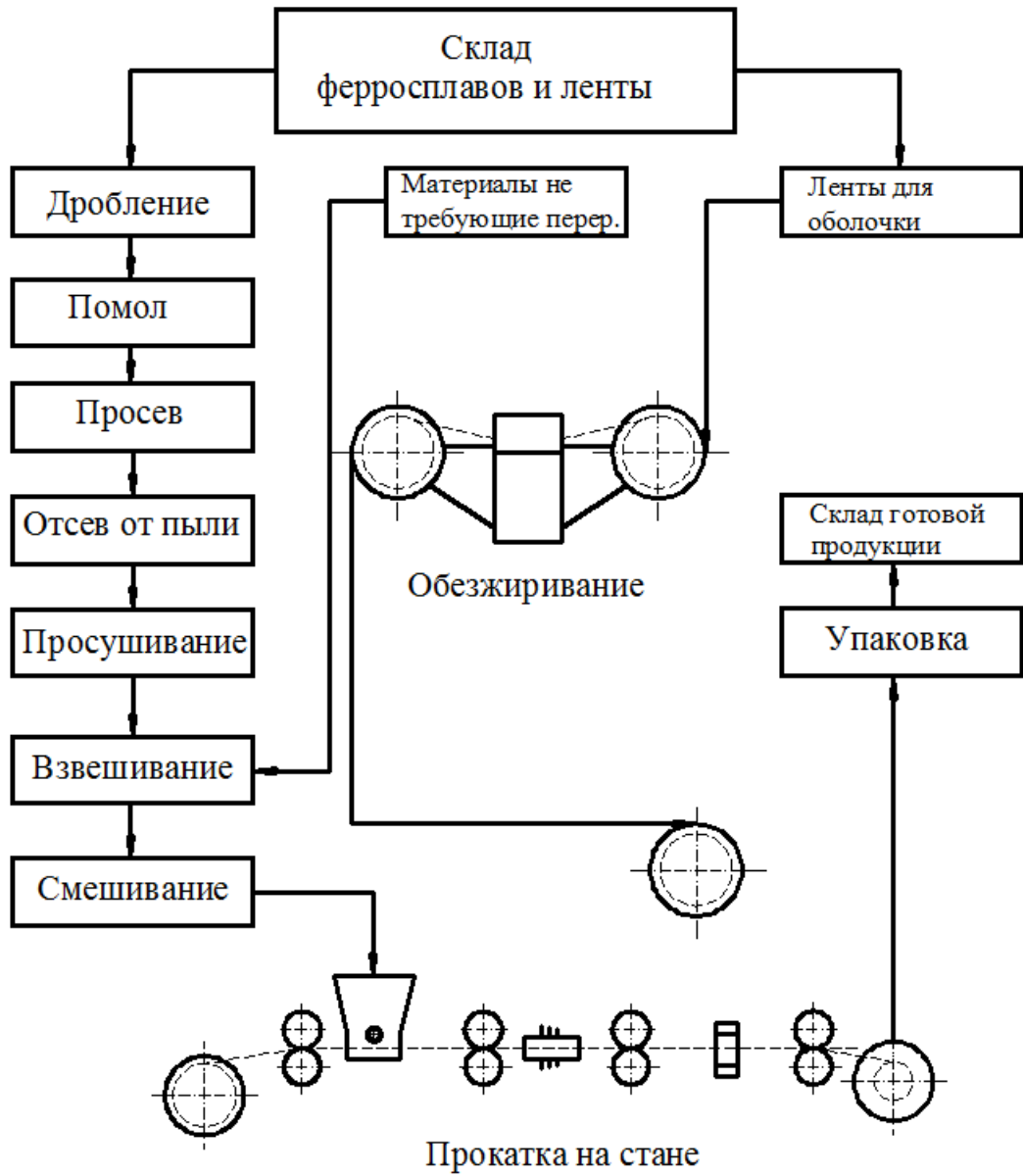


Рисунок 1.4 – Технологическая схема изготовления порошковых лент с шихтой из механической смеси компонентов

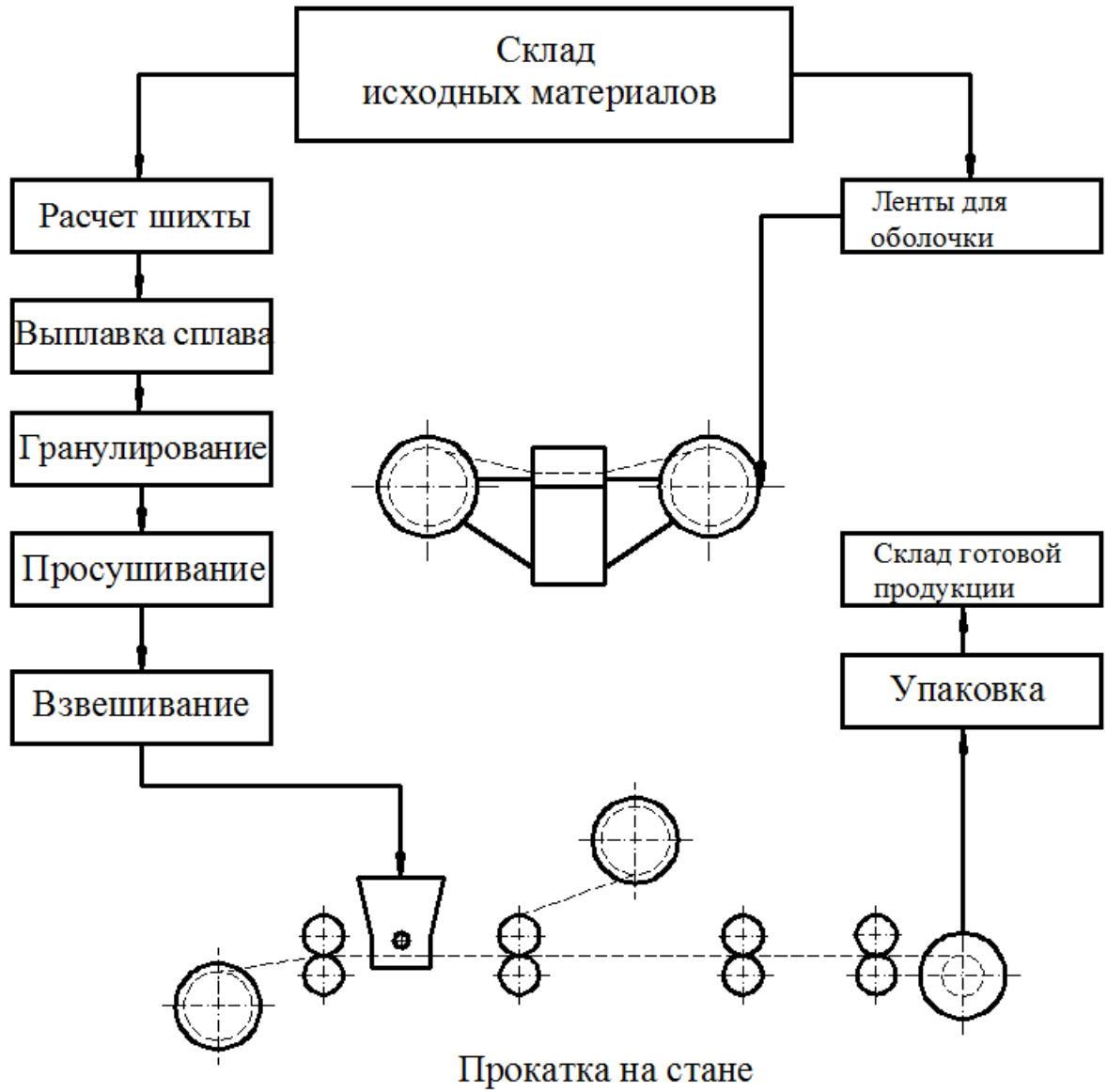


Рисунок 1.5 – Технологическая схема изготовления порошковых лент с шихтой из комплексного состава

можно порошковые электроды больших размеров в сравнении с порошковыми проволоками, достигать больших коэффициентов заполнения, а, следовательно, получать электродные материалы, обеспечивающие высокую производительность наплавочных процессов.

Технологически процессы прокатки металлических порошков классифицируются по трем признакам: направлению прокатки, технологическим схемам подачи порошка в рабочие валки и конфигурации формирующих инструментов [46].

По направлению различают горизонтальную, вертикальную, наклонную и радиусную прокатку [46]. При горизонтальной прокатке бункер с порошком устанавливают перед рабочими валками и порошок под действием собственного веса поступает в очаг деформации (рис. 1.6). Для улучшения условий захвата в ряде случаев применяют шнековую подачу (рис. 1.7). Необходимо учитывать, что горизонтальная прокатка, при прочих равных условиях, приводит к получению менее плотного проката по сравнению с вертикальной [47]. Кроме того, при горизонтальной прокатке отсутствует просыпание порошка в зазор между валками, а это позволяет вести прокатку порошков с высокой текучестью при низких скоростях.

При вертикальной прокатке оси валков расположены в одной горизонтальной плоскости (рис. 1.8) [46]. Равномерный, в основном, гравитационный задний подпор порошка на оба валка обеспечивает в этом случае более эффективные условия захвата и уплотнения порошка. Недостатком вертикальной прокатки является провисание выходящей из валков ленты или ее изгиб на приемном столе, что может приводить к обрыву и растрескиванию. Кроме того, при вертикальной прокатке порошков наблюдается его просыпание в зазор между валками, а также между валками и бункером, что уменьшает ширину ленты и скорость прокатки, приводит к повышенной запыленности рабочего места и потерям порошка.

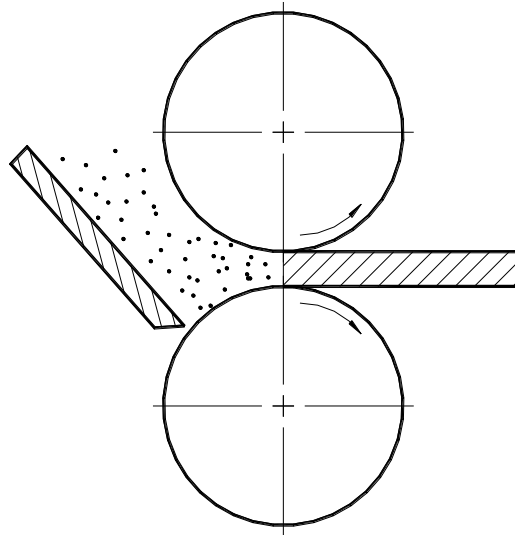


Рисунок 1.6 – Схема подачи порошка в валки при горизонтальной прокатке

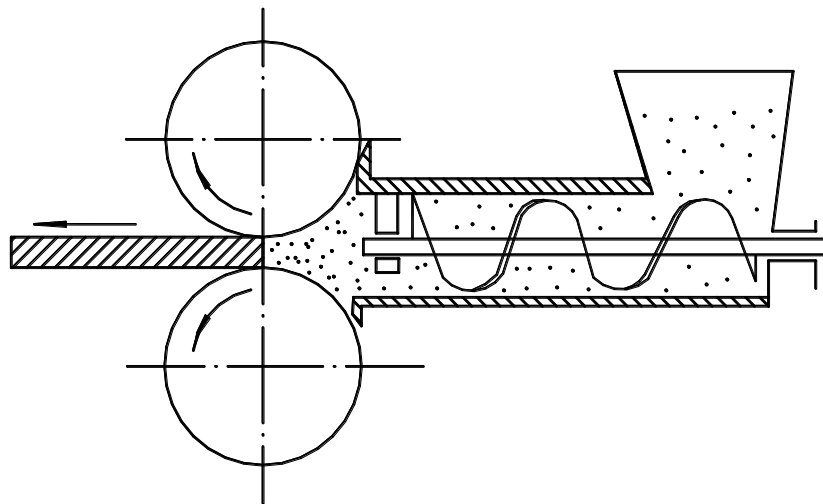


Рисунок 1.7 – Схема шнековой подачи порошка в зону прокатки при горизонтальной прокатке

Tomotoshi M. и Kazuhiro S. [48] предложен способ прокатки порошкового материала на металлической ленте, особенностью которого является расположение валков под определенным углом, который предотвращает просыпание порошка (рис. 1.9)

Существует ряд технологий, которые устраняют в той или иной мере вышеуказанные недостатки вертикальной прокатки порошков. Например, в работе [49] предложено двухстороннее армирование порошкового проката сеткой (рис. 1.10, а). Плотное прилегание сетки к рабочему валку предотвращает проникновение порошка под сетку и обеспечивает расположение сетки на поверхности проката. Сетка активизирует захват порошка, чем обеспечивается большая толщина проката. Возможным является также и одностороннее армирование ленты сеткой (см. рис. 1.10, б). Для уменьшения толщины подаваемого в рабочие валки порошка всего материала шиббер снабжен валиком, вращающимся за счет сил трения о перемещаемый нижним валком порошок.

Существует также совместная прокатка порошков и сетчатых армирующих элементов [50]. Технологическая схема такого процесса показана на рисунке 1.11. Данная схема прокатки позволяет получать композиционные материалы максимально возможной толщины для данного диаметра валков. Причем путем изменения зазора **a** (см. рис. 1.11) между шиббером и рабочей поверхностью валка можно регулировать величину подачи порошка в валки, толщину и плотность порошковой матрицы, соотношение объемов матрицы и армирующих элементов. Применение сетки интенсифицирует захват порошка валками вследствие создаваемого сеткой в порошке силового подпора. К тому же в результате изменения геометрии зоны деформации и увеличения продольного напряжения, действующего на порошок в верхней части зоны деформации, граничный угол подачи возрастает в 2 раза, а угол прокатки – в 1.5...2 раза. С целью армирования порошкового проката применяют плоские (тканевые) и объемные (вязаные) сетки. Причем объемные сетки представляются в ряде случаев более перспективными, поскольку обеспечивают сквозное по толщине армирование проката. Вве-

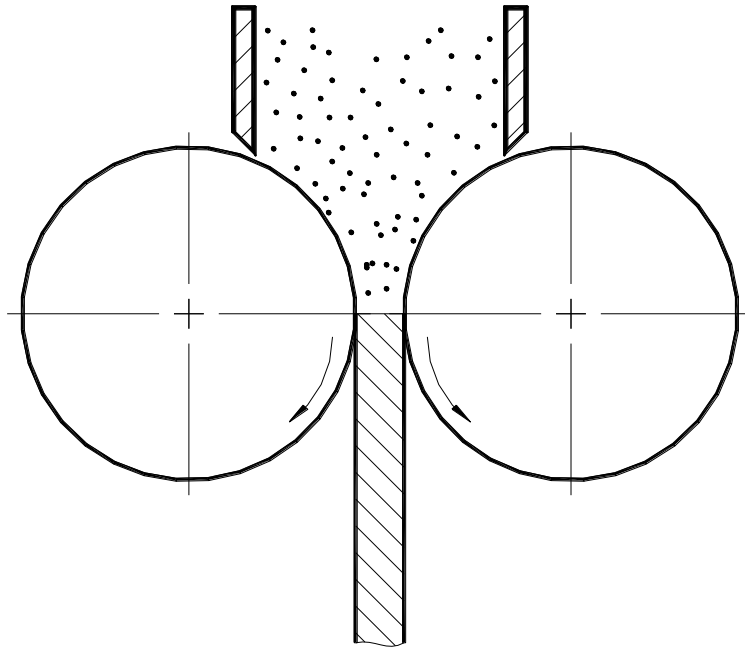


Рисунок 1.8 – Схема вертикальной прокатки порошковых материалов

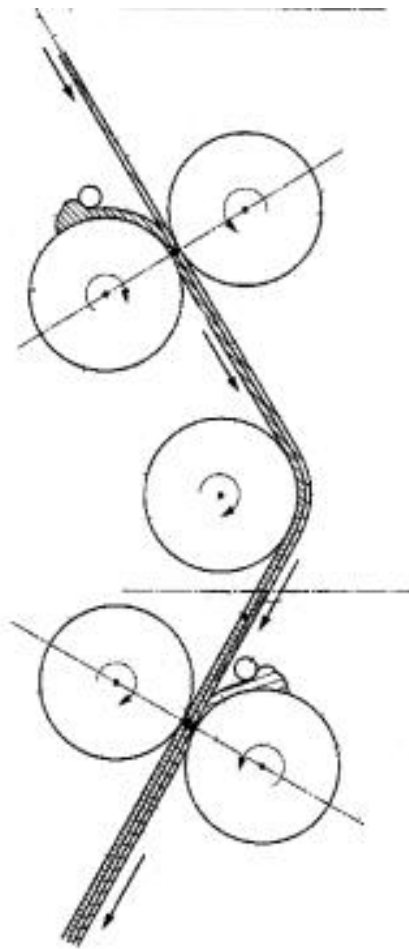


Рисунок 1.9 – Способ прокатки порошка в наклонно расположенных валках

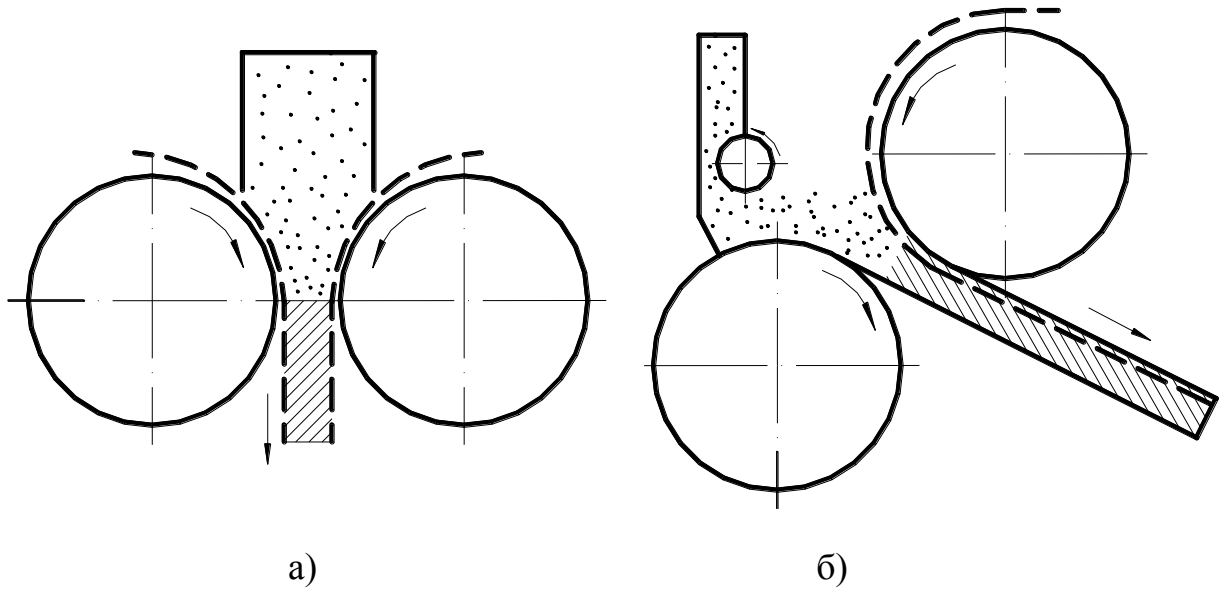


Рисунок 1.10 – Схемы прокатки порошка с двух (а) и односторонним (б) армированием сеткой

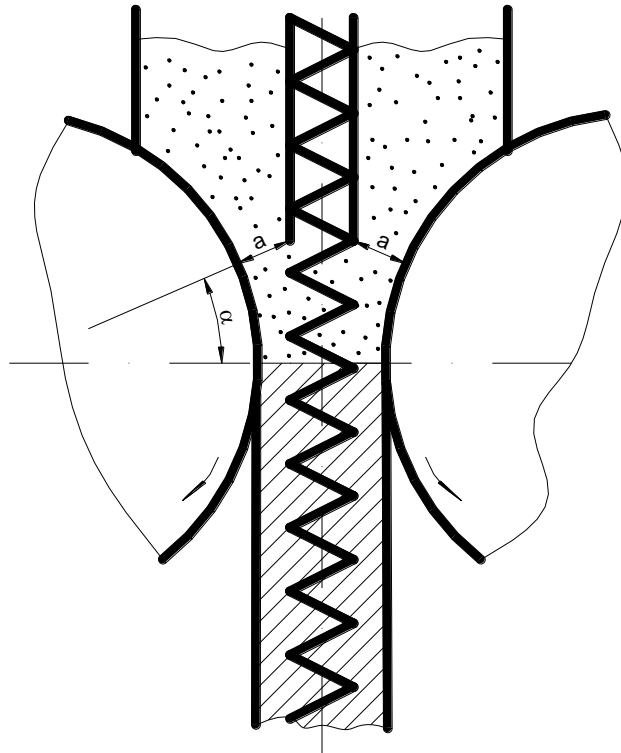


Рисунок 1.11 – Схема прокатки порошковых материалов, армированных сетками

дение в ленту сетчатых армирующих элементов позволяет значительно увеличить толщину проката без изменения диаметра валков и повысить его пористость (из-за уменьшения вытяжки проката и, как следствие, увеличения продольных сжимающих напряжений). Наличие сетки повышает также прочность высокопористых лент и улучшает их служебные характеристики.

Известна технология получения пористого материала, основанная на армировании порошкового слоя сеткой и их последующей прокатке [51]. По данной технологии перед армированием порошковый слой подвергают прокатке и спеканию, армирование осуществляют путем укладки в пакет спеченного слоя между слоями армирующей сетки, а прокатку – при температуре 1220...1260°C со скоростью 20...80 м/мин с обжатием 7...15% в атмосфере водорода.

Для получения полосы из металлического порошка разработана технология [52], заключающаяся в совмещении вертикальной и горизонтальной прокатки порошкового материала (рис. 1.12). По разработанной технологии порошок из бункера 1 подают в валки 2, в которых осуществляется первичная прокатка. Затем сырую ленту 3 подают в печь 4, где осуществляется спекание. После уже спеченную полосу обжимают в валках 5 и сматывают в рулоны на моталке 6. Как видно, в этой технологии для получения сырой полосы используется вертикальная прокатка, обеспечивающая максимальное уплотнение полосы, в то же время для прокатки спеченного порошкового материала, уже имеющего механические связи между частицами, используется горизонтальная прокатка, которая обладает рядом преимуществ по сравнению с вертикальной.

Для прокатки порошка в толстые полосы разработан способ (рис. 1.13), при котором со стороны выхода материала из валков к ним прижимается фильера [53]. Прокатываемый порошок заполняет сужающуюся полость фильеры, дополнительно уплотняется и выдавливается через прямоугольное отверстие в виде полосы, толщина которой значительно больше раствора рабочих валков. Для уменьшения сил при выдавливании порошка через фильеру в этом случае применяются пластификаторы.

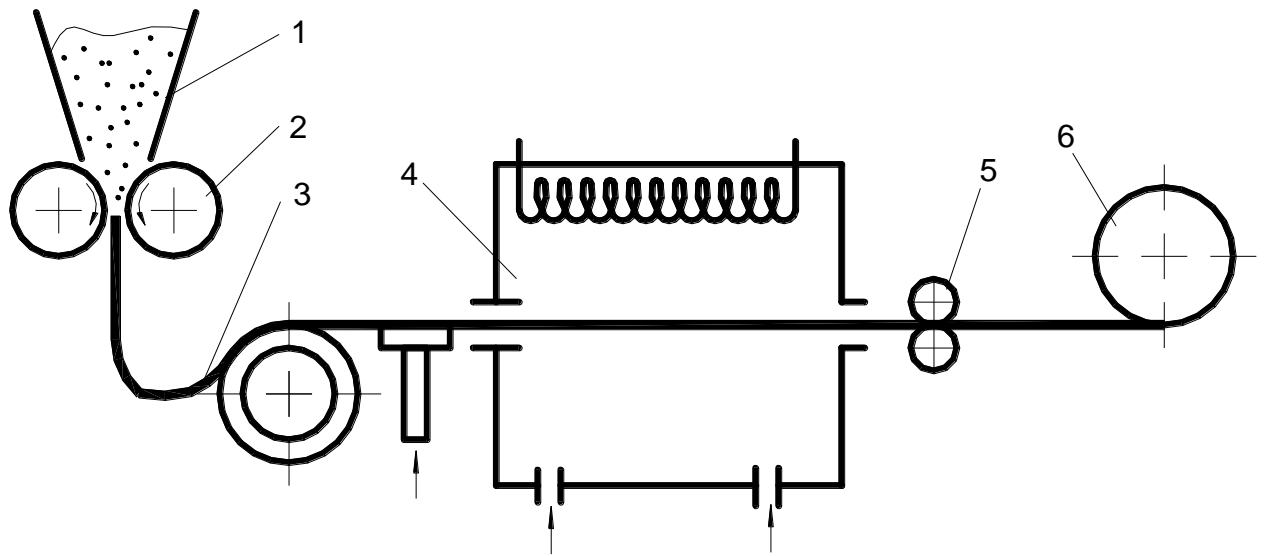


Рисунок 1.12 – Технология изготовления непрерывной полосы из металлических порошков

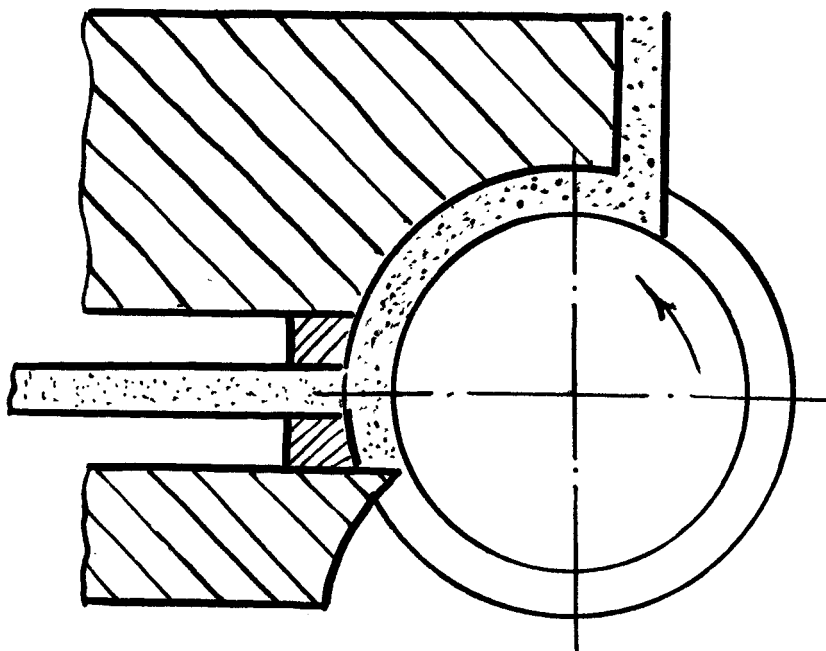


Рисунок 1.13 – Схемы устройств для прокатки порошковых материалов, совмещенной с процессом выдавливания

С целью интенсификации процесса схватывания прокатываемых гранул Корниловым В.Н. [54] был разработан метод прокатки–прессования, осуществляемый за счет активных сил трения. На первой стадии вышеуказанного технологического процесса гранулы подвергаются уплотнению и собственно прокатке. На второй стадии материал гранул распрессовывается в расширяющейся части калибра, а на третьей – экструдируется через калибрующее отверстие матрицы. Результаты теоретического и экспериментального исследований данного процесса показали, что с уменьшением высоты калибра увеличиваются проработка гранул и возрастает необходимая для экструдирования сила, создаваемая активными силами трения. Одновременно увеличивается деформация осадки гранул в очаге распрессовки, которая приводит к обновлению контактных площадок гранул, перпендикулярных направлению прессования. При последующем экструдировании обновлению контактной поверхности подвергаются площади гранул, параллельные направлению прессования. Таким образом достигается всестороннее обновление поверхности гранул. Интенсификация обновления поверхности влечет за собой увеличение прочности схватывания гранул, благодаря чему получаемые изделия имеют более высокий уровень механических свойств. Этому также способствует и благоприятная схема напряженно-деформируемого состояния, реализуемая при прокатке-прессовании в условиях действия активных сил трения.

Большое значение при прокатке порошка имеет способ его дозирования при подаче в рабочие валки. Выбор способа дозирования определяется сортаментом прокатываемых заготовок и технологическими параметрами порошковой композиции. В самом общем случае различают пассивное и активное дозирование, характеризующееся наличием самостоятельного привода [55]. К пассивному дозированию относится подача порошка из бункера-питателя. Активное дозирование производят роторным, конвейерным, шнековым и другими питателями сыпучих материалов.

Дозирование порошка из бункера-питателя применяется для порошка с хорошей текучестью и требует устройств, обеспечивающих непрерывный контроль за толщиной и плотностью проката. При этом следует учитывать, что при малых углах контакта порошка с валиками происходит его полное или частичное зависание между ограничивающими устройствами. Связность порошка ограничивает возможность уменьшения высоты пропускаемого шибером слоя материала, что, в свою очередь, приводит к ограничению сортамента готового проката. Если при регулировании подачи порошка шибер совершает колебательное движение, обеспечивающее попеременное увеличение и уменьшение величины зазора бункера, получаемый прокат имеет неравномерную по длине толщину.

Точное дозирование порошка достигается бункером, шибер которого имеет свободно вращающийся валик малого диаметра. Количество пропускаемого шибером порошка определяется зазором, если он превышает $\approx 20\%$ от диаметра валика. При меньших зазорах порошок прокатывается между роликом и валком с частичным уплотнением. При этом толщина и плотность слоя определяется технологическими параметрами порошка. Кроме того, при смещении валика в сторону вращения рабочего валка сила действия порошка на валик, а, следовательно, толщина и плотность дозируемого слоя увеличиваются. Для обеспечения постоянства условий захвата дозируемого слоя валками степень его уплотнения, а следовательно, и прочность должны быть такими, чтобы этот слой за счет собственной массы изгибался и прилегал к поверхности бочки транспортирующего его валка.

Активное дозирование применяют обычно для порошка, обладающего высокой связностью или при необходимости вынести бункер с порошком из зоны его уплотнения.

Рядом ученых разработаны различные технологические приёмы повышения эффективности процесса прокатки порошковых материалов. Tomotoshi M. [56] предложил для уменьшения продольной разнотолщинности оснастить рабо-

чую клеть толщиномером, который передает сигнал о текущей толщине получаемого листа на отсекатели, регулирующие количество подаваемого порошка из бункера (рис. 1.14).

Kenji S., Natsuki Y. и Tomotoshi M. [57] было предложено для более качественного плакирования полосы порошковым материалом перед прокаткой в валках на слой порошка наносить жидкость (рис. 1.15), что увеличивает адгезию между порошком и металлом.

В работе [58] предложено наносить жидкость на поверхность рабочих валков в непосредственной близости очага деформации, что увеличивает сцепление между частицами порошка и контактной поверхностью валков.

Atsushi S., Yoshiaki M. и Satoru T. [59] был предложен способ производства свинцовых полос из порошка свинца, отличительной особенностью которого является нанесение смазочного материала на поверхность валков и обрезка боковых кромок полос (рис. 1.16).

В работах [60; 61] предложено одновременно с прокаткой порошка проводить шлифование валков.

Osamu K. и Noboru M. [62, 63] для получения листов с улучшенными магнитными свойствами предложили технологию, которая заключается в следующем. Магнитный порошок прессуют и формуют в магнитном поле с помощью пресс-формы, после предварительное формованное тело вставляется в трубку из ковкого металла, затем оба конца трубки завариваются. Дана заготовка прокатывается за несколько проходов в магнитном поле до получения листа (рис. 1.17), оболочку затем удаляют.

Помимо производства монопорошковых листов и полос огромный интерес для промышленности имеет производство композиционных материалов на основе порошков. Применение данных композиций позволяет получать изделия с уникальными свойствами, сочетающие в себе как свойства различных порошков, так и свойства монометаллов. Широкое применение композиции данного вида нашли в производстве подшипников скольжения, различных фильтров, гидроцилиндров и др. [64].

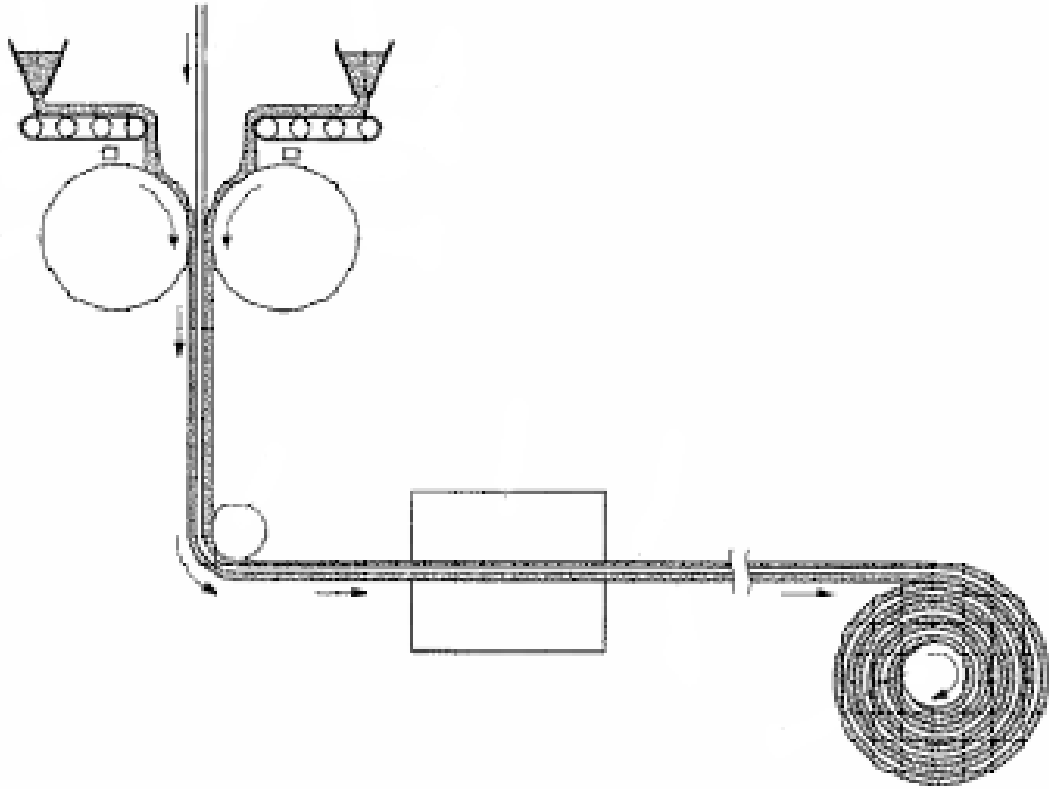


Рисунок 1.14 – Схема рабочей клетки, оснащенной толщиномерами

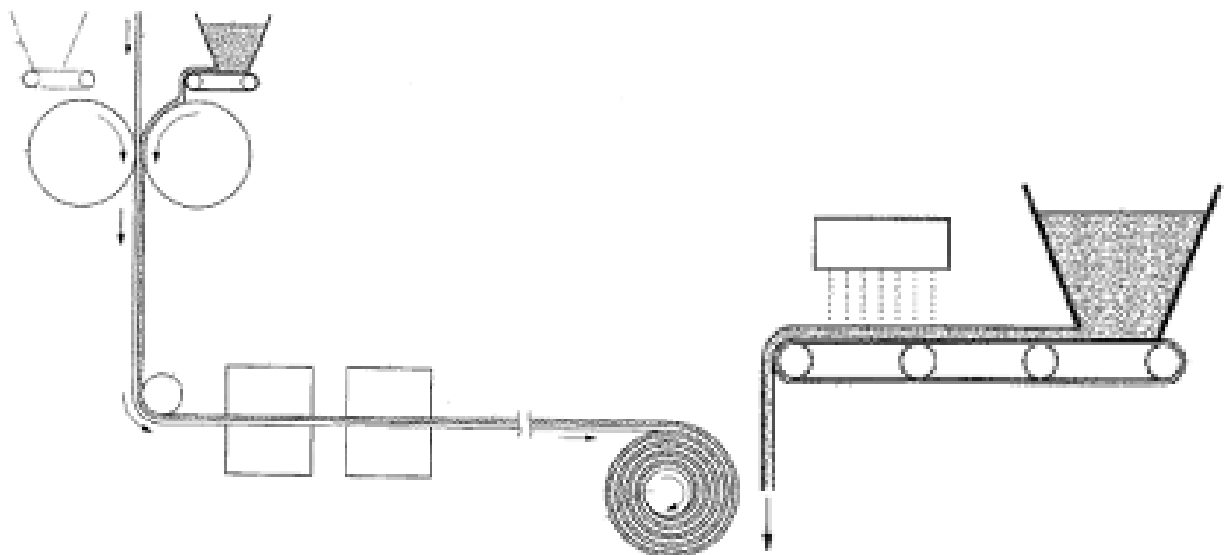


Рисунок 1.15 – Способ прокатки порошка с нанесением жидкости на поверхность

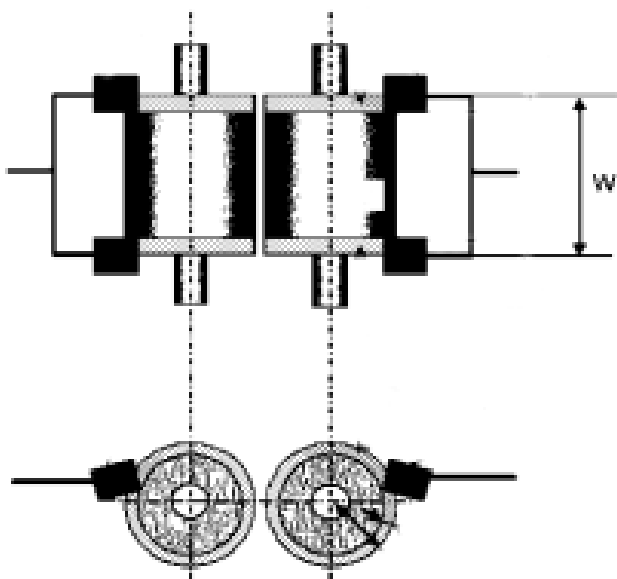


Рисунок 1.16 – Схема производства свинцовых полос

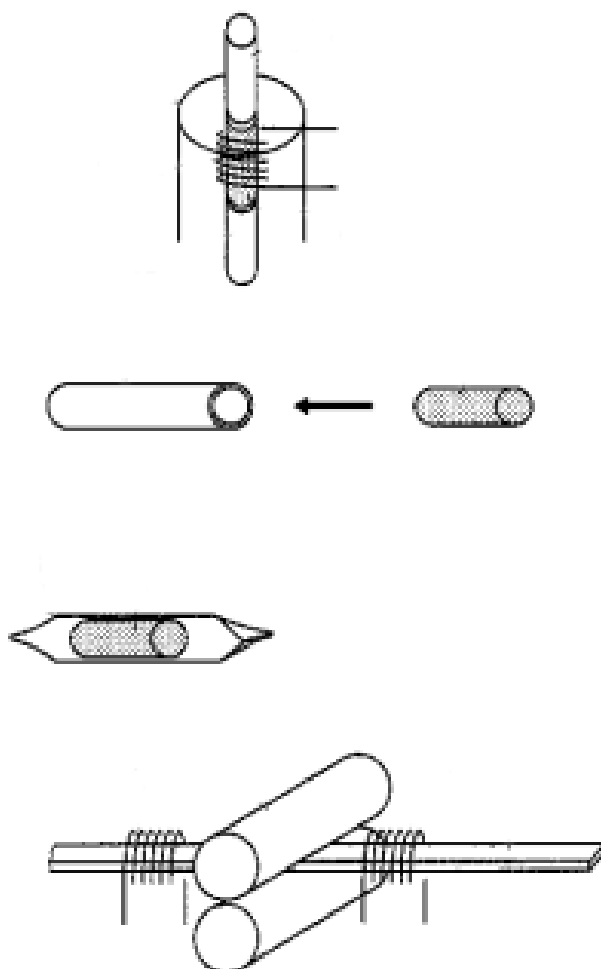


Рисунок 1.17 – Схема производства листов с магнитными свойствами

В настоящее время на основе порошковой технологии разработан и апробирован промышленно целый ряд различных конструктивных схем процесса прокатки многослойных полиметаллических листов и полос (рис. 1.18, 1.19) [46]. В частности, при вертикальной прокатке в бункере устанавливают параллельно осям перегородку шириной, равной ширине прокатываемой полосы. Перегородка доходит до зоны деформации и разделяет порошки разных композиций (см. рис. 1.18). Аналогичным способом можно получать и многослойные ленты. Для этого вместо одной перегородки в бункере устанавливают несколько. Вместе с тем, данный способ не позволяет получать прокат с равномерными по толщине слоями. Кроме того, получаемые по разработанной схеме (см. рис. 1.19) биметаллические листы и полосы имеют поперечную разнотолщинность, а, следовательно, и разноплотность в результате упругих деформаций рабочих валков.

В работе [65] авторами Y. Natsuki и Y. Junichi предложен способ нанесения двухслойного порошкового покрытия с использованием более твердого порошкового материала как связующего (рис. 1.20).

Теми же авторами в работе [66] предложен способ нанесения трехслойного порошкового покрытия (рис. 1.21).

Suo Hongli и др. [67] был предложен способ получения трехкомпонентных листов, содержащих слои из порошков никеля, хрома и вольфрама. Исходные листы получали прокаткой по схеме, представленной на рисунке 1.22, затем подвергали спеканию, горячей прокатке и полировке поверхности. Полученные листы обладают высокой прочностью.

Известна технология производства спеченного слоистого листа высокой плотности из алюминиевого порошка [68], которая заключается в том, что алюминиевый порошок подвергают прямой прокатке с образованием сырых листовых прессовок. Сцепление между частицами порошка в такой прессовке обеспечивает достаточную сырую прочность и равномерную плотность в направлении ширины листа. В процессе прокатки производится разрушение окисной пленки на поверхности отдельных частиц. Затем листовые прессовки укладывают одна

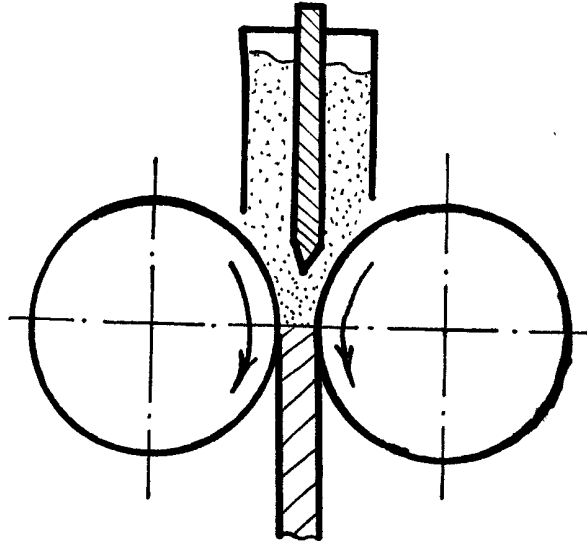


Рисунок 1.18 – Технологические схемы получения двухслойного проката из порошковых материалов

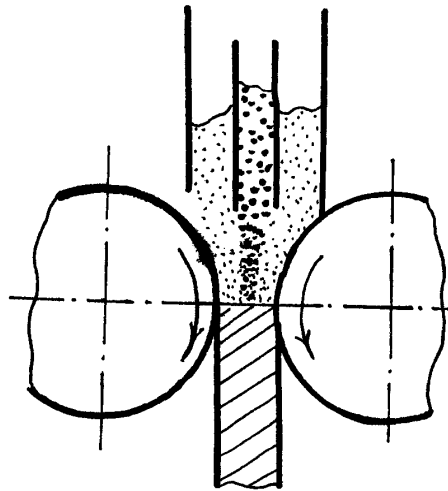


Рисунок 1.19 – Технологические схемы получения трехслойного проката из порошковых материалов

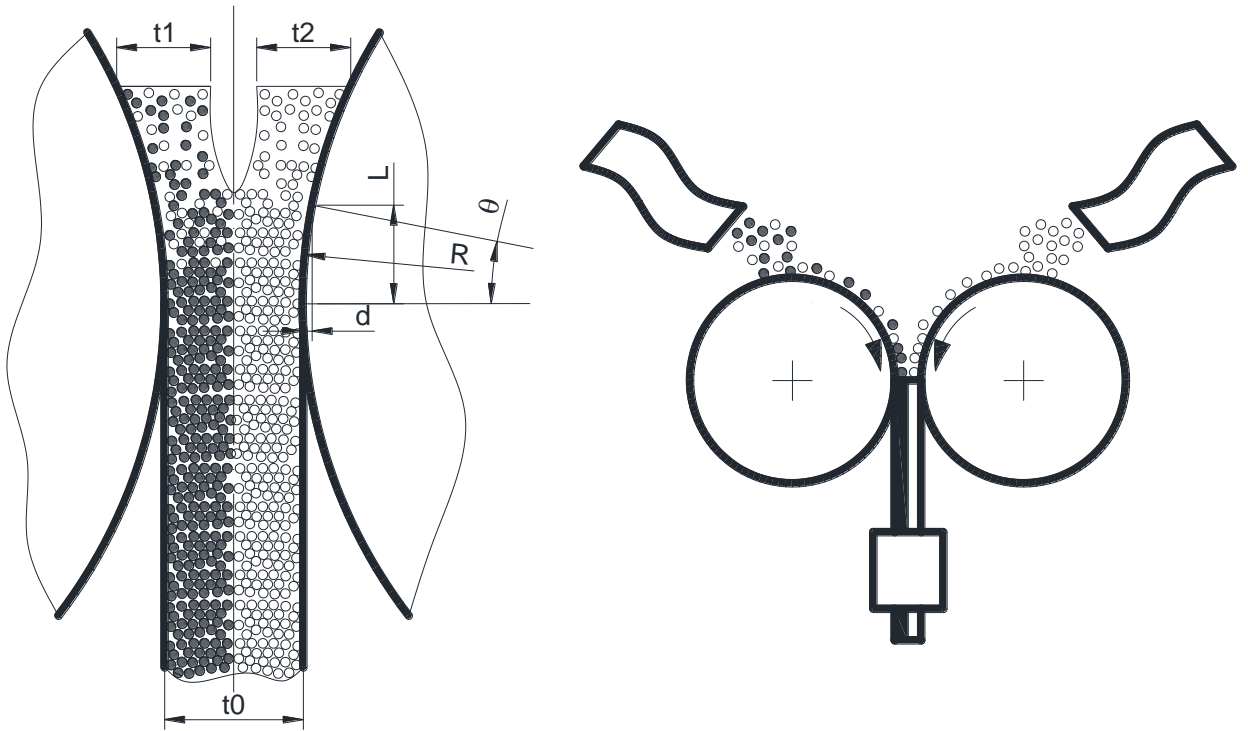


Рисунок 1.20 – Схема прокатки двухслойного порошкового материала

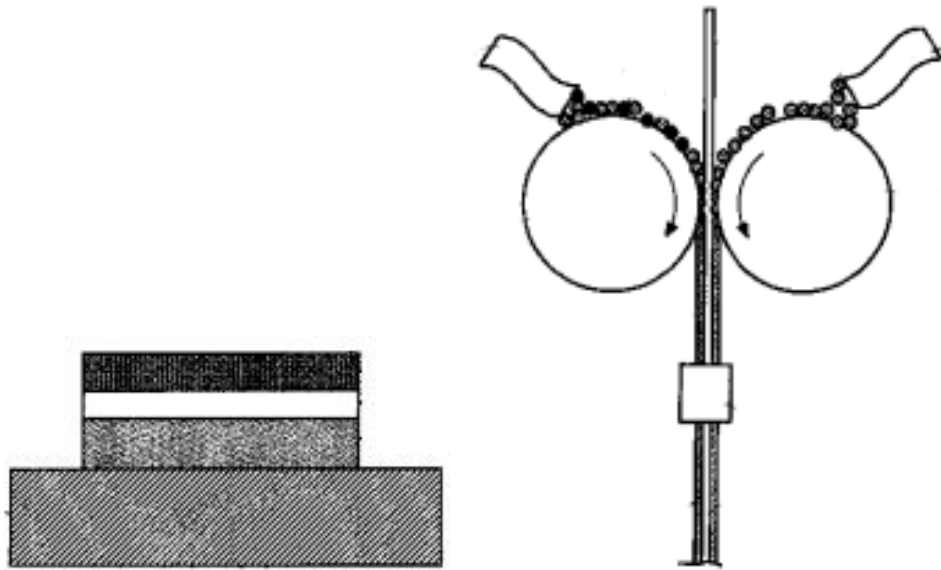


Рисунок 1.21 – Схема производства трехслойного порошкового проката

на другую в виде стопы, помещая между каждой смежной парой листов армирующие нити из неорганического материала. После этого полученные пакеты подвергают термообработке с температурой до 300...600°C и прокатывают с обжатием 25...50% в течение 3...10 мин. В результате получают слоистый листовой материал из спеченного алюминиевого порошка. Перед нагревом до 300°C его подвергают по меньшей мере однократной прокатке с обжатием 25...50% и последующему отпуску.

В работе [69] разработана технология получения лент с накатанным слоем порошкового материала путем предварительного припекания его к стальной подложке и последующим его уплотнением или путем горячей накатки порошка на стальную подложку. Недостатком этого способа получения биметаллов является низкая прочность срачивания слоев биметаллов в результате их неглубокой взаимной диффузии.

Rie S., Natsuki Y. и Tomotoshi M. [70...72] был предложен способ плакирования полосы слоем из серебряного порошка, который заключался в совместной прокатке порошка и металлической полосы, которые после деформации подвергают спеканию (рис. 1.23).

Особое место в получении композиционных материалов путем их прокатки занимает производство заготовок для подшипников скольжения. Так, разработан способ получения композиционных материалов с фрикционным слоем (рис. 1.24) [73], при котором на омедненную поверхность металлической ленты насыпают порошок медного сплава, не содержащий твердой смазки, подвергают спеканию и получают адгезионный слой, скрепленный с поверхностью ленты. На поверхность адгезионного слоя в состоянии после спекания насыпают порошок поверхностного слоя, содержащий твердую смазку. Затем подвергают прокатке и спеканию. Такая технология обеспечивает прочное сцепление рабочего слоя с подложкой. Кроме того, в работах [74; 75] предлагается способ, основанный на обжатии насыпанного на полосу порошка в печи между рабочими валами.

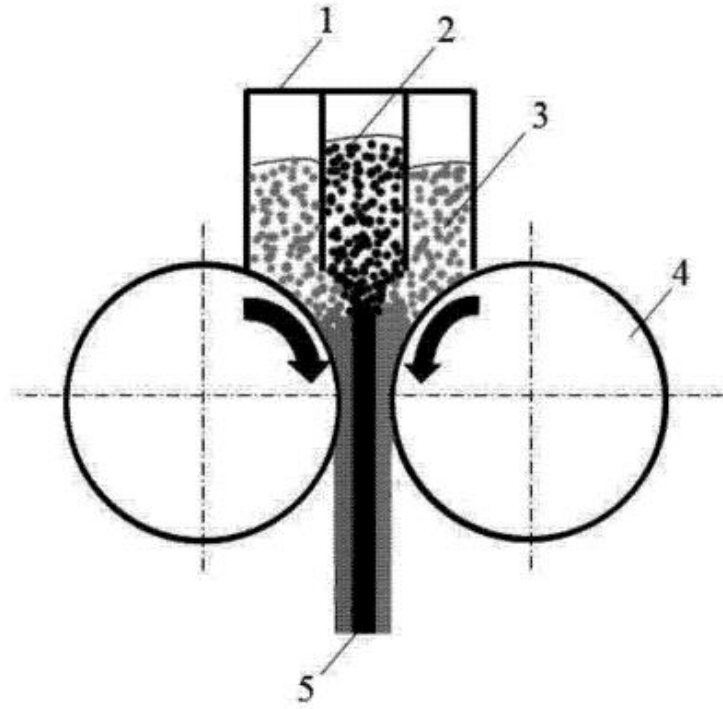


Рисунок 1.22 – Схема производства трехслойных листов

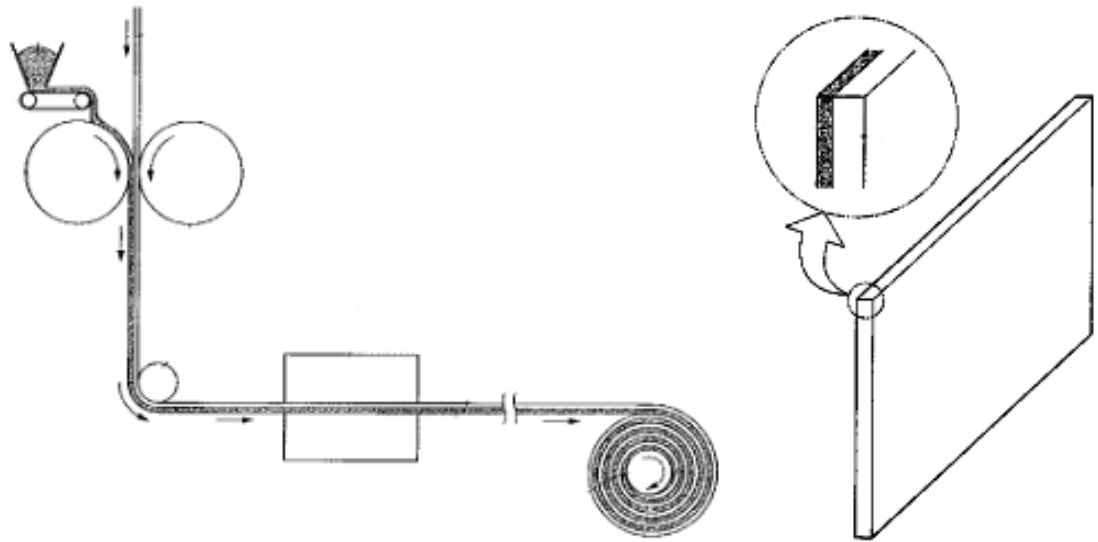
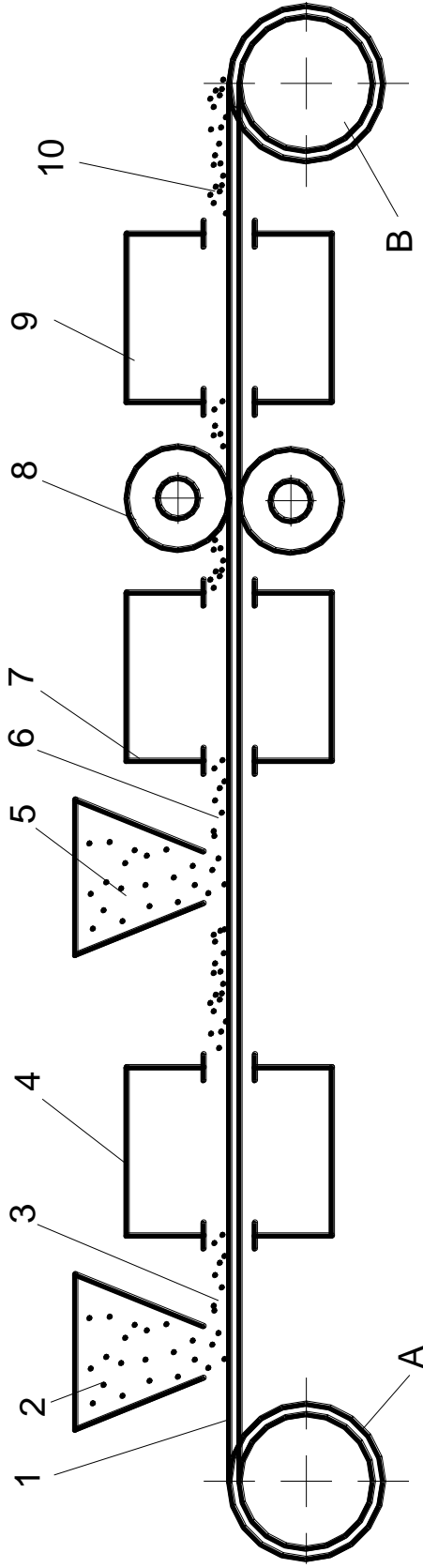


Рисунок 1.23 – Способ получения полосы с слоем серебряного порошка



А – размагыватель; 1 – металлическая лента; 2 – первый питатель; 3 – порошок медно-оловянного сплава с содержанием 10% олова; 4 – первая спекательная печь; 5 – второй питатель; 6 – порошок медно-оловянного сплава с 10% олова и 10% графита; 7 – вторая спекательная печь; 8 – прокатная клеть; 9 – третья спекательная печь; 10 – композиционный (четырёхслойный) подшипниковый материал; В – моталка

Рисунок 1.24 – Технология получения композиционных материалов с фрикционным слоем:

В работе [76] предложена технология производства полос из порошков меди и сплавов на её основе, которая заключается в рассеивании порошка на поверхности металлической полосы, последующем припекании, нанесении основного слоя порошкового материала на полосу и её первичной прокатки, первичном спекании, вторичной прокатке и вторичном спекании полученных полос. Данные полосы служат в качестве заготовок подшипников скольжения.

При реализации рассмотренных способов получения биметаллов существуют затруднения с осуществлением качественной холодной накатки порошка и созданием работоспособных конструкций для накатки порошка в горячем состоянии. Известен способ получения биметаллических пластин заданных размеров и формы, состоящих из порошкового слоя и подложки. В основу данного способа положена прокатка на плите, в которой выполнены пазы для размещения подложек [77].

Существует ряд упрощенных технологий, в которых отсутствует либо первичная, либо вторичная прокатка, но они применимы только лишь для определенных порошковых композиций. Так разработана технология производства вкладышей подшипников скольжения, которая заключается в нанесении на металлическую подложку черного слоя, например, спеченной оловянистой бронзы, а затем – слоя дисперсионного сплава, такого, как алюминий-свинец. Полученную заготовку нагревают, а затем прокатывают [78].

Известна также технология производства заготовок подшипников скольжения [79], заключающаяся в нанесении на поверхность стальной полосы порошкового алюминия, реагента, повышающего упрочнение алюминия, и твердой либо легкоплавкой металлической смазки для образования первого слоя с минимальным количеством добавок. Непосредственно за первым слоем предложено наносить второй слой, после чего пропускать полученную заготовку через прокатный стан, спрессовывая порошок с полосой. В результате такой холодной прокатки достигают относительную плотность порошкового слоя свыше 90%. Затем прокат подвергают спеканию.

Существует технологическая схема производства композиционного материала для подшипников скольжения [80] (рис. 1.25), охватывающая все стадии процесса. Суть её заключается в нанесении на стальную полосу 2 из бункера 3 порошка, спекания в печи 1 в защитной атмосфере (12% водорода, 10% углекислого газа, основа – азот), охлаждения в секции 4, прокатки в клети 5 и охлаждения в ванне с расплавленным свинцом.

Известен процесс прокатки порошка бронзографита на металлической ленте для получения заготовок полоза пантографа и подшипников скольжения [81]. В качестве исходного сырья в этом процессе используются следующие материалы: стальной лист, железный порошок, медный порошок, феррофосфор, графит, керосин технический. Первая стадия технологического процесса включает подготовку шихты для промежуточного монослоя и бронзографитового слоя. Для надежного соединения между стальным листом и промежуточным слоем производится обезжиривание стальных заготовок при температуре 1273°K в среде эндогаза. Нанесение промежуточного монослоя на обезжиренный лист осуществляется при помощи вибростата с последующим спеканием. Затем заготовки с припеченным промежуточным монослоем укладываются на стол прокатного стана, на монослой дозатором наносится слой шихты бронзографита, после чего производится прокатка. Спекание полученного биметалла производится при температурах 1253°K – 1393°K . После спекания биметалл транспортируется на участок окончательной калибровки, которая достигается вторичной прокаткой. Полученные таким образом подшипники скольжения имеют повышенные эксплуатационные характеристики благодаря сочетанию порошка бронзографита, который имеет повышенное содержания углерода, что приводит к пониженным коэффициентам трения по сравнению с медными сплавами, и стальной подложки, которая, во-первых, позволяет сэкономить остродефицитные цветные металлы и, во-вторых, воспринимает растягивающие напряжения, что позволяет подшипнику воспринимать большие нагрузки по сравнению с традиционными подшипниками скольжения из литой бронзы.

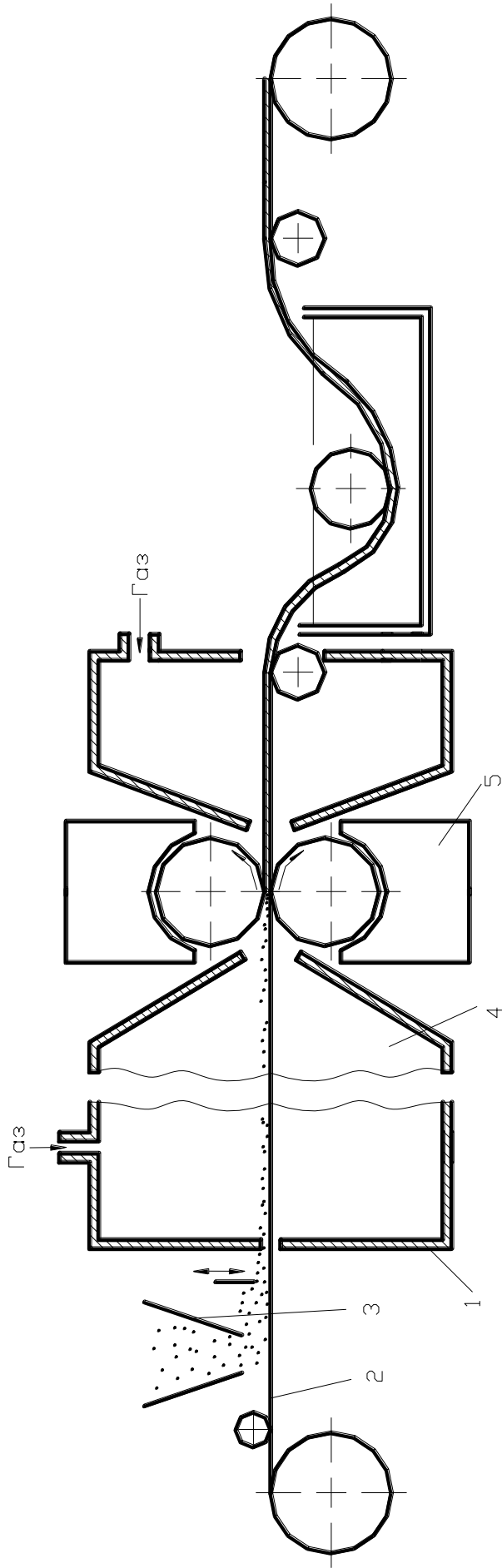


Рисунок 1.25 – Технологическая схема производства композиционного материала для подшипников скольжения

Технологические схемы производства порошковых лент в металлической оболочке включают следующие основные операции [1; 9; 12]:

- профилирование оболочки требуемой формы;
- введение компонентов в профилированную оболочку;
- обеспечение необходимого замкового соединения;
- уплотнение путем совместного обжатия оболочки и сердечника порошковой ленты.

Каждая из указанных операций требует выполнения соответствующих условий. При профилировании и уплотнении требуется определенная прочность металла оболочки. Прочность обеспечивается химическим составом металла, конструктивными размерами исходной ленты. На прочность также оказывает влияние сложность профиля оболочки. Выполнение этих требований частично возможно за счет выбора схемы прокатки, использования приводных профилирующих роликов или без привода.

Одним из этапов технологического процесса изготовления порошковых электродных лент является получение гнутых профилей на профилегибочных станах.

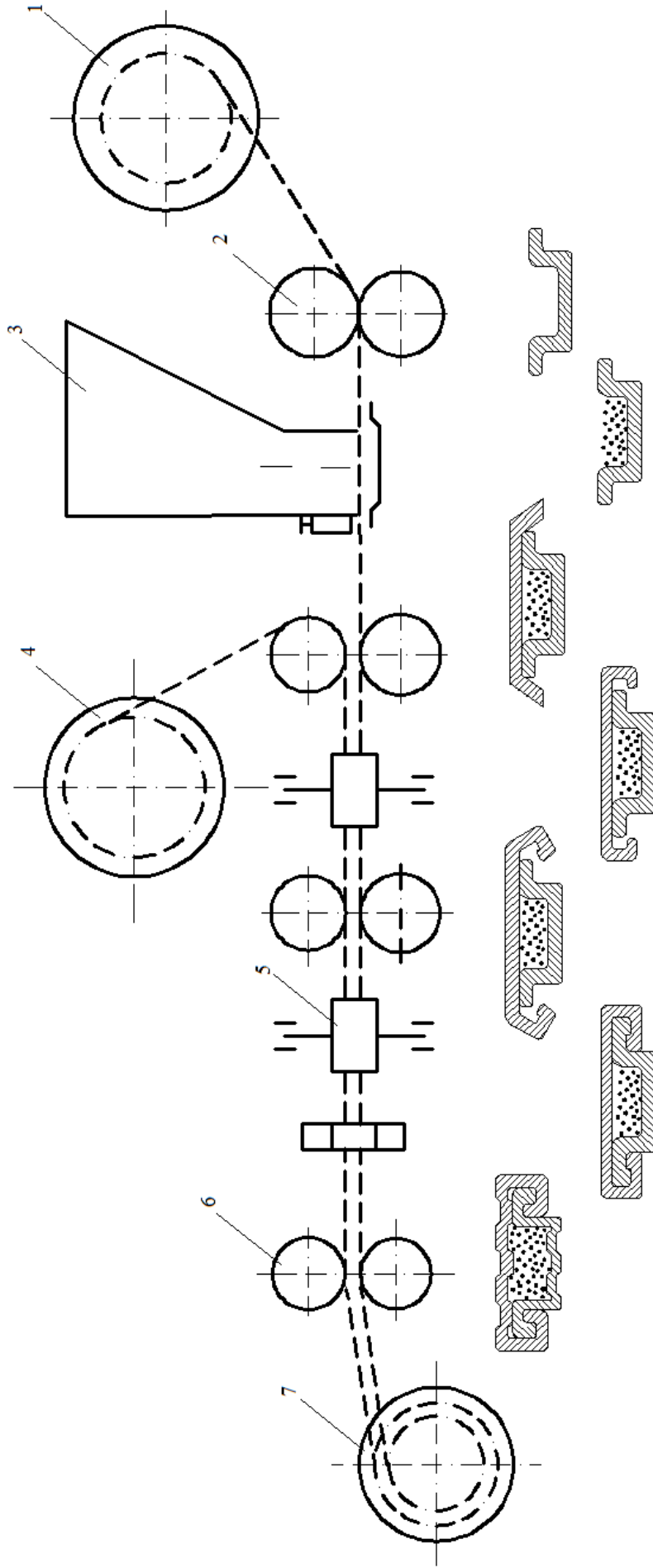
Процесс профилирования прокаткой на профилегибочных станах заключается в постепенном изменении формы сечения плоской заготовки до требуемого профиля. Деформирование полосы с изменением конфигурации ее поперечного сечения происходит без изменения толщины стенок получаемого профиля и с отсутствием вытяжки, то есть происходит только гибка ленты в поперечном сечении. Фасонные тонкостенные профили различной конфигурации большой длины получают методом профилирования ленты в холодном состоянии, что позволяет обрабатывать разнообразные материалы: мягкую сталь, цветные металлы и их сплавы, нержавеющую сталь.

Форма гнутых профилей может быть простой, сложной, закрытого типа, профили с наполнителями. Получение профиля с наполнителем требует введения операций засыпки, дозирования и уплотнения. Этот способ является основным процессом производства порошковых лент.

При выборе технологии производства порошковой ленты необходимо решать комплекс технологических вопросов: выбор конструкции оболочки, состава смеси, обеспечение требуемого коэффициента заполнения, равномерность засыпки компонентов в профиль оболочки и т.д. Все эти факторы, хоть и являются технологическими, но они определяют в конечном итоге сварочно-технологические свойства порошкового электрода, формирование металла шва.

Первая конструкция порошковой ленты была разработана в НИИТехМаше Челябинского совнархоза О. А. Бакши, Е. Ф. Белоусовым и Г. П. Клековкиным в 1959-1960 гг. [7; 82; 83] (см. рис. 1.1, а), состоящая из двух металлических лент 1 и 2 и сердечника 3. Нижняя часть оболочки 3 имеет ячейки, образуемые при профилировании в рабочей клетки стана, которые равномерно заполняются порошком 2, состоящем из смеси различных материалов и различных размеров частиц. Процессы изготовления ленты и наплавки в данном случае совмещены. Этот способ не обеспечивает надежность работы установки, увеличивает стоимость таких устройств и усложняет работу оператора. В дальнейшем порошковую электродную ленту стали изготавливать отдельно на специальном оборудовании. К недостаткам этой порошковой ленты следует отнести большую жесткость за счет наличия крупных ячеек, негерметичность замков, слабое уплотнение шихты сердечника и неравномерное распределение оболочки по ширине порошкового электрода. Чрезмерная жесткость порошкового электрода затрудняла намотку его в кассеты и подачу в зону дуги при наплавке. Негерметичность замков не позволяла длительно хранить порошковый электрод и приводила к высыпанию шихты сердечника при транспортировке, зарядке в кассеты и наплавке, что в итоге приводило к химической неоднородности наплавленного металла и снижению его износостойкости.

Изготовление порошковой ленты, разработанной в институте электро-сварки им. Е. О. Патона [9; 84; 85] (см. рис. 1.1, б), осуществляется на специальном станке, представленном на рисунке 1.26. На этом станке порошковая лента может изготавливаться отдельными секциями, которые затем соединяются между собой, образуя необходимую ширину электродного материала. Кроме



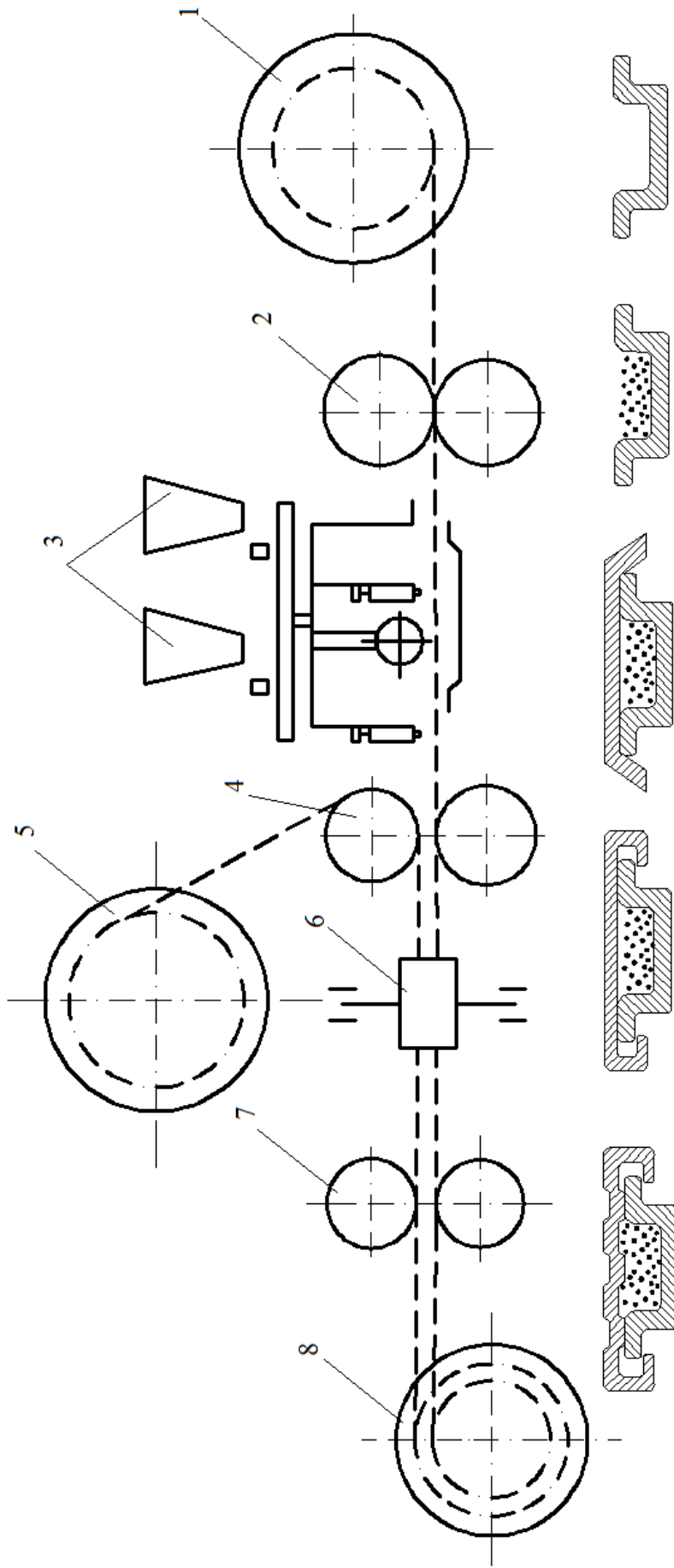
1, 4, 7 – кассеты; 2, 5 – профилирующие ролики; 3 – дозатор; 6 – уплотняющие валки

Рисунок 1.26 – Технологическая схема прокатки и профилирования порошковой электродной ленты на стане

этого, порошковая лента конструкции института электросварки им. Е.О. Патона обеспечивает более высокий коэффициент заполнения, так как гофрирование оболочки с целью уплотнения сердечника осуществляется после её заполнения компонентами. В конструкции порошковой электродной ленты НИИТехМаш ячейки образуются до засыпки компонентов в оболочку, что увеличивает количество перемычек в ячейках из металла и тем самым уменьшается количество сердечника.

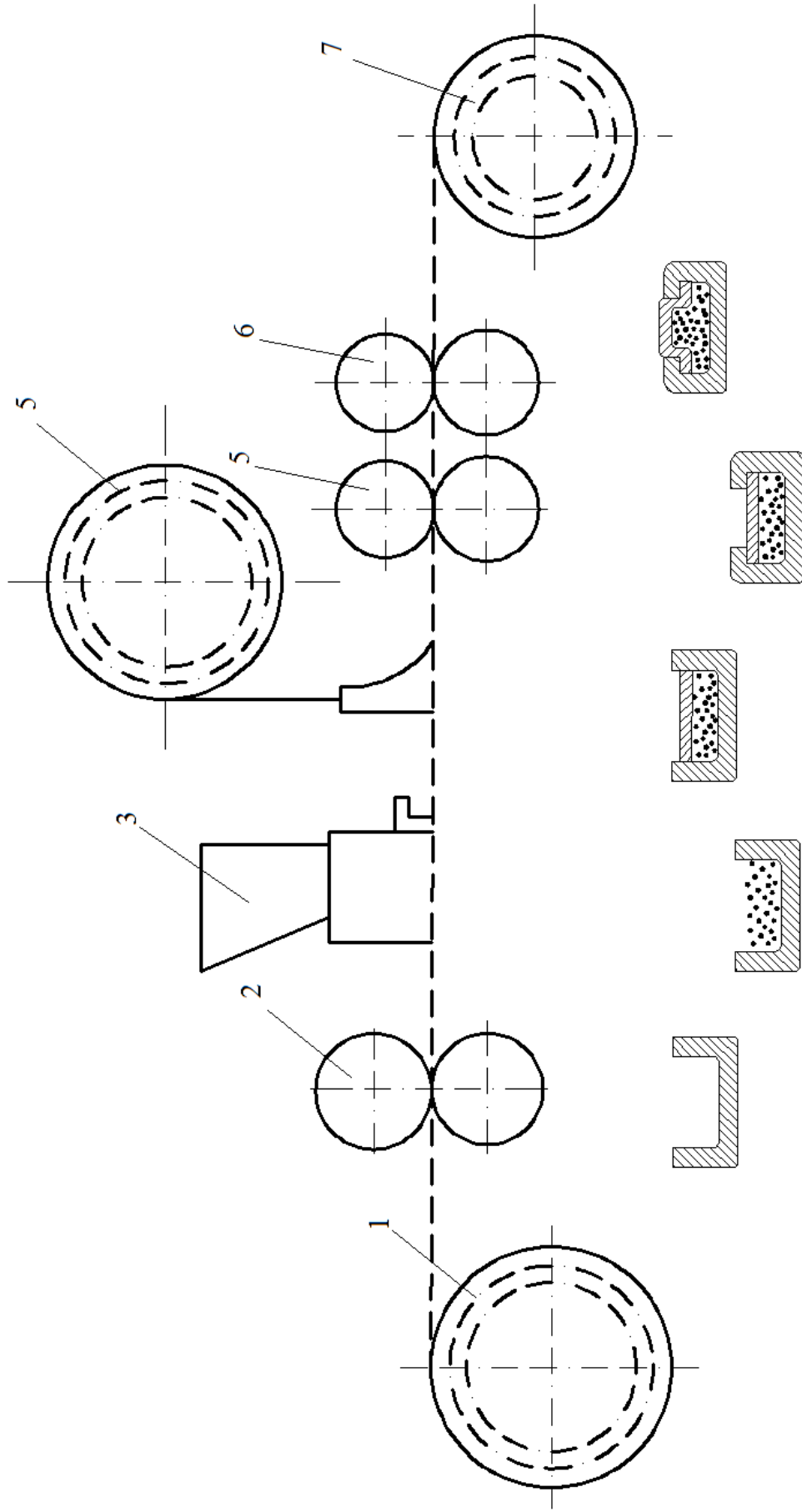
С учетом проведенных исследований и полученных результатов была усовершенствована технологическая схема и процесс изготовления порошковой ленты. Сокращено количество рабочих операций по формированию оболочки, применен дозатор с послышной подачей компонентов. При внесении компонентов слоями производится предварительное уплотнение каждого предыдущего слоя перед засыпкой последующего, что позволяет увеличить коэффициент заполнения порошковой ленты при тех же размерах и конструкции оболочки. Усовершенствованная технологическая схема прокатки и профилирования порошковой ленты на стане показана на рисунке 1.27.

Основным отличием порошковой ленты, показанной на рисунке 1.1, в, является нанесение поперечных рифлений на оболочку для уплотнения сердечника [86]. Таким образом, образуются отдельные секции между рифлениями. Поперечные гофры в этой конструкции придали гибкость порошковой ленте, что обеспечило простоту наматывания ее в кассеты. Верхняя часть оболочки входит во внутрь нижней оболочки и, таким образом, замковые соединения завальцовываются уплотняющими роликами сверху. Отсутствие прочного замкового соединения в оболочке и нанесение поперечных рифлений не обеспечивает достаточного уплотнения сердечника в промежутках между рифлениями. При плавлении порошковой ленты происходит просыпание сердечника отдельными частями, которые ограничены поперечными рифлениями. Технологическая схема прокатки порошковой ленты на стане и формообразования в профилировочных роликах показана на рисунке 1.28.



1, 5, 8 – кассеты; 2, 4, 6 – профилирующие ролики; 3 – бункер дозатора; 7 – уплотняющие валки

Рисунок 1.27 – Технологическая схема профилирования и прокатки порошковой электродной ленты на стане



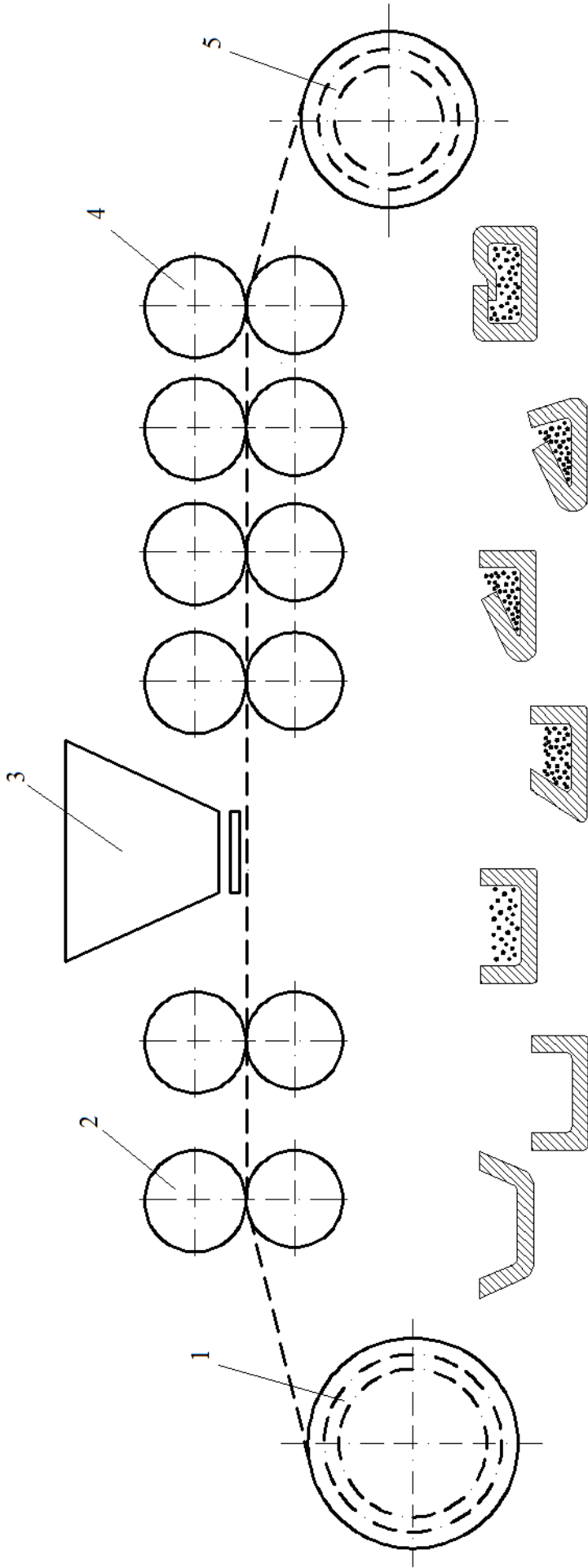
1, 4, 7 – кассеты; 2, 5 – профилирующие ролики; 3 – дозатор; 6 – уплотняющие валки

Рисунок 1.28 – Технологическая схема профилирования и прокатки порошковой электродной ленты на стане

Однозамковая порошковая лента с нахлесточным замком, изображенная на рисунке 1.1, г [8; 11], допускает большее абсолютное обжатие при прокатке в процессе её изготовления, что способствует лучшему уплотнению сердечника. Это приводит к улучшению условий плавления и массопереноса электродного металла при наплавке такой порошковой лентой.

При плавлении порошковых лент наблюдается самопроизвольное, нерегулируемое просыпание сердечника в сварочную ванну. Попадая в расплав сварочной ванны такие частицы сердечника охлаждают металл, диффузионные процессы снижаются, элементы не успевают равномерно распределиться по объему, что приведет к химической неоднородности в наплавленном слое. Просыпание сердечника из оболочки порошковой ленты при её плавлении является следствием недостаточного уплотнения в процессе совместного обжатия сердечника и оболочки при прокатке в двухвалковой клетки. Применение больших обжатий при изготовлении порошковой ленты ограничивается прочностью замкового соединения. Поэтому велись исследования по совершенствованию, разработке оптимальной формы и конструкции порошковой ленты. С ростом ширины порошковой ленты увеличивается вероятность появления химической неоднородности в наплавленном металле. Учитывая эти недостатки, следует отметить, что однозамковые конструкции оболочек позволяют за счет больших сил обжатия уплотнить сердечник и, таким образом, устранить некоторые отмеченные недостатки. При изготовлении однозамковой порошковой ленты увеличение силы обжатия приводит к снижению площади поперечного сечения электрода, его толщины и увеличению ширины [87]. Технологическая схема прокатки порошковой ленты с одним замковым соединением показана на рисунке 1.29.

В дальнейшем проводились работы по увеличению прочности замкового соединения. В ИЭС им. Е. О. Патона в 1981 г. была предложена конструкция порошковой ленты, у которой оболочка имеет плотное замковое соединение в центре (рисунок 1.1, д). Такая конструкция оболочки порошковой ленты позволяет обеспечить надежную герметичность и уплотнение сердечника [22; 88]. Замена плоского нахлестанного замка на плотный позволила хорошо уплотнить



1, 5 – кассеты; 2 – уплотняющие валки; 3 – дозатор; 4 – профилирующие ролики

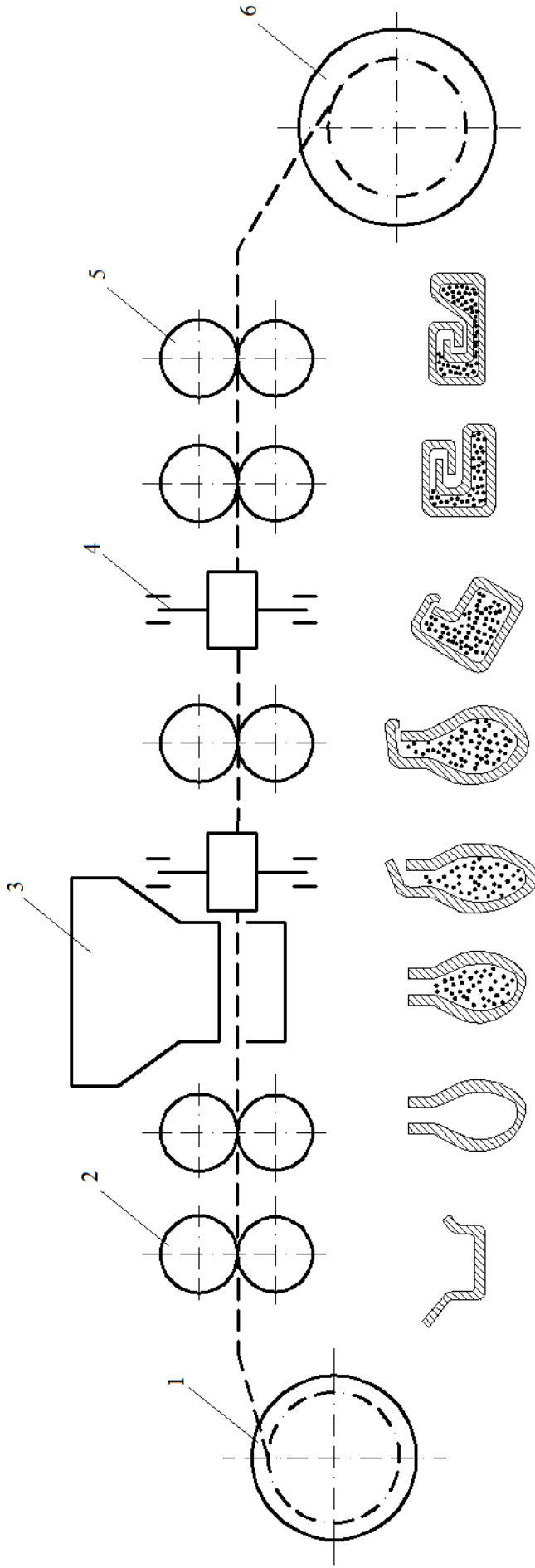
Рисунок 1.29 – Технологическая схема профилирования и прокатки порошковой электродной ленты на стане

сердечник порошковой ленты прокаткой в валках с одновременным нанесением на оболочку небольших впадин глубиной до 0,6 мм и размером 2...4x2...4 мм ромбической или квадратной формы, расположенных большими диагоналями вдоль ленты. Благодаря уплотнению воздух из сердечника порошковой ленты был удален и устранено пересыпание шихтового материала сердечника. Небольшие углубления на оболочке практически не ухудшили токоподвод к оболочке порошковой ленты при наплавке. Плотный замок располагается в средней части порошковой ленты по ее сечению, поэтому при наплавке в зоне замка плотность тока на единицу сечения порошковой ленты будет большей, чем на крайних ее участках. Это способствовало более стабильному горению дуги, улучшению переноса металла через дугу, равномерному плавлению сердечника, более высокой химической однородности наплавленного металла и его износостойкости. Технологическая схема профилирования и изготовления порошковой ленты на стане представлена на рисунке 1.30.

Серийное производство порошковых лент данной конструкции в промышленных масштабах с участием сотрудников ИЭС им. Е. О. Патона было освоено на ПО «Днепрометиз» и НПО «Тулачермет».

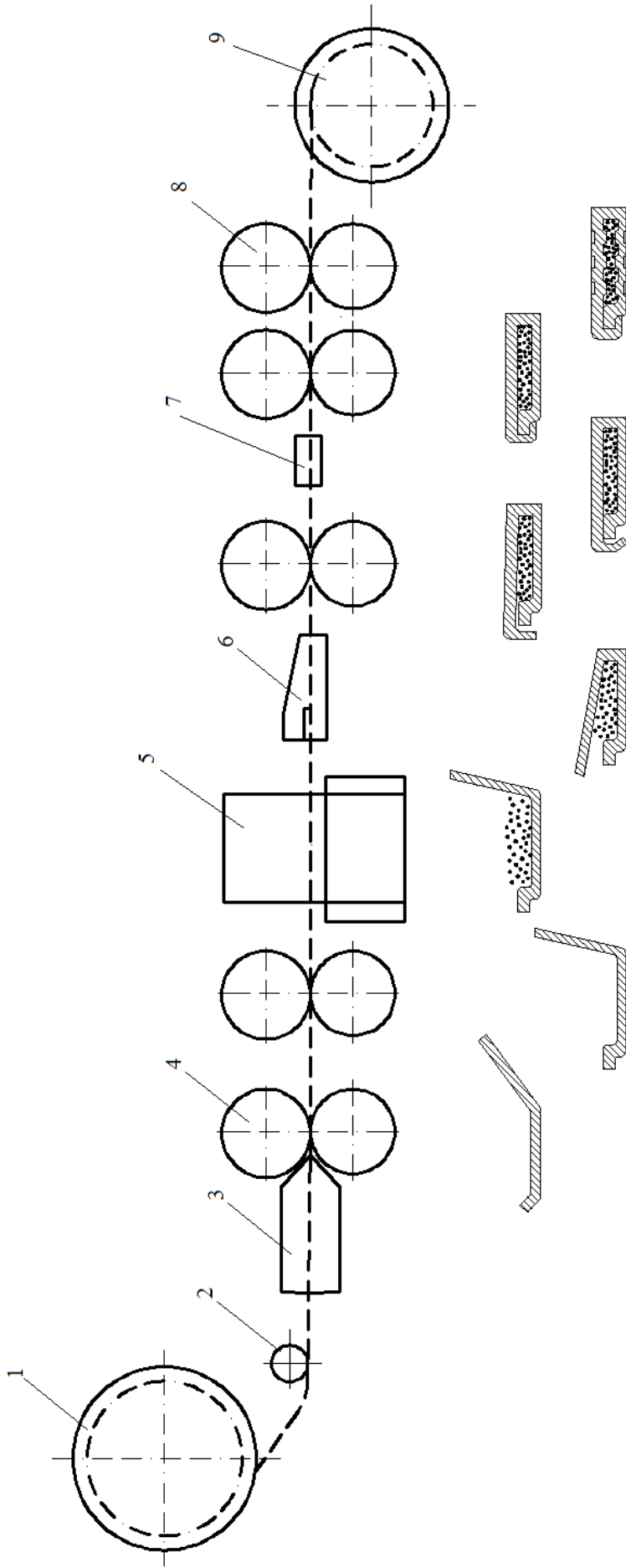
Порошковая лента конструкции Мариупольского металлургического института (см. рис. 1.1, е) позволяет иметь оболочку малой толщины – до 0,1 мм. Профилирование и прокатка такой порошковой электродной ленты на стане представлены на рисунке 1.31. Расположение одного замка на одном краю порошковой ленты несколько улучшает процессы массопереноса электродного металла в сравнении с двухзамковыми конструкциями.

Рассматривая и сравнивая технологические схемы прокатки и профилирования порошковой ленты на станах (см. рис. 1.26, 1.30, 1.31) следует отметить, что более равномерное распределение компонентов по ширине профиля оболочки обеспечивается по схемам, представленным на рисунках 1.26 и 1.31, где засыпка компонентов сердечника осуществляется сверху и не происходит их перемещение, как на рисунке 1.30. Особенно это имеет важное значение при производстве порошковой ленты с использованием ком-



1, 6 – кассеты; 2, 4 – профилирующие ролики; 3 – дозатор; 5 – уплотняющие валки

Рисунок 1.30 – Технологическая схема прокатки и профилирования порошковой электродной ленты на стане



1, 9 – кассеты; 3, 6, 7 – направляющие пластины; 5 – дозатор; 2 – направляющий ролик;
4 – формирующие ролики; 8 – уплотняющие валки

Рисунок 1.31 – Технологическая схема прокатки и профилирования порошковой электродной ленты на стане

понентов с резко различающимися насыпными массами, плотностью, размерами частиц. При изготовлении порошковой ленты по схеме (см. рис. 1.30) при формировании оболочки происходит изменение положения в пространстве, вследствие чего компоненты сердечника в оболочке перемещаются в формирующих роликах, что может привести к сепарации компонентов.

Наличие одного прочного замкового соединения в оболочке обеспечивает достаточную жесткость порошковой электродной ленты при использовании металла малой толщины, что позволяет установить большее значение величины силы прокатки или обжатия в процессе прокатки в двухвалковой клетки.

Порошковая электродная лента конструкции, представленной на рисунке 1.1, ж, позволяет получить более однородный по химическому составу наплавленный металл. Такой порошковой лентой можно наплавлять высоколегированный сплав, так как внутренние ленты могут быть легированными, как и оболочка. В этом случае снижается коэффициент заполнения порошковой ленты. Технологическая схема прокатки и профилирование порошковой электродной ленты показаны на рисунке 1.31 [89]. Увеличить коэффициент заполнения и повысить химическую однородность выплавляемого слоя можно при использовании конструкции порошковой ленты, у которой оболочка состоит из двух металлических лент. В этом случае можно применять комбинированные металлические ленты разного химического состава при тех же их геометрических размерах металлических лент. Это позволяет варьировать состав компонентов сердечника, их количеством.

В результате разработок в ИЭС им. Е. О. Патона в 1965 г. была создана первая порошковая лента ПЛ-АН101 [90] универсального типа (см. рис. 1.1, и), предназначенная для наплавки открытой дугой и под слоем флюса, а затем в СССР было начато широкое промышленное внедрение наплавки порошковой лентой открытой дугой. Состав и конструкция порошковой ленты ПЛ-АН101 были запатентованы в восьми странах мира, в частности, в Германии, Франции, Италии и других. Плотные замки и мелкоячеистые гофры на оболочке позволили

хорошо уплотнить сердечник порошковой ленты, что значительно улучшило перенос металла в дуге и устранило высыпание шихтовых материалов сердечника в сварочную ванну.

Серийное производство порошковых лент данной конструкции в промышленных масштабах было освоено на Торезском заводе наплавочных твердых сплавов и НПО «Тулачермет». К недостаткам этой порошковой ленты следует отнести неравномерное распределение оболочки по ее ширине. В местах замков, где сосредоточено максимальное количество ленты-оболочки, плотность сварочного тока при наплавке наибольшая. Это приводило к неравномерному оплавлению оболочки и образованию выступа в средней части спрессованного сердечника, который, периодически обламываясь, нерасплавленным попадал в сварочную ванну.

На данный момент в Украине и мире известны следующие фирмы и предприятия, которые специализируются на производстве и выпуске порошковых электродных материалов, в частности, порошковых лент:

Украина: ПАО "Каховский завод электросварочного оборудования" (г. Каховка), Государственное предприятие «Опытное конструкторско-технологическое бюро Института электросварки им. Е.О. Патона Национальной академии наук Украины» (г. Киев), ООО «Компания Торез ТС-Инвест» (г. Торез), ГП «Завод порошковой металлургии» (г. Бровары), ООО МНВЦ «Епсілон ЛТД» (г. Ивано-Франковск), ОАО «Торезтвёрдосплав» (г. Торез), Химико-металлургическая фабрика (ХМФ) ПАО «ММК им. Ильича» (г. Мариуполь), ОАО «Завод «Универсальное оборудование» (г. Донецк), ПАО «Металлургический комбинат «Азовсталь» (г. Мариуполь);

зарубежные страны: ООО «Роснамис» (г. Таганрог, Россия), «ПЛАЗМА» (г. Воронеж, Россия), ОАО «ПОЛЕМА» (г. Тула, Россия), ОАО «Евраз ЗСМК» (г. Новокузнецк, Россия), «Торезтвёрдосплав» (г. Таганрог, Россия), ООО «ВМЗ-Техно» (г. Выкса, Россия), ЗАО «Ногинский завод порошковых материалов» (г. Москва, Россия); «Vallourec» (Франция), «Odermath StahlwerkstechnikgmbH» (Германия), "Drahtzug Stein» (ФРГ), «Hitachi» (Япония), «Caterpillar» (США),

«Usinor» (Франция), «Industria asian speciality» (Италия), «Одермат Штальверкстехник» (ФРГ), «British Steel Co» (Англия), «SISMA» (Италия).

Одним из способов получения порошковых лент является плющение порошковых проволок путем прокатки последней между вращающимися цилиндрическими рабочими валками (рис. 1.32). По сравнению с круглыми порошковыми проволоками проволоки плоской формы (плющенки) имеют следующие преимущества: возможность прокатки трубчатой заготовки с порошковым наполнителем гладкими цилиндрическими роликами. Это обеспечивает уплотнение порошка сердечника при значительно меньшей пластичности оболочки ленты. Кроме того, обеспечивается надежность подачи порошковой плющенки необходимых параметров и более точное направление ее в зону горения дуги. Конструкция порошковой плющенки обеспечивает более благоприятные температурные условия сердечника в процессе нагрева и плавления порошковой плющенки.

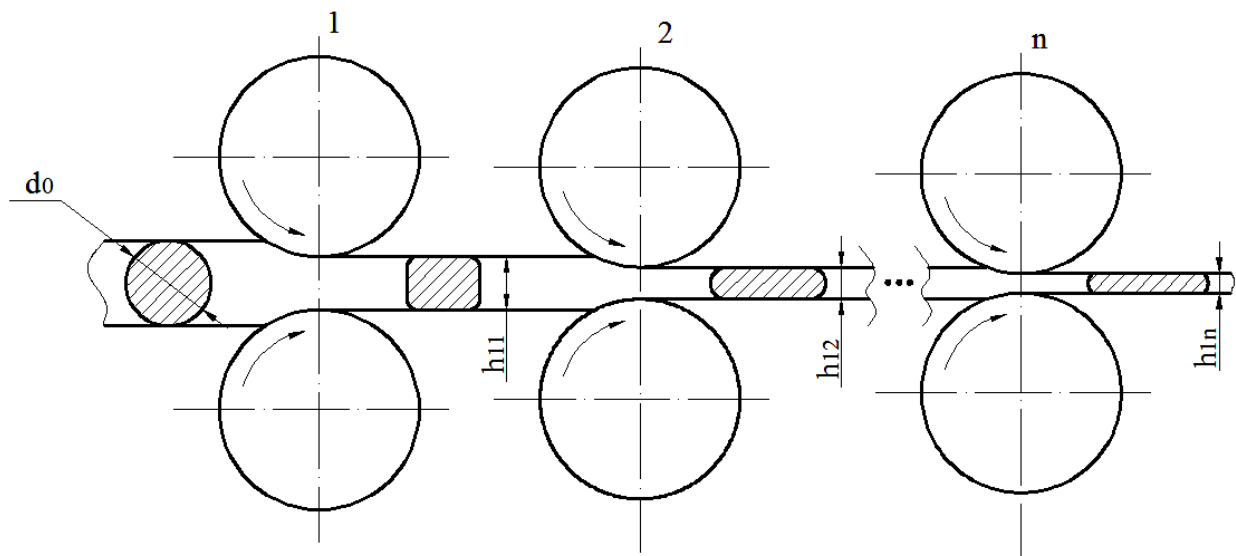


Рисунок 1.32 – Технологическая схема процесса плющения

Уже после первого прохода проволоки через валки ее поперечное сечение приобретает форму, близкую к прямоугольной. Поэтому только первый проход может рассматриваться как процесс плющения, в то время как последующие проходы – как процесс прокатки лент, который достаточно хорошо изучен в работах

[91...93]. Технология процесса плющения имеет несколько характерных особенностей по сравнению с процессом прокатки электродных лент. Одна из таких особенностей заключается в том, что при плющении преобладающим является течение металла в поперечном направлении. Поэтому необходимость обеспечить при плющении большее уширение, а не вытяжку требует выбирать величину натяжений минимальной и достаточной только для устойчивого положения ленты на промежуточных опорных роликах и роликах – регуляторах скорости [94]. Еще одна особенность плющения – это высокие требования к точности геометрических параметров (разнотолщинность по длине, ширина) и к форме поверхности плющенных лент [95].

Для плющения используют как многоклетьевые непрерывные, так и одноклетьевые двух- и многовалковые прокатные станы с валками диаметром 5...250 мм, изготовленными из сталей высокой твердости. Главное преимущество плющенной ленты – высокая точность размеров и лучшее качество поверхности [96]. Способы получения плющенных электродов рассмотрены в работах [96; 97].

Для порошковой проволоки технология производства разработана Институтом электросварки им. Е. О. Патона и состоит в следующем. На специальном станке лента из мягкой малоуглеродистой стали холодного проката толщиной 0,7...0,8 мм и шириной 15 мм сворачивается в трубку, которая одновременно заполняется тонкоразмолотым порошком. Трубка с порошком протягивается через калибровочное отверстие волоки, изготовленной из твердого сплава. Полученная проволока наматывается на барабан, сворачиваясь при этом в бухту, и в таком виде используется при полуавтоматической или автоматической наплавке.

Обычно волочильный стан имеет четыре барабана и соответствующее количество фильеров. В первом проволока сворачивается в трубку после заполнения ее порошком, а в последующих выполняется дополнительная протяжка трубки с порошком для калибровки проволоки и запрессовки в ней порошка. Производительность станка составляет 250 кг проволоки за смену. Порошковая проволока значительно дешевле легированной и производство ее несложно.

Для изготовления порошковой проволоки, а также для формирования её в удобные для поставки и применения бухты, служит автоматизированная линия по производству порошковой проволоки. С течением времени стало понятно, что для крупных предприятий иногда правильнее организовать производство порошковой проволоки непосредственно на своей территории, чем заказывать проволоку у поставщиков. Данного вида порошковую проволоку производят согласно ДСТУ 7217:2011.

Для длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке вопрос оптимальных режимов прокатки остается открытым из-за недостаточной освещенности процессов уплотнения сердечника и деформации оболочки разных конструкций.

1.3 Конструктивные особенности механического оборудования для производства длинномерных металлопорошковых изделий

Исходя из технологических особенностей процесса, станы для прокатки порошковых материалов подразделяются на станы с горизонтальным и вертикальным расположением рабочих валков. Помимо конструкционного исполнения станы для прокатки порошков также имеют отличия в требованиях, предъявляемых к их отдельным узлам. Одной из таких особенностей является относительно низкая частота вращения рабочих валков, составляющая в количественном отношении от 1 до 10 мин⁻¹ [98]. При этом скорость прокатки каждой отдельной марки металлического порошка, определяемая сыпучестью, газонасыщенностью и прессуемостью, подбирается опытным путем. Поэтому в универсальных станах в качестве привода применяются двигатели постоянного тока с бесступенчатым регулированием скорости в довольно значительном диапазоне [98].

В условиях промышленного производства предъявляются повышенные требования к пылезащищенности электрошкафов и сложных систем регулирования угловой скорости вращения рабочих валков прокатных станов. Поэтому, с целью сокращения эксплуатационных затрат, на некоторых станах для прокатки металлических порошков привод рабочих валков осуществляют от асинхронных двигателей, а регулирование скорости прокатки в этом случае реализуют при помощи сменных шкивов или зубчатых колес комбинированного редуктора или шестеренной клетки [98]. Такое решение упрощает конструкцию, повышает надежность в эксплуатации без снижения технологических возможностей конкретного механического оборудования.

Другой технологической особенностью процесса прокатки порошковых материалов является производство готовой металлопродукции, преимущественно в условиях металлургических предприятий, характеризующихся наличием целого ряда весьма специфических требований, включающих существенные ограничения в производственных площадях. В связи с этим, одним из основных требований, предъявляемых к конструкции соответствующего оборудования, является максимальная простота, высокая степень унификации и минимальные габаритные размеры. Конструктивно обеспечение данных требований, в свою очередь, достигается за счет использования зубчатых передач привода рабочих валков, уменьшающих величину крутящего момента на шпинделях, совмещения в одном агрегате рабочих в шестеренных клетей, широкого применения цепных или клиноременных передач, унификации шпинделей с соответствующими автомобильными типоразмерами, использования рабочих валков на подшипниках скольжения, а также за счет использования максимально простых тихоходных нажимных механизмов с клиновой передачей или передачей винт-гайка [98].

Кроме того, для условий реализации процесса прокатки именно порошковых материалов целесообразным в ряде случаев является обеспечение возможности установки рабочей клетки для прокатки в горизонтальном, вертикальном и под углом 45° к горизонту направлениях, при этом конструкции рабочих клетей,

обеспечивающих изменение направления прокатки относительно горизонтальной плоскости, позволяют настраивать оборудование на производство требуемого сортамента без применения довольно сложных и не всегда надежных дозирующих устройств.

Весьма специфические требования процесс прокатки порошковых материалов предъявляет к конструкции непосредственно узла рабочих валков, изготавливаемых, преимущественно, из высокоуглеродистых легированных марок сталей типа 9ХС, 9Х2, 9Х2МФ, 60ХСМ, ШХ15 и других. В частности, исходя из условий обеспечения надежного захвата прокатываемого порошкового материала рабочие валки должны иметь достаточно большой диаметр и строго определенную шероховатость образующих поверхностей [98]. Отмеченное делает целесообразным преимущественное использование двухвалковых систем, в то время как четырехвалковые схемы с рабочими и опорными валками могут применены только для вторичной уплотняющей прокатки уже спеченных порошковых композиций. Необходимым в этом случае, особенно при прокатке фрикционных составов, является и обеспечение высокогерметичной защиты подшипников узлов, а также шеек рабочих валков от попадания на них прокатываемых материалов. Также для повышения качества листов, в частности для уменьшения поперечной разнотолщинности в валковую систему вводят механизм противоизгиба (рис. 1.33) [99].

Целесообразным в ряде случаев является использование рабочих клеток с одним неприводным рабочим валком, а также с рабочими валками различного диаметра. Отмеченное позволяет отказаться от шестеренной клетки и, как следствие, максимально упростить привод главной линии, при этом вращение неприводного валка обеспечивается за счет активной энергии, сообщаемой от приводного валка через деформируемую порошковую среду [98].

В работе [100] предложена конструкция рабочей клетки с горизонтально расположенными валками и вертикальной подачей порошка в которой один валок выполнен неподвижно, а межвалковый зазор устанавливается перемещением второго валка при помощи гидроцилиндров.

Nobuhiro T. [101] предложил для уменьшения влияния вибрации валков на толщину проката установить подшипниковые узлы в кольца с определенным эксцентриком и возможностью поворота по мере вращения валков, данные втулки приводятся от отдельных сервоприводов (рис. 1.34).

Касаясь специфики конструкций нажимных механизмов рабочих клеток рассматриваемых конструкций, необходимо отметить, что с точки зрения обеспечения требуемой точности настройки величины межвалкового зазора, а также с точки зрения максимальной простоты наибольшее распространение получили конструкции с ручным приводом через червячные или многоступенчатые зубчатые передачи. В качестве исполнительного механизма, преобразующего вращательное движение приводного элемента в возвратно-поступательное перемещение верхнего или нижнего рабочего валка, используют либо клиновую пару, либо передачу винт-гайка, в которой гайка размещена неподвижно в верхней или нижней поперечинах узла станин. Целесообразным в этом случае является и использование механизма уравнивания рабочих валков, обеспечивающего снижение динамических нагрузок на начальных и завершающих стадиях процесса прокатки [98].

Перечисленные выше конструктивные особенности клеток для прокатки порошков были в той или иной мере внедрены на ряде специализированных станов. Например, конструкция прокатного стана с совмещенными рабочей и шестеренной клетями и рычажным нажимным механизмом предназначена для прокатки листов и порошков твердых сплавов (рис. 1.35). Отличительной особенностью данного стана является то, что верхний валок 1 при помощи подшипников скольжения установлен на двух рычагах, размещенных, в свою очередь, на оси в станине 2. Нажимной механизм представляет собой станину с двумя нажимными винтами, что обеспечило возможность совмещения рабочей и шестеренной клетки, а также использования рычажного нажимного механизма. Привод рабочих валков в этом случае осуществляется от электродвигателя 3 через клиноременную передачу 4 и зубчатый редуктор 5 (см. рис. 1.35).

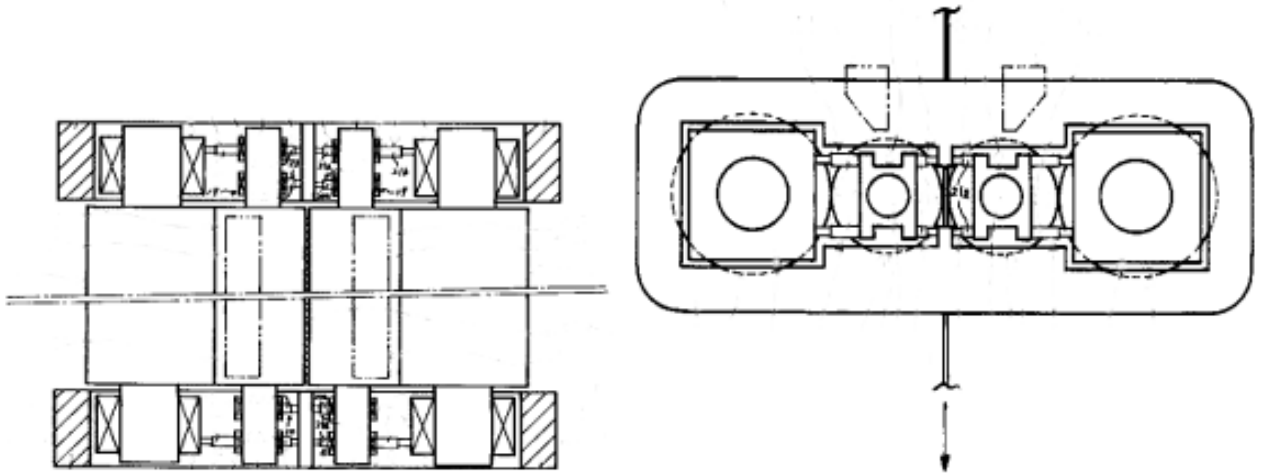


Рисунок 1.33 – Схема рабочей клетки для прокатки порошков с системой противоизгиба рабочих валков.

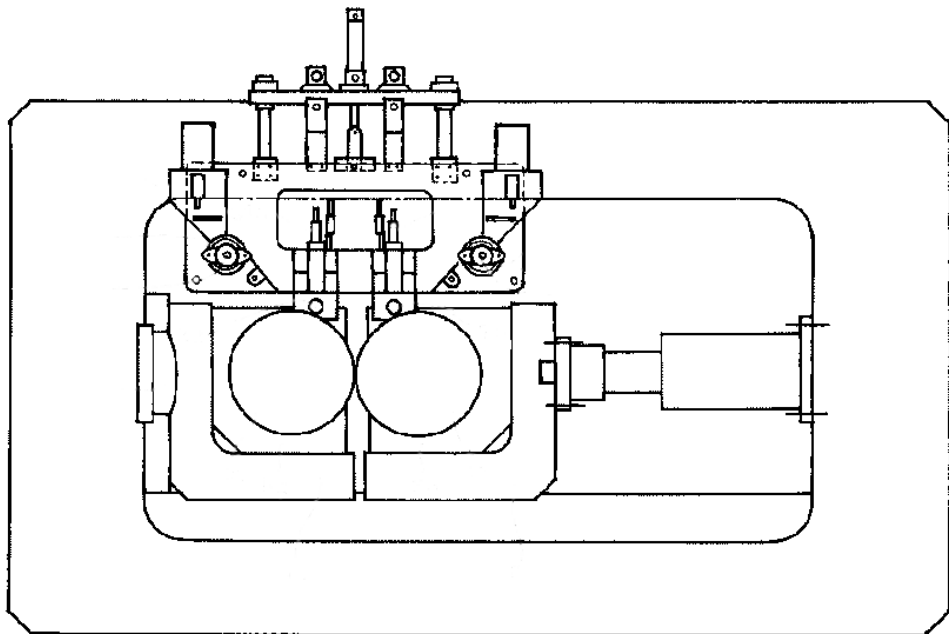


Рисунок 1.34 – Схема рабочей клетки с устройством для снижения вибрации валков

Особые технологические требования в условиях производства тонких изделий из высокодисперсных порошков послужили основанием для создания специализированного стана для прокатки ленты из порошковых композиций. Кинематическая схема данного стана представлена на рисунке 1.36, а его основные узлы и механизмы включают в себя электродвигатель во взрывобезопасном исполнении 1, упруго-пальцевую муфту 2, червячный редуктор 3, ведущее зубчатое колесо 4, зубчатые колеса шестеренной клетки 5, цепную передачу 6 и рабочие валки 7. Рабочие валки с подшипниками и подушками установлены в этом случае в станинах закрытого типа, а регулировка межвалкового зазора осуществляется отдельно при помощи двух винтов, сопряженных с гайками, запрессованными в соответствующих поперечинах узла станин. При прокатке захват порошка рабочими валками данного стана осуществляется из бункера, а подача порошка в бункер – из дозатора по наклонному столу [98].

Известна конструкция стана для прокатки порошков с горизонтально расположенными валками (рис. 1.37) [102]. Особенность данной конструкции заключается в том, что одна пара валков жестко закреплена в станине, а другая пара валков расположена в блоке, имеющем возможность проворачиваться при помощи двух гидроцилиндров (см. рис. 1.37).

Известно множество конструкций станов с вертикально расположенными рабочими валками. Так в конструкции стана представленного на рисунке 1.38 рабочие валки расположены консольно, причем они имеют разный диаметр [103]. Для обеспечения равномерной толщины и плотности порошкового слоя при его накатке на обойму подшипника скольжения станина выполнена с Г-образным выступом и снабжена вкладышем из антифрикционного материала, установленным в выступе. Валок меньшего диаметра установлен под вкладышем и находится в контакте с ним, а на валке с большим диаметром выполнен калибр со съемной ребордой.

В качестве привода двухвалкового стана 600 (рис. 1.39), предназначенного для прокатки листов из переработанных отходов шлифования подшипникового

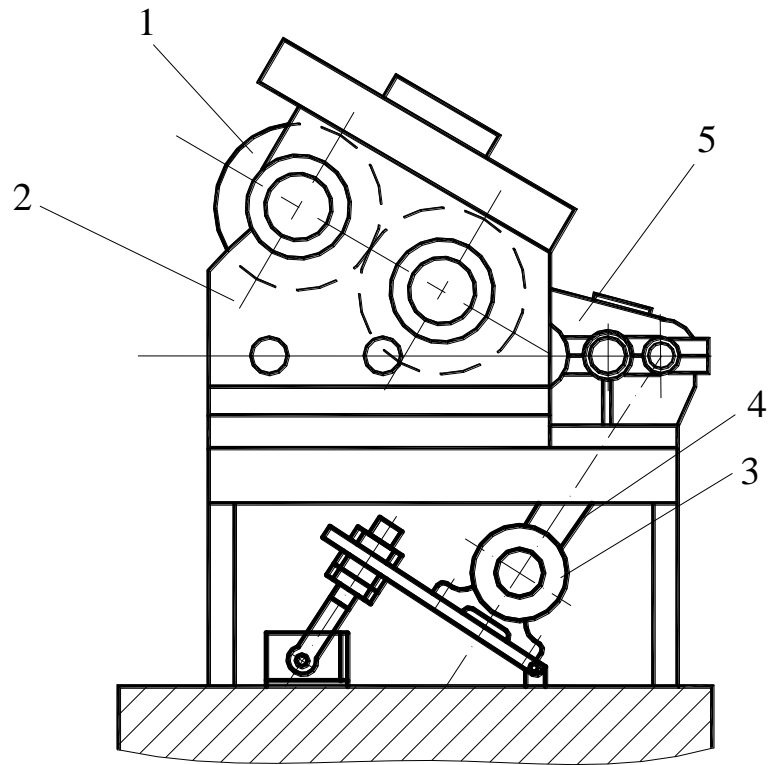


Рисунок 1.35 – Схема прокатного стана для прокатки порошков

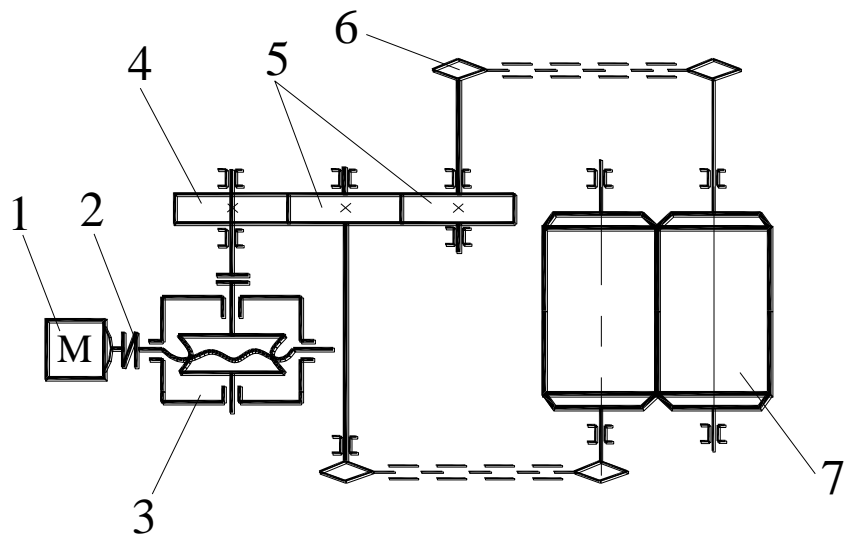


Рисунок 1.36 – Кинематическая схема стана, предназначенного для прокатки порошковых материалов

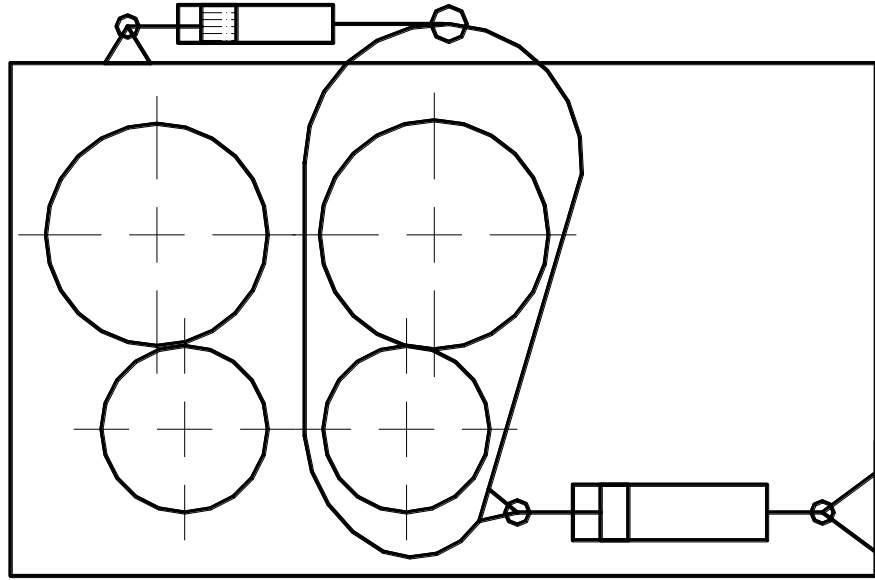


Рисунок 1.37 – Рабочая клетка стана для прокатки порошков

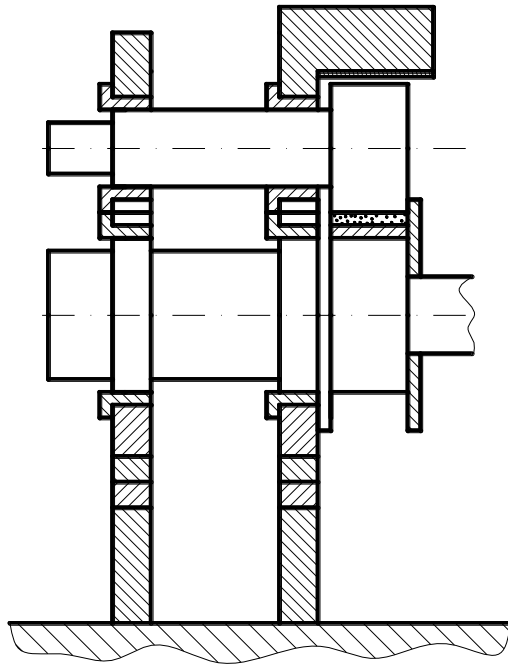


Рисунок 1.38 – Стан для прокатки порошков с консольно расположенными валками

производства [104], использован мотор-редуктор 1, передающий крутящий момент через муфту 2, комбинированный редуктор-шестеренная клеть 3, шпиндельные передачи 4 на ведущие валы рабочей клетки. При этом сами ведущие валы установлены непосредственно в подушках рабочих валков 5, что обеспечивает постоянство межцентровых расстояний соответствующих зубчатых передач независимо от величины межвалкового зазора. Нажимной механизм данного стана выполнен клиновым с ручным приводом через две червячные передачи. Подача порошка при прокатке осуществляется из бункера, установленного над нижним рабочим валком, оснащенного специальным шибером, осуществляющим дозирование объема подаваемой порошковой композиции [98].

Для изготовления относительно тонких ленточных заготовок из порошковых композиций на основе легких цветных металлов был спроектирован и изготовлен двухклетевой стан СППД-6 [98]. На стане реализован способ, заключающийся в прокатке высокопористой ленты в первой клетке и последующем уплотнении получаемой ленты рабочими валками второй клетки. С учетом реализуемой технологии основной отличительной особенностью конструкции данного стана является совмещение в одном агрегате функций двух рабочих и двух шестеренных клеток. Все узлы стана установлены на сварной станине, а привод осуществляется от электродвигателя переменного тока через червячный редуктор и цепную передачу. Блок рабочих клеток состоит из двух стальных станин, стянутых тремя шпильками, валов с шестернями в станинах, валов с подшипниками в подушках и нажимных механизмов. Симметричное расположение зубчатых колес на валках обеспечивает симметричность распределения нагрузки, а это исключает неравномерность упругой деформации всего блока рабочих клеток. Клиновинтовой нажимной механизм обеспечивает достаточное быстродействие и точное позиционирование рабочих валков, а регулирование их осевого смещения и предотвращение смещения подушек осуществляется посредством винтовой передачи.

Типичным представителем гаммы станов для прокатки порошковых материалов является специализированный стан 696/448×450, конструкции ИМП АН

Украины (рис. 1.40). С целью обеспечения максимальной конструктивной простоты главная линия рабочей клетки данного стана включает в себя электродвигатель 1, систему муфт, редуктор 2 с приводом на нижний рабочий валок 3 большого диаметра. Привод верхнего рабочего валка 4 меньшего диаметра осуществляется в этом случае через дополнительную пару зубчатых колес 5, установленных на шейках соответствующих рабочих валков. Нажимной механизм имеет ручной привод через передачу винт-гайка, рабочие валки установлены на подшипниках скольжения, а узел станин представляет собой сборную конструкцию, стянутую шпильками и дополнительными траверсами. Скорость прокатки на данном стане составляет 3-4 м/мин, максимальное значение силы и момента прокатки составляет соответственно 2500 кН и 56 кН·м, а использование рабочих валков разного диаметра позволяет расширить технологические возможности оборудования за счет, например, процесса прокатки на металлической подложке или за счет совмещения процессов прокатки и прессования при использовании специальной прессовой оснастки.

Mochizuki Chitoshi и Oda Tamotsu [105] предложена конструкция рабочей клетки 1 (рис. 1.41), которая включает в себя два рабочих валка для прокатки порошкового материала на металлической полосе и пресс-ролики для нанесения порошкового материала на периферийную поверхность прокатного валка перед его прокаткой на полосе. Пресс-ролики установлены на опорном устройстве, имеющем возможность перемещения для установки необходимого зазора.

Среди конструктивных особенностей механического оборудования, предназначенного для прокатки порошковых материалов, необходимо особо выделить роль засыпных и дозирующих устройств, так как именно их конструкция, а, следовательно, и надежность работы, во многом определяет такие важнейшие экономические показатели, как производительность и качество готовой металлопродукции. Кроме того, конструкция засыпных бункеров имеет большое значение и с точки зрения величины отходов производства, а также с точки зрения однородности получаемых заготовок и по их длине и по их ширине [98].

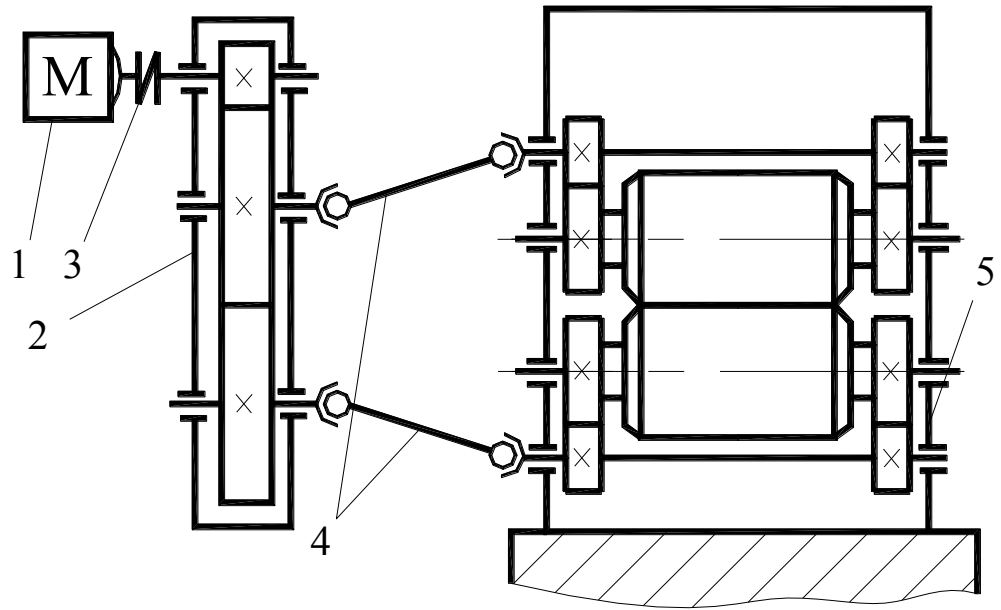


Рисунок 1.39 – Кинематическая схема двухвалкового стана 600, предназначенного для прокатки листов из переработанных порошковых отходов подшипникового производства

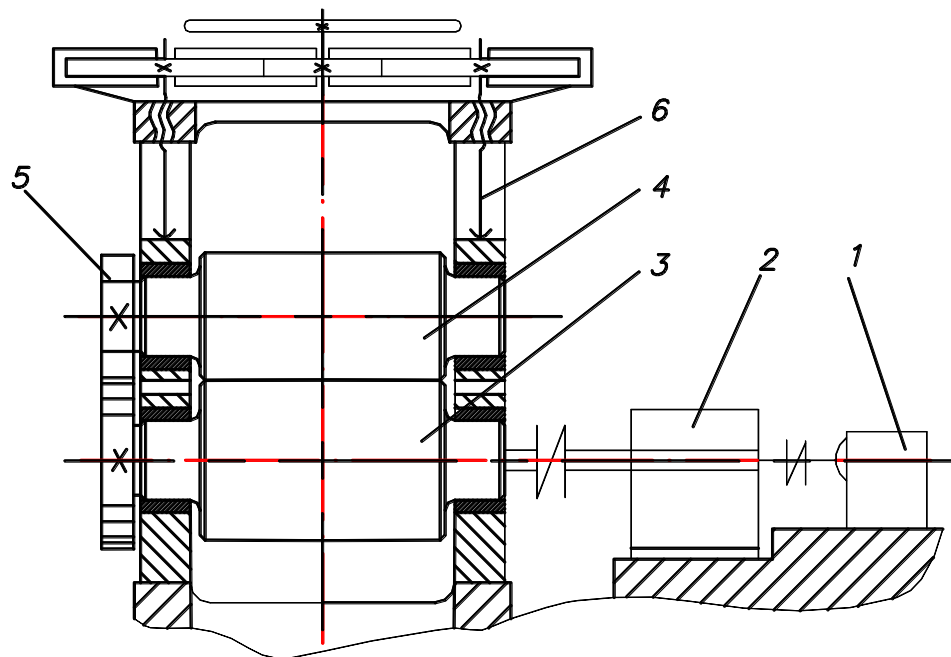


Рисунок 1.40 – Кинематическая схема специализированного стана 696/448x450, предназначенного для прокатки порошковых материалов

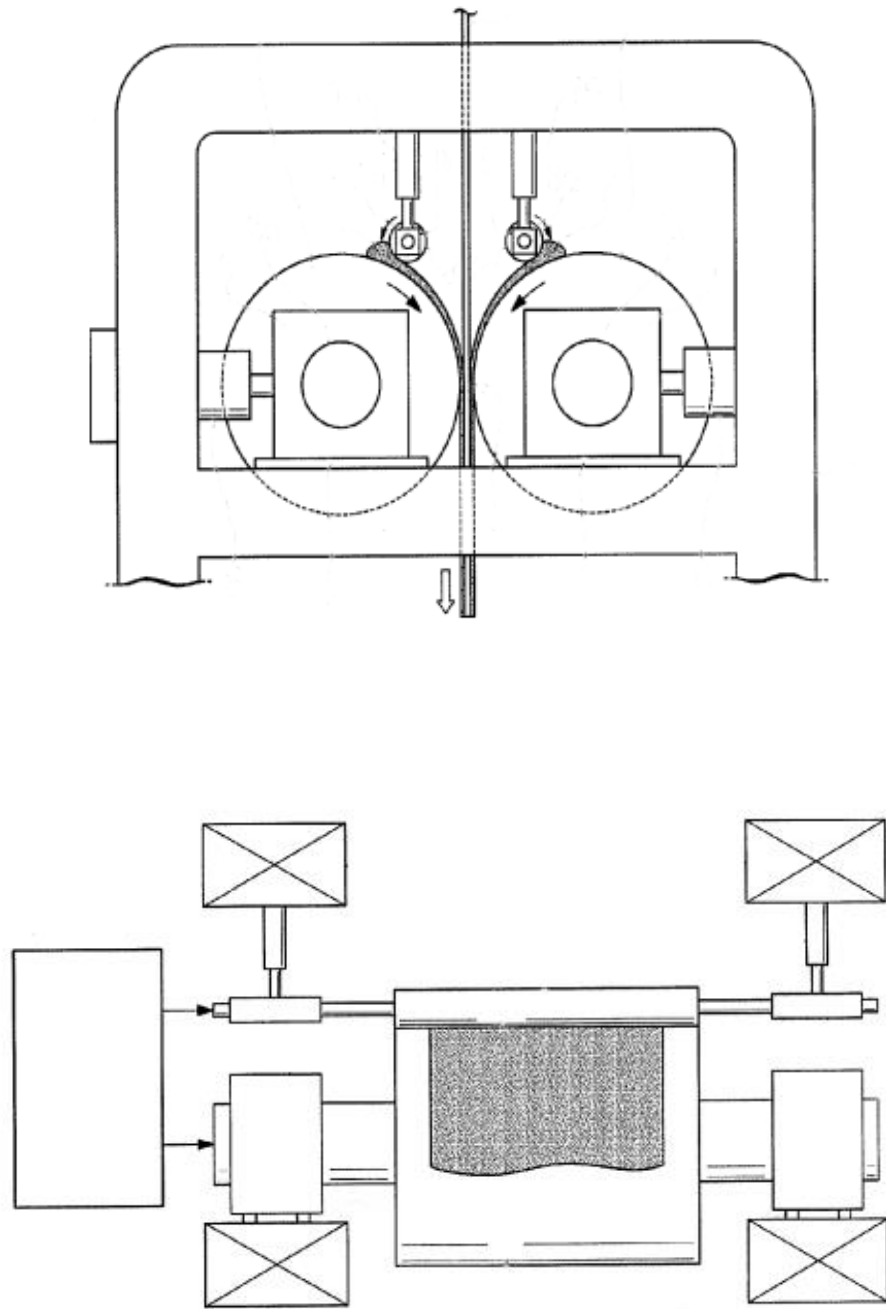


Рисунок 1.41 – Схема рабочей клетки

Одновременно с изложенным выше конструкция бункерных устройств должна обеспечить возможность перемещения рабочих валков и изменение толщины прокатываемой заготовки без образования зазора между валками и бункером во избежание просыпания порошка. С учетом этого бункера для подачи порошка изготавливают двух типов, а именно, бункера, опирающиеся на валки рабочей клетки, и бункера подвесные [98].

При установке бункера на валки (рис. 1.42) на их рабочей поверхности выполняются выступы шириной, равной ширине прокатываемой ленты, или канавки, расстояние между которыми определяет ширину ленты [98]. Недостатком такого способа загрузки порошка является необходимость изготовления новых валков при изменении ширины ленты, а также необходимость замены в этом случае передней и задней стенок бункера. Недостатком также является повышенный износ рабочих валков в результате трения порошка между валками и щеками бункера. Для устранения этого явления прокатку производят в закрытом калибре, представляющем собой бункерное устройство с подвижными боковыми стенками, где бункером частично служат сами валки с ребордами, предотвращающими рассыпание порошка [47].

Для интенсификации и более равномерной подачи порошка в рабочие валки иногда бункерное устройство снабжают двумя парами горизонтально расположенных валков, которые устанавливают в бункере над рабочими валками друг над другом [106]. Для повышения плотности и толщины проката в бункер устанавливают виброэлемент, выполненный в виде пластины шириной, равной ширине бункера (рис. 1.43). Виброэлемент устанавливают в зоне деформации с возможностью вибрации в направлении прокатки [107].

Для предотвращения просыпания порошка из раствора валков размещают боковые ограничительные устройства в виде двух цилиндрических колес, на ободе которых расположена пневматическая шина [108].

Известна конструкция устройства для подачи порошка в валки, в которой помимо самого бункера установлен лоток, смонтированный под бункером и имеющий возможность изменения угла наклона (рис. 1.44). Также между лотком и

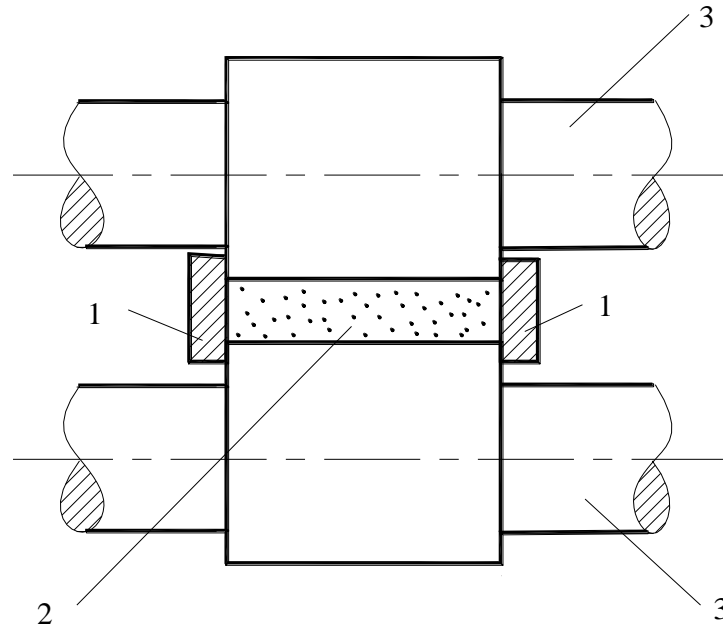


Рисунок 1.42 – Схема взаимного расположения валков, бункера и порошка:

1 – щеки бункера, 2 – порошок, 3 – прокатные валки

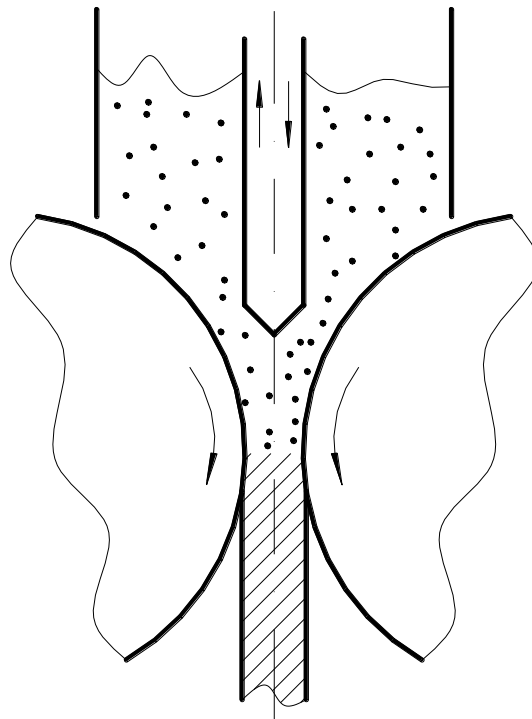


Рисунок 1.43 – Устройство для подачи порошка в валки

рабочими валками стана предусмотрен шибер, выполненный в виде гребенки с треугольной формой зубьев [109]. Данная конструкция задающего устройства позволяет с более высокой точностью выполнять дозирование порошка в валки.

Natsuki Y. и Tomotoshi M. [110] для улучшения прокатки порошка, обладающего магнитными свойствами, предложили перед входом в очаг деформации устанавливать генераторы, создающие магнитное поле. Для задания точной скорости прокатки в работе [111] предложено дозирующие ролики и рабочие валки объединять в общую кинематическую схему. В работе [112] предложено для порошков, обладающих большой теплопроводностью, бункер подачи оснащать дополнительными горизонтальными и вертикальными перегородками. Для увеличения точности подачи порошка в работе [113] предложено дозирующие ролики устанавливать не только на поверхности рабочего валка, но и в бункере.

В работе [114] предложена конструкция рабочей клетки для прокатки порошков, отличительной особенностью которой является наличие прилегающих к поверхностям валков ограничителей (рис. 1.45), перемещением которых дозируется количество поступающего в очаг деформации порошкового материала. В работе [115] для более равномерного распределения порошка по ширине полосы предложено выполнять боковые стенки бункера определенной конфигурации (рис. 1.46), которая позволяет уменьшить давление порошка по краям полосы.

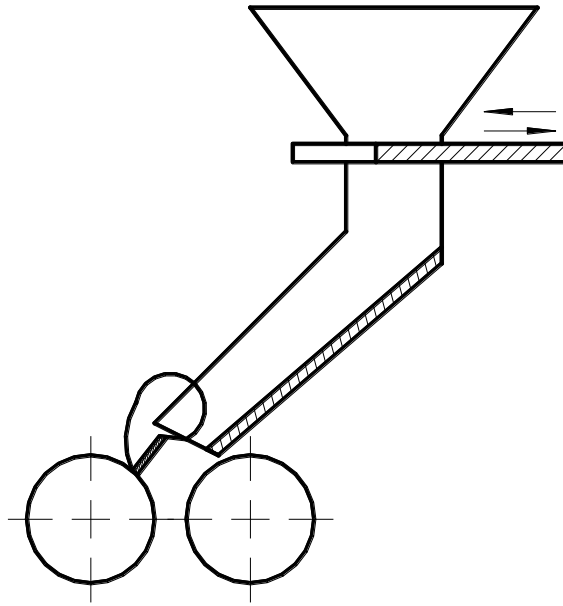


Рисунок 1.44 – Дозирующее устройство для подачи порошка в валки

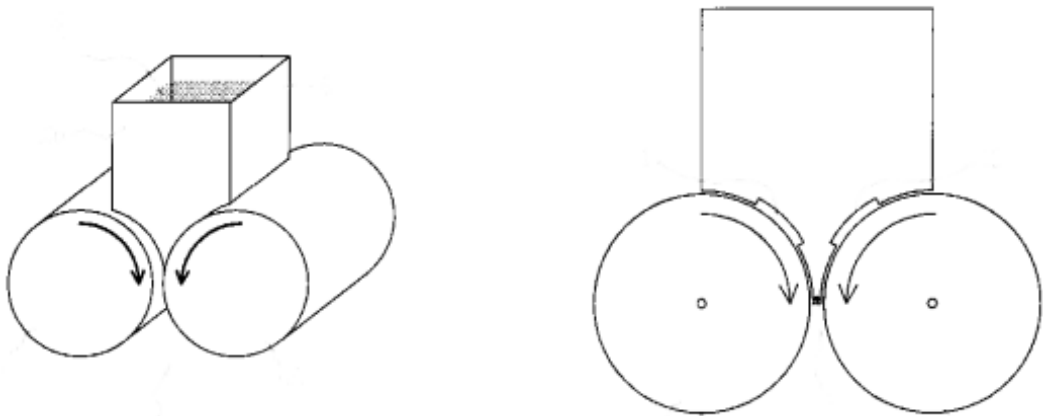


Рисунок 1.45 – Схема дозирующего устройства [114]

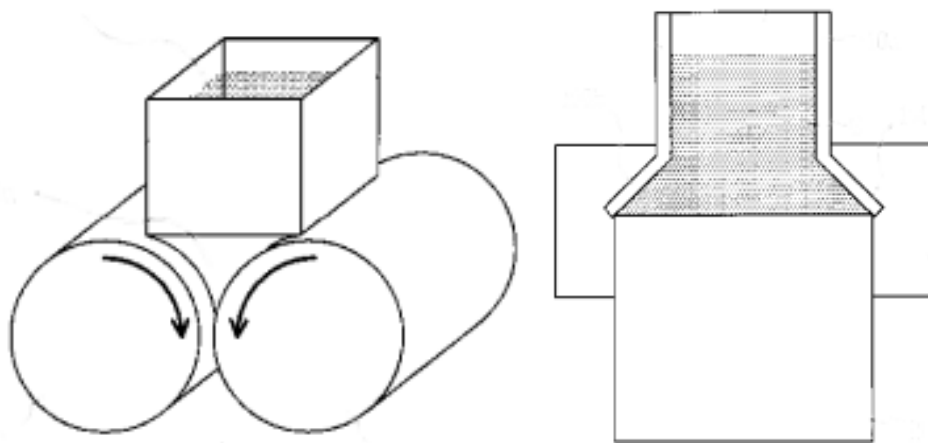


Рисунок 1.46 – Схема дозирующего устройства [115]

1.4 Теоретические основы процессов производства длинномерных металлопорошковых изделий

В самом общем случае условий реализации процесса прокатки порошковых материалов по длине дуги контакта валок-порошковый материал происходит коренное изменение свойств прокатываемого материала, по характеру приближающееся к изменению агрегатного состояния веществ: превращение сыпучего вещества в жесткое пористое, обладающее некоторой упругостью и прочностью на разрыв, изгиб и срез [116].

Из целого ряда работ, посвященных описанию процесса прокатки порошковых материалов, особый интерес представляют работы, в которых исследован характер распределений параметров напряженно-деформированного состояния при их деформировании. Так Северденко В.П., Ложечниковым Е.Б. и Шаламовым В.А. [117] при прокатке в ленту пудры АПС-2 была выявлена неравномерность в распределении напряжений, деформации и скоростей. Кроме того, было установлено, что по длине дуги захвата имеют место зоны скольжения и прилипания. Выравнивание напряжений, деформаций и скоростей происходит во внеконтактных зонах очага деформации, что, по своей сути, аналогично процессу прокатки монометаллических сред. Характер распределения текущих значений нормальных и касательных контактных напряжений определялся при помощи точечных месдоз, а результаты исследований показали, что сила прокатки на валки распределяется неравномерно. В начале нормальные контактные напряжения p_x увеличиваются постепенно, а затем более интенсивно. Вершина эпюры имеет округлую форму и характеризуется координатой в районе нейтрального сечения очага деформации. Снижение p_x от максимума до нуля протекает еще интенсивнее, что обуславливает сдвиг эпюры нормальных контактных напряжений к плоскости осей рабочих валков.

Виноградовым Г.А. и Каташинским В.П. [118] на основании работы Соколовского В.В. [119] были исследованы условия деформации и напряжения в зоне

подачи порошка уплотнения, разработана схема деформации порошка в межвалковом пространстве, выведены условия непрерывности напряжений при предельном состоянии. При этом было установлено, что непрерывность напряжений при предельном состоянии является неизменным условием сплошности прокатываемых лент и равномерной их толщины. На основании полученных результатов ими были сформулированы условия захвата и уплотнения порошка.

В работе [120] определено, что уплотнение порошка от начальной плотности, отвечающей удельной утряске γ_m , до плотности готовой сырой ленты γ_l происходит не на всей длине дуги угла контакта, а только до нейтрального сечения, определяемого углом α_p . Уплотнение сопровождается оттеснением части порошка в направлении, противоположном направлению прокатки. Таким образом, как и при прокатке литых металлов, имеет место явление отставания, однако величина отставания при прокатке порошков в несколько раз больше, чем было доказано расчетами. Была установлена зависимость между начальной и конечной плотностью прокатываемого материала:

$$\gamma_l / \gamma_m = h_p / h_n K_c , \quad (1.1)$$

где h_p – высота сечения очага деформации, соответствующее углу α_p ;

h_n – высота нейтрального сечения очага деформации;

K_c – коэффициент пропорциональности, определяемый, с учетом диаметра валков, как:

$$K_c = \tau_l \delta / [\tau_m (1 + \delta - \cos \alpha_p)] ; \quad (1.2)$$

τ_m – относительная масса утряски;

τ_l – относительная плотность;

$\delta = h_l / n / D$ – толщина ленты, отнесенная к диаметру рабочих валков.

В этой же работе с использованием метода полей линий скольжения и диаграммы напряжений по контактными поверхностям, а также по оси симметрии, было установлено, что в плоских сечениях, перпендикулярных направлению прокатки, напряжения у контактной с валками поверхности выше, чем по оси симметрии. Напряжения по дуге захвата с возрастающей интенсивностью увеличивается до зоны прилипания, а в зоне прилипания интенсивность роста напряжений уменьшается. Вершина имеет куполообразную форму, аналогичную эпюрам, полученным непосредственными измерениями нормальных контактных напряжений, что подтверждает правильность расчетных значений.

Из выводов работ [118; 119; 121] следует, что максимальные напряжения в плоских сечениях, перпендикулярных направлению прокатки, находятся в зоне прилипания, в точке пересечения линий скольжения.

Соколовский В.В. [119] установил, что неравномерность плотности по толщине порошкового проката свидетельствует о том, что достигнутая степень уплотнения вблизи нейтрального сечения сохраняется в области скольжения зоны опережения. В противном случае наиболее интенсивное уплотнение происходило бы в приконтактных слоях материала, а наибольшая плотность наблюдалась бы в приповерхностном слое.

Наблюдаемое некоторое уменьшение плотности в зоне опережения относительно толстого проката может быть объяснено известным в механике сыпучих тел эффектом разрыхления ранее уплотняемого материала при его деформации с напряжениями, меньшими, чем напряжения предварительного уплотнения [122].

Если не учитывать эти особенности, то возникает неравномерность опережения и отставания порошкового проката, в результате чего возникают продольные растягивающие напряжения, вызывающие разрывы прокатываемого материала.

Касаясь математического описания напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов, следует отметить ряд работ, в которых за основной параметр напряженного состояния в очаге деформации было

принято максимальное контактное напряжение. Так основываясь на теории и практике процесса прокатки композиционных материалов, Чекмаревым А.П. [123] было установлено, что при прокатке металлических порошков величина максимального значения нормальных контактных напряжений p определяется только показателем результирующей плотности, с учетом чего были установлены и описаны количественно зависимости уплотнения порошка от величины абсолютного обжатия и формы эпюры нормальных контактных напряжений. Исходя из этого, а также исходя из линейной аппроксимации данной эпюры, были предложены относительно простые зависимости для определения силы P и момента M прокатки [124]:

$$P=2p_{max} bl/3 ; \quad (1.3)$$

$$M=2P\psi l, \quad (1.4)$$

где b, l – ширина прокатываемой полосы и длина дуги контакта;

$\psi=0,30...0,33$ – коэффициент плеча, характеризующий координату точки приложения равнодействующей силы прокатки.

Однако Чекмаревым А.П. при этом не учитывалось свойство порошковых материалов уплотняться при прокатке с изменением объема. Этим объясняется несоответствие теории с соответствующими экспериментальными данными. Теория предельного состояния связно-сыпучей среды была разработана Губкиным С.И. [125; 126], при этом предельное состояние связно-сыпучей среды характеризовалось силами трения и силами сцепления частиц, обуславливающими способность порошка воспринимать внешнюю нагрузку. С учетом этого были получены уравнения расчета главных напряжений, соответствующих предельному состоянию связно-сыпучей среды [127...129].

При прокатке порошков, в отличие от прокатки компактных материалов, происходит изменение плотности прокатываемого материала. Отмеченное ис-

ключает возможность применения закона постоянства объема. При прокатке металлических порошков следует применять универсальный закон постоянства массы, математическое выражение которого было выведено в работе [121]:

$$V_0 = z V, \quad (1.5)$$

где z – отношение плотности металла после прокатки к плотности его перед прокаткой;

V_0 и V – объем металла до и после прокатки.

Используя уравнение постоянства массы (1.5) для случая прокатки порошковых материалов Виноградов Г.А. и Каташинский В.П. [118] получили:

$$h_p B_1 l_1 \gamma_m = h_l B_2 l_2 \gamma_l \quad (1.6)$$

где $h_p, B_1, l_1, h_l, B_2, l_2$ – размеры элементарного объема порошка перед и за зоной деформации;

γ_m – насыпная масса утряски порошка;

γ_l – плотность получаемого проката.

В результате преобразования уравнения (1.6) было получено следующее соотношение:

$$h_p / h_l = B_2 / B_1 l_2 / l_1 \gamma_l / \gamma_m, \quad (1.7)$$

где $h_p / h_l = \varepsilon$ – коэффициент прессования;

$l_2 / l_1 = \lambda$ – коэффициент вытяжки, величина которого определяется, преимущественно, только химическим составом прокатываемого порошка [118];

$\gamma_l / \gamma_m = z_m$ – коэффициент уплотнения.

Виноградов Г.А. и Каташинский В.П., приняв упрощение, что при достаточно большой ширине проката уширение отсутствует, т.е. деформация является двумерной, преобразовали уравнение (1.7) в следующий вид:

$$\varepsilon = \lambda z. \quad (1.8)$$

Из геометрических соотношений очага деформации было получено:

$$h_p = h_n + \alpha_p^2 R, \quad (1.9)$$

при этом коэффициент спрессования был равен:

$$\varepsilon = 1 + \alpha_p^2 R / h_n. \quad (1.10)$$

Используя уравнение постоянства массы, Виноградов Г.А. и Каташинский В.П. [118] установили и описали количественно распределения коэффициентов прессования и уплотнения в зависимости от максимума нормальных контактных напряжений. Однако при этом не учитывалось влияние на установленную зависимость реальных геометрических параметров очага деформации, а также реальных распределений условий контактного трения. Не было учтено в этом случае и влияние упругих деформаций рабочих валков и прокатываемого материала.

Ложечников Е.В. [130], используя основные теоретические положения, полученные Виноградовым и Каташинским, преобразовал основное уравнение прокатки, выведенное Аксеновым Г.И. и Николаевым А.Н. [131], применительно к прокатке порошковых материалов. Результаты, полученные в работе [132] подтвердили зависимость между толщиной и плотностью порошкового проката.

В работе [133] была решена плоская задача о распределении компонент скорости перемещения частиц, плотности порошкового материала и напряжений

при прокатке. При решении этой задачи авторы применили одну из модификаций метода крупных частиц (МКЧ). При этом сам процесс течения расщеплялся на эйлеров и лагранжев этапы. Среда разбивалась на множество элементов, между которыми допускается обмен массами.

В результате моделирования было получено распределение компонент скорости и плотности в ячейках выбранной сетки при стационарной прокатке порошкового материала, что позволило установить закономерности распределения напряжений. Из анализа полученных результатов, было получено расчетное распределение плотности порошка в зоне уплотнения по оси прокатки, которое показало, что максимальная интенсивность уплотнения наблюдается в ее центральной части, минимальная – в начале и конце.

В работе [134] были выведены зависимости для определения абсолютных и относительных скоростей перемещения материала в очаге деформации при прокатке пористых материалов, которые дают возможность получить кинематику течения материала, траектории перемещения его отдельных частиц, определить напряженное состояние. Здесь также было установлено, что решение задач плоской деформации пористых материалов неосуществимо с помощью функций комплексного переменного из-за неаналитичности областей течения пористого материала в смысле условия Коши-Римана.

Среди решений для процесса прокатки порошка, предполагающих постановку задачи в наиболее полном виде, необходимо отметить работу Б.А. Дряннова [135], в основу которой положено дифференциальное уравнение равновесия, полученное с использованием метода Хилла. При постановке и решении данной задачи, которое осуществлялось отдельно для зоны отставания и зоны опережения, автором было принято допущение об аппроксимации контактных дуг хордами, а также о наличии максимально возможных значениях касательных контактных напряжений, что по сути своей является одним из возможных обобщений закона трения Прандтля. Непосредственно решение дифференциального уравнения в этом случае было выполнено с учетом пирамидального условия текучести. При этом основной отличительной чертой полученных аналитических

зависимостей является возможность прогнозирования распределений и напряжений и относительной плотности в их достаточно строгой функциональной взаимосвязи. Вместе с тем, достаточно большой объем различного рода допущений, принятых как при постановке, так и при последующем решении задачи, и в этом случае несколько исказил реальную картину, что, в частности, подтверждается достаточно высокой степенью и количественного, и качественного несоответствия расчетных и эмпирических распределений нормальных контактных напряжений.

В работах Соколовского В.В. [119], Гениева Г.А. и Эстрина М.И. [136], Перельмана В.Е. [137] и ряда исследователей были решены дифференциальные уравнения контактных напряжений, возникающих в зоне деформации порошковых материалов.

В работах [138; 139] кинематические и силовые параметры процесса прокатки порошков исследовались с позиций механики пластических деформаций объемно-сжимаемого континуума, при этом авторы представили очаг деформации как объединение двух областей сдвигов и уплотнения. Задача была решена применительно к зоне уплотнения. При этом очаг деформации разбивался на множество элементарных объемов и дальнейшее решение задачи строилось на гипотезе плоских сечений. Используя законы сохранения импульса, сохранения массы и условие пластичности авторами было определено напряженно-деформированное состояние прокатываемого порошка в зоне уплотнения.

В работах [140...143] была решена задача описания напряженно-деформированного состояния порошка при прокатке. Методика решения была основана на совместном решении условия статического равновесия и условия пластичности. Предложенная методика дает достаточно точное определение характеристик напряженного состояния порошка в очаге деформации, однако авторы не смогли определить распределение плотности порошка по длине очага деформации.

Драгобецким В. В. было исследовано поведение двухслойной порошковой среды при обработке давлением [144]. В работе [145] была предложена модель

процесса прокатки двухслойной полосы, содержащей компактный слой. Эта модель была основана на теории пластического течения уплотняемой сплошной среды и использовании инженерного метода «тонких сечений». Двухслойная полоса при этом представляла жестко сцепленные друг с другом пористый и компактный слои. Их совместное пластическое течение возникает при давлениях на полосу со стороны валков, которые обуславливают величины компонент напряженного состояния в слоях, удовлетворяющего условиям пластичности компактного и пористого материалов:

$$T_k = k_k, \quad (1.11)$$

$$T_n^2 + \alpha \sigma_n^2 = \delta k_n^2, \quad (1.12)$$

где T_k, T_n – соответственно интенсивности касательных напряжений, действующих в компактном и пористом слоях;

k_k, k_n – пределы текучести при чистом сдвиге компактного слоя и компактной фазы пористого слоя;

α, δ – функции относительной плотности пористого слоя γ .

Анализ этой модели показал, что одновременное удовлетворение условий (1.11) и (1.12) возможно, если исходная относительная плотность пористого слоя ρ_0 превышает некоторую предельную величину ρ_{np} . В случае когда $\rho_0 < \rho_{np}$ давления, действующие на полосу недостаточны для удовлетворения условия (1.11), компактный слой полосы пластически не деформируется. Общая деформация полосы в этом случае должна происходить только в результате уплотнения пористого слоя, и только при достижении критической плотности пористого слоя оба слоя полосы окажутся вовлеченными в совместное пластическое течение.

При $\rho_0 < \rho_{np}$ пористый слой в полосе уплотняется в условиях одноосной деформации (без вытяжки) и, как следует из уравнения непрерывности [144]:

$$E_x^k = E_y^k = E_x^n = 0, \quad (1.13)$$

$$E_y^n = E^n = -\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (1.14)$$

где E_x^k, E_y^k – компоненты скорости деформации компактного материала;

E_x^n – продольная компонента скорости деформации пористого материала;

E^n – скорость объемной деформации пористого материала.

В этой работе также отмечено, что при прокатке пористого материала без вытяжки распределение относительной плотности и компонент напряженного состояния в зоне деформации не зависят от условий контактного трения и определяются только геометрией границ зоны деформации.

Здесь также были выведены выражения для компонент напряженного состояния в пористом слое:

$$\sigma_y^n = P_x \cong \sigma_1 = -2\sqrt{3}/3 k_n \rho_x^{3/2} (1 - \rho_x)_x^{-1/2}, \quad (1.15)$$

$$\sigma_x^n \cong \sigma_3 = -\sqrt{3}/3 k_n \rho_x^{3/2} (1 - \rho_x)_x^{-1/2} (3\rho_x - 1) \quad (1.16)$$

Таким образом, напряженное состояние в пористом слое полосы, прокатываемой без вытяжки, было описано аналогично напряженному состоянию пористого тела при одноосном уплотнении без трения в жесткой пресс-форме.

При анализе методом «тонких сечений» пластического течения полосы в целом, то есть когда зона пластической деформации распространяется и на пористый, и на компактный слои, продольное напряжение σ_x , действующее в тонком сечении, было представлено суперпозицией продольных напряжений в слоях σ_x^n и σ_x^k :

$$\sigma_x = \beta_x \sigma_x^n + (1 - \beta_x) \sigma_x^k, \quad (1.17)$$

где $\beta_x = h_x^n / h_x$ – параметр, определяющий положения межслойной границы.

Здесь также было получено уравнение, определяющее предельную плотность ρ_{np} :

$$\frac{\sqrt{3}}{3(1-\rho_0)} \bar{k}_n \rho_{np}^{3/2} (1-\rho_{np})^{-1/2} \{ [3\rho_0\beta_0 + 2(1-\beta_0)]\rho_{np} - \rho_0\beta_0 \} - 2 = 0, \quad (1.18)$$

где $\bar{k}_n = k_n / k_k$.

Было также получено выражение для определения относительного обжатия полосы $\varepsilon_{\Sigma}^{np}$, соответствующего достижению плотности пористого слоя ρ_{np} :

$$\varepsilon_{\Sigma}^{np} = \beta_0 (1 - \rho_0 / \rho_{np}). \quad (1.19)$$

Кулешовым И. Е. [146] была разработана методика расчета энергосиловых параметров прокатки биметаллических материалов из порошков, основанная на допущении о независимом послойном уплотнении компонентов биметалла, определяемом величиной соответствующего максимального давления. Определение давления прокатки биметалла определялось как среднепропорциональное контактных давлений, возникающих в каждом слое:

$$P_{\bar{b}m} = P_m H_m / H_m + P_M H_M / H_m, \quad (1.20)$$

где H_M, H_m – толщина слоев биметалла;

P_M, P_m – давление на соответствующем слое.

Однако допущение о независимом послойном уплотнении биметалла верно лишь при отсутствии межслойных связей между компонентами, которые,

в частности, возникают на определенном этапе деформации. Также не достаточно точным является выражение (1.20), так как в нем используется закон постоянства объемов, а не закон сохранения масс, который является более точным при описании деформирования порошковых материалов.

В работе [147] был исследован CAR (continual annealing and roll-bonding) процесс, заключающийся в нанесении покрытия из порошкового материала при непрерывном отжиге в валках, при этом установлено, что с увеличением проходов уменьшается вытяжка заготовки и улучшается микроструктура листов. Данные исследования свидетельствуют об необходимости учета всех компонент прокатываемой полосы на напряженно-деформированное состояние.

Известна методика определения напряженно- деформированного состояния при прокатке порошковых материалов на металлической подложке [148...153], однако в данных работах не учитывалась возможность пластической деформации металлической подложки.

Одним из технологических приемов при прокатке порошковых материалов является использование скоростной асимметрии процесса, достаточно полно описанной в работах Гогаева К.А. [154; 155]. Hirohata [156] было исследовано напряженное состояние порошка для различных угловых скоростей валков. Авторами этих работ было доказано, что асимметрия прокатки влияет на силу прокатки. Было установлено, что для коэффициента асимметрии 1,33 сила прокатки была снижена на 25% и плотность порошка была увеличена на 15% [156]. В работах [157; 158] установлено влияние скорости подачи порошка в валки на силу прокатки и доказана важность учета данного параметра при моделировании.

Для определения напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при прокатке необходимо описание механических и физических свойств порошкового материала. Такие феноменологические модели механики грунтов как модели Кулона-Мора, Друкера-Прагера, *Cam-Clay* и *CAP* [159...163], широко используются для описания свойств порошков при прокатке. Применение таких моделей поведения порошковых материалов облегчает использование методов конечного элемента.

В работе [164] на основе механики сплошных сред предложена конечно-элементная математическая модель прокатки порошковых материалов. Для описания поведения порошкового материала был использован эллипсоидальный критерий текучести. Учитывая геометрические условия нелинейности, такие как большие перемещения и большие деформации, была получена инкрементная форма реологических свойств на основе обновленной формулировки Лагранжа. Были представлены теоретические и практические основы для трехмерных упругопластических конечных элементов моделирования прокатки порошков.

Wang P. T. и Karabin M. E. исследовали процесс горячей прокатки алюминиевых листов путем применения метода конечных элементов [165]. Было установлено влияние трения, силы подачи на распределение пористости материала по сечению заготовки.

В работах [166...168] сотрудниками Института проблем материаловедения (г. Киев) исследован процесс волочения порошковой проволоки, определено влияние условий деформаций на плотность порошкового сердечника, но задача рассматривалась без учета монометаллической оболочки.

Несмотря на наличие целого ряда работ, посвященных процессу прокатки порошковых материалов, не решена задача об определении напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки. Не учтено влияние упругой деформации металлической оболочки на энергосиловые параметры процесса. Существующие математические модели плющения проволоки описывают поведение только сплошных сред.

В работах [169...172] исследован процесс плющения круглой проволоки из монометалла. Авторами работы [169] определены факторы, влияющие на энергосиловые параметры и геометрические характеристики плющенной ленты. В частности, определено влияние скорости прокатки и радиуса валков. В работах [170; 171] рассмотрены численные математические модели процесса, в работах [171; 172] – модели на основе метода конечных элементов. Определены геометрические характеристики очага деформации, спрогнозирована ширина получаемых лент и уровень энергосиловых параметров. Однако все эти исследования

выполнены для сплошных сред, для пористых материалов механизм деформации носит иной характер. Также на энергосиловые параметры будет оказывать существенное влияние упругая деформация металлической оболочки при её сплющивании рабочими валками, что по своей сути аналогично процессам профилирования, подробно изученному в работах Тришевского О. И. [173; 174] и процессам радиально-ротационного профилирования, теоретические исследования которого представлены в работах Драгобецкого В. В. [175].

Все это свидетельствует о целесообразности проведения дальнейших исследований, направленных на количественное уточнение и качественное расширение результатов математического моделирования и, как следствие, на повышение степени научной обоснованности принимаемых в каждом отдельном случае конкретных практических рекомендаций.

1.5 Перспективы развития технологии и оборудования процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков

Использование длинномерных изделий из металлопорошков при наплавке является одним из эффективных ресурсосберегающих методов регенерации конструктивных размеров и упрочнения нанесением специальных сплавов, которые имеют высокое сопротивление износа и обеспечивают длительное сохранение заданной геометрии рабочего органа. Соответствие регламентаций эксплуатационной надежности наплавленного металла, способности противостоять разным видам износа, выдержки принципов взаимозаменяемости и экономической целесообразности, во многом определяются качеством порошкового электрода и наплавленного им металла. Однако одна из стойких тенденций производства порошковых электродов заключается в том, что их отсортировка, как у изготовителя, так и потребителем является следствием несоответствия их сварочно-технологических свойств выдвигаемым требованиям. С точки зрения показателей качества при реализации традиционных схем общего обжата сердечника и обо-

лочки в двухвалковой клети стана методы прогнозирования степени стабильности их коэффициентов заполнения, геометрических параметров, которые определяют эффективность последующих наплавочных операций, поданы, обычно, на эмпирическом уровне, на обобщении производственного опыта. Главной задачей при этом является сохранение в исходном состоянии частиц упрочнителя, вводимых в сварочную ванну через шихту порошковой электродной ленты [38...40].

Уплотнение сердечника в оболочке является необходимой технологической операцией при производстве порошковой ленты и оказывает решающее влияние на её сварочно-технологические свойства. Уплотнение должно быть дозированным, то есть регламентированным пределом. Этот предел определяется прочностью частиц компонентов сердечника и металла оболочки, а также замкового соединения. Для разных конструкций оболочки величина обжатия должна быть определенной, обеспечивающей достаточное уплотнение сердечника при плотном замковом соединении оболочки. В состав сердечника входят частицы, имеющие более высокие прочностные характеристики, чем у металла оболочки. В этой связи при совместном обжатии оболочки и сердечника в процессе прокатки в двухвалковой клети наблюдается совместная деформация составляющих порошковой ленты. Иногда оболочки деформируется больше, чем компоненты сердечника, что приводит к образованию дефектов (проколов, разрывов). Чем выше твердость и прочность частиц компонентов, тем меньше они подвергаются деформации при создаваемом сжатии, тем труднее достичь необходимого уплотнения сердечника. В процессе прокатки необходимо выполнить следующие требования: компоненты сердечника должны уплотняться и не высыпаться из оболочки при плавлении порошковой ленты, а также должно обеспечиваться постоянство толщины оболочки и размеров частиц компонентов [176]. Поэтому необходимо знать кинетику уплотнения и напряжения, которые возникают при прокатке порошкообразных компонентов в оболочке, а также величину уплотняющей силы прокатки. Это позволит назначить рациональный технологический режим прокатки порошковой электродной ленты.

Для обеспечения более высокого значения коэффициента заполнения (содержание компонентов в оболочке) порошковой электродной ленты рекомендуется работой [177] послойная засыпка компонентов (рис. 1.47). Послойная засыпка компонентов в оболочку, с предварительным уплотнением предыдущего слоя перед засыпкой последующего, обеспечивает более равномерное расположение частиц порошкообразных компонентов по сечению оболочки, увеличивает их количество, снижает пористость сердечника [17]. Известно, что пористость порошкообразных компонентов влияет на электропроводность и теплоперенос [178].

В работе [189] установлено, что наибольшее влияние на коэффициент заполнения оказывают толщина оболочки и сердечника, а также насыпная масса компонентов. Изменяя указанные параметры, можно регулировать величину коэффициента заполнения. Однако каждый параметр порошковой ленты имеет ограничения и не может изменяться беспредельно – тонкая оболочка не обеспечивает достаточной плотности сердечника из-за малой механической прочности металлической ленты. Увеличение толщины оболочки при заданном значении коэффициента заполнения допускает большие значения величины обжатия, что способствует лучшему уплотнению сердечника. Однако рост толщины оболочки ведет к увеличению сварочного тока при наплавке и, как следствие, к увеличению проплавления основного металла. Кроме того, большая толщина оболочки снижает гибкость порошковой ленты, что затрудняет работу подающего механизма наплавочного аппарата. Поэтому в каждом конкретном случае необходимо определять наиболее оптимальные параметры конструкции порошковой ленты, обеспечивающие необходимый коэффициент заполнения, что в свою очередь обеспечит требуемый химический состав наплавленного металла.

Технические условия стандартов ГОСТ 26467-85 и ГОСТ 26101-84, которые распространяется на порошковую ленту и проволоку включают предельные отклонения, позволяющие с помощью вероятностных методов расчета определять необходимую исходную толщину порошкового сердечника при заданных

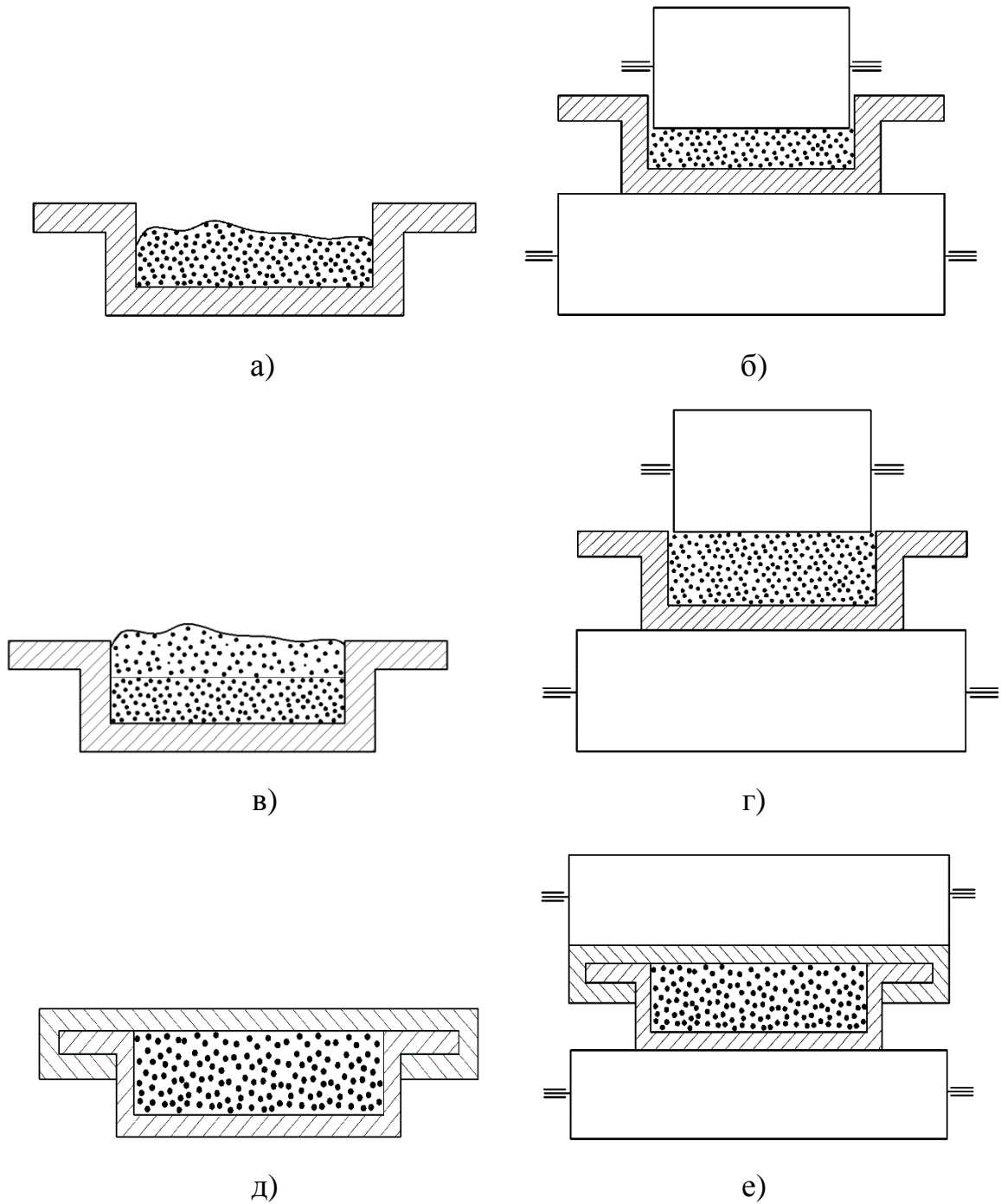


Рисунок 1.47 – Технологическая схема формирования порошковой электродной ленты: а – засыпка слоя шихты в оболочку; б – уплотнение слоя шихты роликом; в – засыпка слоя шихты; г – уплотнение шихты роликом; д – завальцовка замков; е – уплотнение шихты путем прокатки порошковой ленты в двухвалковой клетке

конечной относительной плотности порошка, результирующих размеров и толщины материала оболочки для получения заданного типоразмера порошковых лент и проволок.

В научно-технической литературе недостаточно сведений о методах расчета и способах изготовления порошковых лент и проволоки, необходимых для их автоматизированного расчета и проектирования. Не получили необходимого развития и обобщения методы расчета технологических параметров процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке. В связи с этим проведение комплексных теоретических и экспериментальных исследований, направленных на максимальное уточнение выходных данных, развитие методов прогнозирования, расчета, оптимизации процессов, математических моделей и алгоритмов, технологических приемов, технических и организационных мероприятий, которые развивают известные достижения в отрасли производства длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке, является актуальной задачей, которая имеет для предприятий промышленного комплекса Украины важно научное и практическое значение.

Выводы

1 Дальнейшее повышение эффективности промышленной реализации процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков в оболочке требует всестороннего исследования его особенностей, разработки комплекса математических моделей, позволяющих определять энергосиловые параметры процесса, прогнозировать основные показатели качества готовой продукции, учитывать влияние на них случайных факторов, а также осуществлять автоматизированное проектирование технологических режимов и конструктивных параметров оборудования для изготовления композиционных материалов методами порошковой металлургии.

2 Многообразие различных технологических схем производства длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке и их тесная взаимосвязь между

собой свидетельствуют об актуальности развития обобщенных и по возможности максимально унифицированных математических методов анализа, в полной мере учитывающих требования, а также специфику условий реализации каждого отдельного звена всех технологической цепи.

3 Повышение требований к объемам и степени достоверности результатов математического моделирования напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества обуславливают целесообразность дальнейшего уточнения исходных предпосылок, а также граничных условий в их детерминированном и вероятностном аспектах.

4 Основными направлениями по совершенствованию технологий производства длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке являются рациональный выбор их последовательности, широкое использование новых высокоэффективных технических решений, оптимизация технологических режимов, осуществляемая по обобщенным критериям, а также повышение степени автоматизации регулирования и контроля как исходным, так и результирующим параметрами.

5 С точки зрения перспектив развития механического оборудования для производства длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке следует указать на целесообразность научно и экономически обоснованного использования ряда новых конструктивных исполнений, а также отдельных узлов и механизмов, обеспечивающих, в своей совокупности и сочетании, расширение технологически возможностей по отношению к сортаменту и основным показателям качества готовой продукции. Актуальной в этом случае является и постановка задачи по минимизации удельных капитальных затрат и снижению эксплуатационных расходов, решение которой, в свою очередь, может быть обеспечено за счет развития соответствующих методов расчета и проектирования, а также за счет повышения степени компьютеризации проектно-конструкторских работ.

РАЗДЕЛ 2

ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Расширение сортамента, повышение качества и снижение себестоимости готовой металлопродукции как основное направление научных исследований в области производства длинномерных изделий из металлопорошков

Расширение сортамента, повышение качества и снижение себестоимости готовой металлопродукции делает необходимым проведение всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку рекомендаций по совершенствованию конкретных технологий и оборудования. Также необходимость проведения данных исследований обусловлена наличием ограниченных материальных и финансовых возможностей предприятий металлургического и машиностроительного комплексов Украины и переориентация рынков сбыта продукции.

Отмеченное предъявляет более жесткие требования к объемам и степени достоверности предоставляемой информации, а также к формам и методам проводимых исследований. Одним из таких требований является использование комплексного подхода, в полной мере учитывающего рекуррентный характер всей технологической последовательности производства длинномерных изделий из металлопорошков, при котором результаты анализа одного технологического процесса являются исходными предпосылками для расчета последующего. Целесообразным при этом является использование методов исследований, являющихся для каждого отдельного звена всего передела максимально унифицированными как по схемам решения, так и по объемам исходной и результирующей информации.

Вследствие многовариантности возможных технических решений использование всестороннего и комплексного подхода является необходимым не

только в рамках всего технологического передела, а и в рамках каждой отдельной его составляющей.

В частности, использование в составе порошковых композиций различного сочетания компонентов изменяет его физико-механические свойства, что требует перед описанием напряженно-деформированного состояния при обработке давлением проведения дополнительных экспериментальных исследований для описания свойств порошка. При использовании математических моделей, основанных на одном и том же условии пластичности, эта процедура значительно упрощается.

Использование комплексного подхода является необходимым при анализе каждого отдельно технологического процесса производства длинномерных изделий из металлопорошков, поскольку только одновременный учет всех исходных и результирующих параметров может дать обобщенную оценку экономической эффективности конкретных технических решений и разработанных на их основе рекомендаций.

Для снижения трудоемкости и сроков проведения научных исследований целесообразным является широкое использование теоретических методов анализа, основанных на разработке и численной реализации математических моделей, в достаточной степени полно отображающих реальные физические объекты. Использование различного рода вычислительных экспериментов способствует дифференцированной оценке степени влияния каждого отдельного технологического или конструктивного параметра, обеспечения возможности исследования ряда локальных характеристик очага деформации, комплексной оценки основных показателей качества и т.д.

Использование теоретических подходов является актуальным также с точки зрения исследования ряда новых технологических схем. Результаты же экспериментальных исследований в этом случае могут быть использованы в качестве критериев для оценки степени достоверности полученных теоретических решений, а также для уточнения исходных данных, необходимых для их реализации.

2.2 Выбор методов теоретических исследований

Современные требования, предъявляемые к результатам теоретических исследований, в самом общем случае, и к результатам непосредственного математического моделирования, в частности, делают необходимым проведение предварительного анализа исходных предпосылок при одновременном уточнении граничных условий. Применительно к процессу изготовления порошковых лент и проволоки основные закономерности напряженно-деформированного состояния, а также методики определения физико-механических свойств, геометрических параметров и условий контактного трения в очаге деформации были получены на основе результатов теоретико-экспериментальных методов исследования с их последующим количественным и качественным описанием.

При разработке математических моделей использовали зависимости, которые получены с применением основных положений теории упругости, теории пластичности и теории обработки металлов давлением. Используются элементы теории вероятности и методы математической статистики. В работе представлены расчетные, вероятностные и оптимизационные модели, предназначенные для исследовательской цели и решения практических задач проектирования технологии и оборудования процессов изготовления длинномерных изделий из таллопорошков.

Наличие тенденции по дальнейшему совершенствованию математических методов расчет наряду с интенсивным развитием современных вычислительных средств и повышением степени компьютеризации проектно-технологических и проектно-конструкторских работ делают целесообразным разработку численных математических моделей, основной отличительной чертой которых является возможность максимально более полного и корректного учета реального характера распределений граничных условий очага деформации. Отмеченное наряду с использованием достаточно строго математического аппарата позволяет повысить

точность и расширить объем предоставляемой информации, а это, в свою очередь, способствует повышению степени научной обоснованности разрабатываемых в каждом отдельном случае конкретных практических рекомендаций.

Непосредственно само математическое моделирование было основано на разбиении очага деформации на конечное множество элементарных объемов и последующем совместном решении условий статического равновесия с условием пластичности для сыпучих (порошковый сердечник) или сплошных (металлическая оболочка) сред. Данный метод широко используется при исследовании процессов прокатки порошковых материалов и подтвержден экспериментально в работах В. П. Каташинского, М. Б. Штерна, [140; 141], Г. А. Виноградова [46; 118], Е. Б. Ложечникова [98], К. А. Гогаева [154; 155], В. А. Друянова [135] и др. ученых. Использование метода конечных разностей позволило в полной мере учесть реальный характер распределений геометрических параметров, механических свойств и условий контактного трения, а также деформацию металлической оболочки при производстве длинномерных изделий из металлопорошков.

Для описания напряженно-деформированного состояния при обработке давлением порошковых материалов необходимым является знание зависимостей между напряжениями и плотностью порошковой среды, то есть условия пластичности. Наибольшее распространение при математическом моделировании процессов обработки порошковых материалов получило эллиптическое условие пластичности, сочетающее высокую точность описания с относительной простотой экспериментального определения физико-механических свойств порошковых материалов [129]:

$$f = \frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] + \alpha \cdot (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 - \beta \cdot \sigma_s^2 = 0, \quad (2.1)$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения, действующие на деформируемый порошковый сердечник.

Для оценки правомерности принятых допущений в разработанных двухмерных численных математических моделях, а также для анализа качественных характеристик готовой металлопродукции был использован метод конечных элементов, который в настоящее время является наиболее распространенным методом решения прикладных задач теории обработки металлов давлением [180...182]. Метод заключается в разбиении области Ω на ряд не перекрывающихся подобластей или элементов Ω^e и построение затем аппроксимации функции кусочным образом, т.е. отдельно на каждой подобласти. Тогда используемые в процессе аппроксимации базисные функции также могут быть определены кусочным образом с применением различных выражений для разных подобластей Ω^e , из которых составлена вся область. В таком случае входящие в аппроксимирующие уравнения определенные интегралы могут быть получены простым суммированием их вклада по каждой подобласти или элементу.

Следует отметить, что при решении задач методом конечных элементов используются элементы различных типов. Выбор типа конечного элемента и дискретизация области являются немаловажными этапами решения задачи методом конечных элементов. Процесс дискретизации [182; 183] может быть разделен на два этапа:

- разбиение тела на элементы;
- нумерация элементов и узлов.

Точность метода конечных элементов напрямую зависит от правильного выбора типов и размеров конечных элементов. Так, например, более частая сетка требуется там, где ожидается большой градиент деформаций или напряжений, в тоже время более редкая сетка может применяться в зонах с более или менее постоянными деформациями или напряжениями, а также в областях, не представляющих особого интереса. Форма конечных элементов также влияет на точность вычислений. Следует отметить, что при выборе типа элементов, используемых при решении задачи методом конечных элементов необходимо учитывать геометрические особенности исследуемого изделия.

Главным же недостатком метода конечных элементов следует считать достаточно высокие требования к ресурсам ЭВМ, ведь даже при решении несложных задач с малым количеством элементов происходит большой объем вычислений.

При моделировании процессов деформации порошковых материалов методом конечных элементов используются различные CAE-системы, такие как LS-DYNA, Abaqus, ANSYS, Deform и другие. Наибольшее распространение при решении подобного типа задач получил пакет Abaqus CAE [184] из-за возможности использования различных условий пластичности для пористых материалов, постановки задачи в общем виде, а также возможности исследования многопереходных процессов [183; 185]. Именно этот пакет был использован при моделировании процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков.

Необходимо отметить, что объем проведенных в лабораторных условиях исследований процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков не охватывает весь диапазон технологических режимов, используемых на производстве. Недостаток материальных ресурсов, а также сжатые сроки освоения разработанных рекомендаций привели к необходимости постановки и реализации численного эксперимента. С этой целью и были разработаны конечно-элементные модели, что позволило корректно учесть весь диапазон граничных условий очага деформации, условий внешнего трения [186]. Следует отметить, что данные модели обладают высокой информативностью, так как результаты содержат полную информацию как о геометрических характеристиках, так и распределении основных компонент напряженно-деформированного состояния и плотности по всему объему обрабатываемого материала [186]. Кроме того, применение метода конечных элементов в качестве численного эксперимента позволило оценить степень достоверности, полученных ранее теоретических решений на основе численных моделей.

Для оценки регламентируемых стандартами качественных характеристик в их вероятностном аспекте и уменьшении затрат на экспериментальные исследова-

дования были разработаны имитационные модели, представляющие собой сочетание полученных математических моделей процессов, генерирования псевдослучайных чисел, итерационного решения упруго-пластической задачи системы рабочая клетка-заготовка и блока статистической обработки, объединенных общей стратегией Монте-Карло [187].

На основе полученных детерминированных численных и имитационных математических был разработан комплекс программных средств по автоматизированному расчету напряженно-деформированного состояния, проектированию технологических режимов, конструктивных параметров механического оборудования и прогнозированию основных показателей качества при реализации процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков.

Результаты численной реализации полученных математических моделей и соответствующих им программных средств были использованы для анализа влияния, а также для разработки рекомендаций по совершенствованию технологических режимов и конструктивных параметров механического оборудования для производства длинномерных изделий из металлопорошков, обеспечивающих достижения цели и решение задач данного исследования.

2.3 Выбор методов экспериментальных исследований

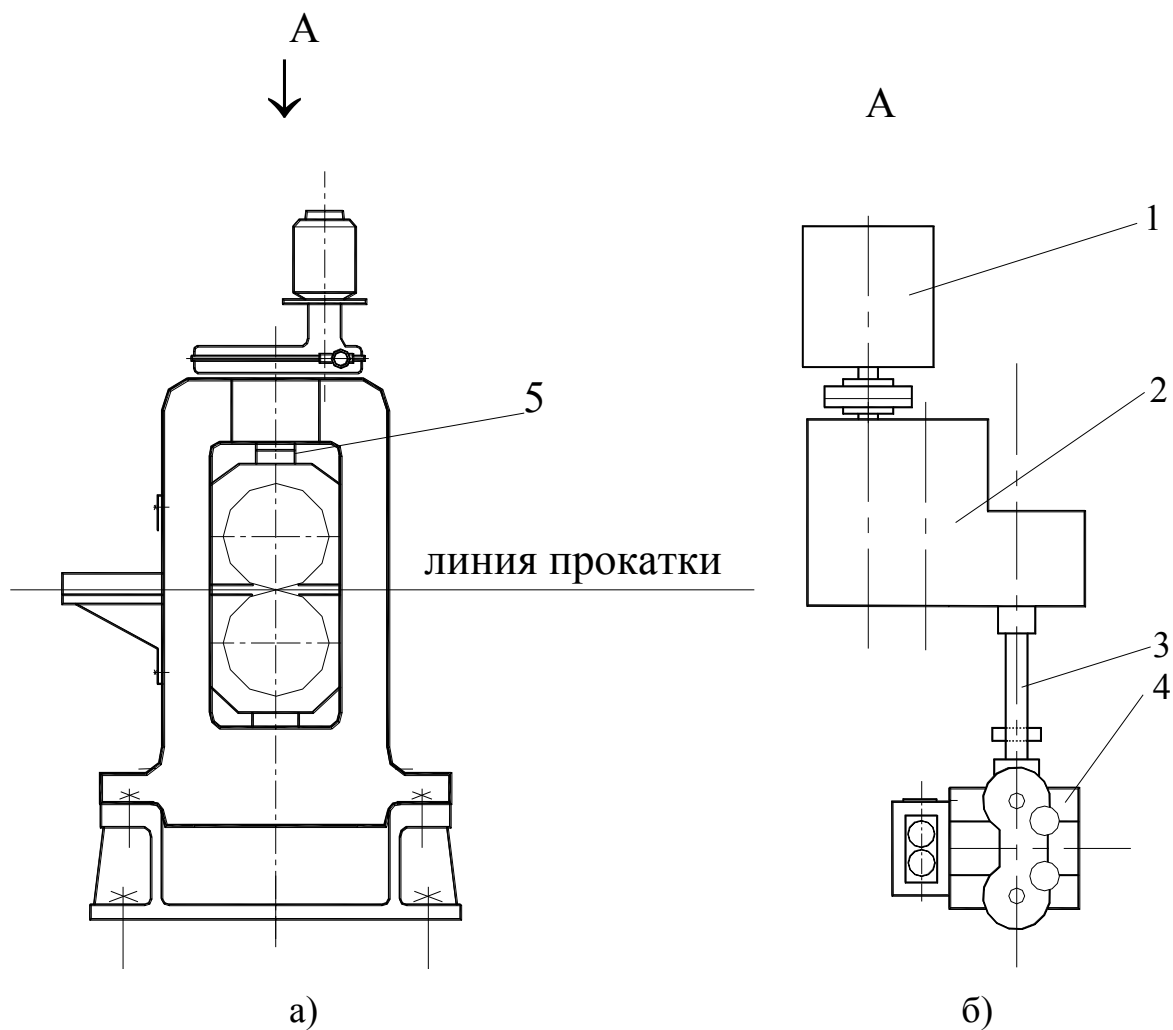
Основной целью экспериментальных исследований являлись оценка степени достоверности полученных математических моделей и уточнение исходных данных для их численной реализации.

В работе были проведены эксперименты по определению физико-механических свойств порошков различного состава. Несмотря на наличие целого ряда чисто теоретических разработок [129, 188], непосредственное определение функциональных связей $\alpha(\gamma)$, $\beta(\gamma)$ и $\sigma_s(\gamma)$ осуществляют, преимущественно, на основе экспериментальных методов исследования. Полученные же в этом случае результаты для некоторых достаточно широко используемых в промышленной

практике композиций представлены в работах [129, 189...191] в виде соответствующих количественных и графических интерпретаций. Вместе с тем, использование новых материалов делает необходимым и определение соответствующих им эмпирических оценок.

С учетом изложенного выше, а также в соответствии с рекомендациями работы [129, 192, 193] экспериментальный метод исследования был использован и в ходе настоящего исследования применительно к определению физико-механических свойств порошковых материалов. Технологическая сущность исследований заключалась в прессовании соответствующего порошкового состава в закрытой матрице при различных, варьируемых по величине, значениях полных сил Y . Причем прессование производили винтом нажимного механизма в станине рабочей клетки промышленно-лабораторного прокатного стана 200×260 кафедры АММ Донбасской государственной машиностроительной академии (рис. 2.1).

Экспериментальная установка (рис. 2.2) [194] включала в себя верхний 1 и нижний 2 пуансоны, которые установлены на центрирующем стержне 4 и расположены в плавающей разъемной матрице 3, закрепленную на пружинах 5. Внутренний диаметр разъемной матрицы составил 40,15 мм, а наружный диаметр центрирующего стержня на его рабочей поверхности – 16,15 мм. Для уменьшения степени влияния сил внешнего трения указанные поверхности, а также соответствующие рабочие поверхности верхнего и нижнего пуансонов были шлифованы и после каждой прессовки тщательно обезжиривались. Надежное сопряжение двух половин разъемной матрицы осуществлялось при помощи болтовых соединений 6, штифтов 7 и бронзовых сферических шайб 8, обеспечивающих самоустановку болтов 6. Месдозы 9 представляли собой кольцевые упругие элементы, размещенные между шайбой болтового соединения и разъемной матрицей, при помощи которых производится измерение радиальной составляющей силы прессования. Наклейку тензометрических датчиков сопротивления, а также их последующее соединение в мостовую схему производили в полном соответ-

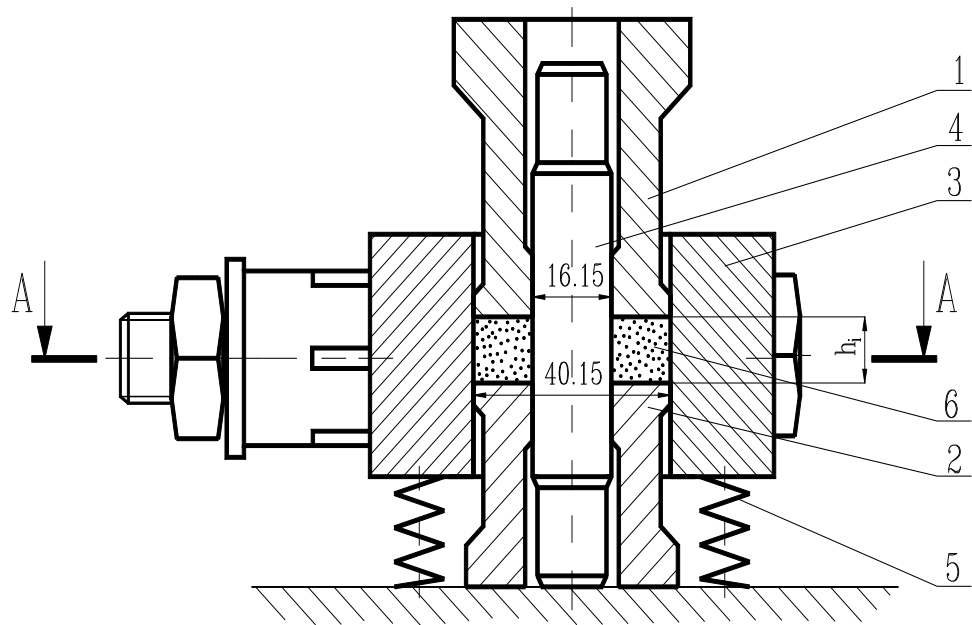


1 – электродвигатель; 2 – комбинированная шестеренная клетка-редуктор;

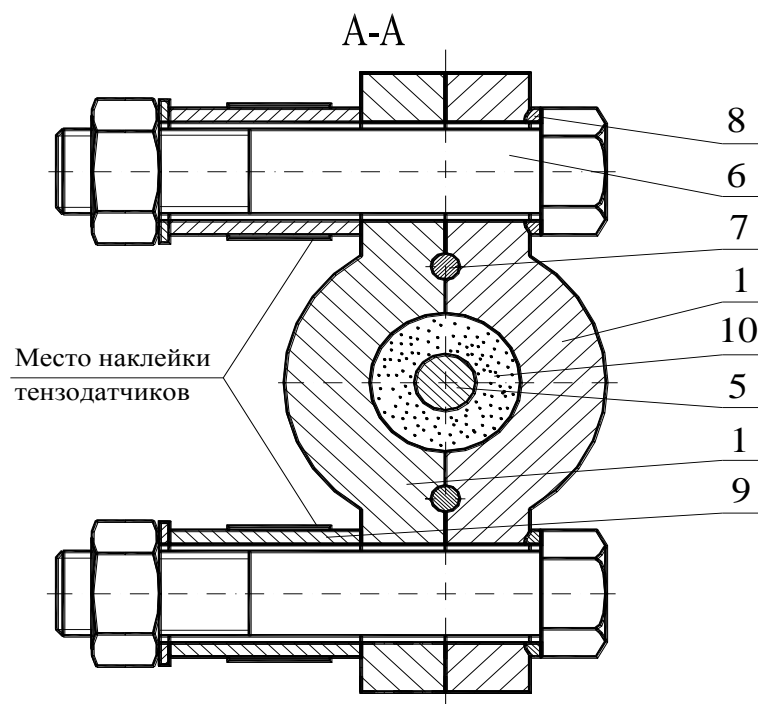
3 – шпиндельные устройства; 5 – месдоза

Рисунок 2.1 – Схема промышленно-лабораторного прокатного стана

260×200 кафедры АММ ДГМА:



а)



б)

- 1 – верхний пуансон; 2 – нижний пуансон; 3 – разъемная матрица;
 4 – центрирующий стержень; 5 – пружины; 6 – болтовые соединения;
 7 – штифты; 8 – бронзовые сферические шайбы; 9 – месдозы;
 10 – порошковая заготовка

Рисунок 2.2 – Схема экспериментальной установки: а – общий вид установки; б – разрез А-А по оси установки;

ствии с рекомендациями работы [195]. Тарировку месдоз для измерения радиальной составляющей силы прессования осуществляли на отдельном гидравлическом прессе путем имитационного нагружения силой известной величины. Погрешность показаний измерительной схемы в этом случае не превысила 8 %.

С целью качественной и количественной оценки разработанных математических моделей и разработанного на его основе комплекса программных средств в работе был проведен комплекс экспериментальных исследований процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков.

Экспериментальные исследования интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых лент и плющени порошковых проволок были проведены путем физического моделирования данной технологической схемы на лабораторном стане 100x100 Г кафедры АММ Донбасской государственной машиностроительной академии, общий вид и состав оборудования которого представлены на рисунках 2.3 и 2.4. Главная линия рабочей клетки стана включает в себя мотор–редуктор 1 типа МЦ 2С-63 ($n=40$ об/мин), моторную муфту 2, одноступенчатый цилиндрический зубчатый редуктор 3 с передаточным отношением 4,0, промежуточную муфту 4, шестеренную клеть 5, универсальные шпиндели 6 на подшипниках качения, механизм 7 их пружинного уравнивания и двухвалковую рабочую клеть 8. Общий вид и конструкция рабочей клетки данного стана иллюстрированы рисунком 2.5.

Оборудование рабочей клетки 8 включало в себя нижний 1 и верхний 2 рабочие валки с номинальными значениями диаметров и длин бочек по 100 мм. Посредством двухрядных сферических подшипников 3 шейки рабочих валков фиксировали в соответствующих подушках 4, 5 между которыми с целью уравнивания верхнего рабочего валка 2 размещали резиновые прокладки 6. Рабочие валки были изготовлены из стали 9Х с твердостью образующих поверхности бочек $\approx 85HS$ и шероховатостью $1,25\sqrt{\Gamma}$.

Подушки 4 нижнего 1 и подушки 5 верхнего 2 рабочих валков размещали в направляющих окнах узла станин 7 (см. рис. 2.5), при этом в вертикальной

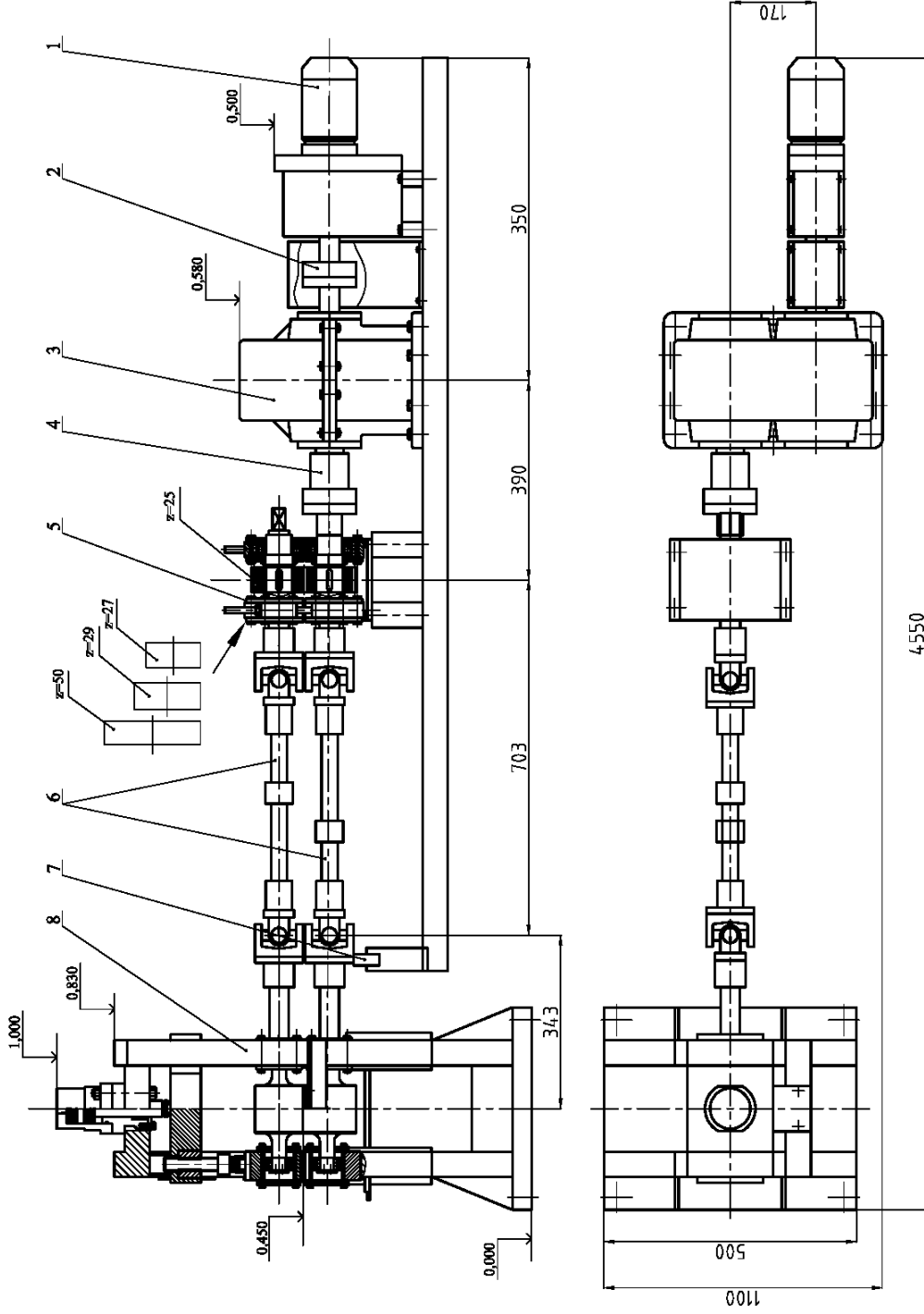


Рисунок 2.4 – Состав и план расположения оборудования главной линии рабочей клетки лабораторного прокатного мини-стана 100x100 Г ДГМА



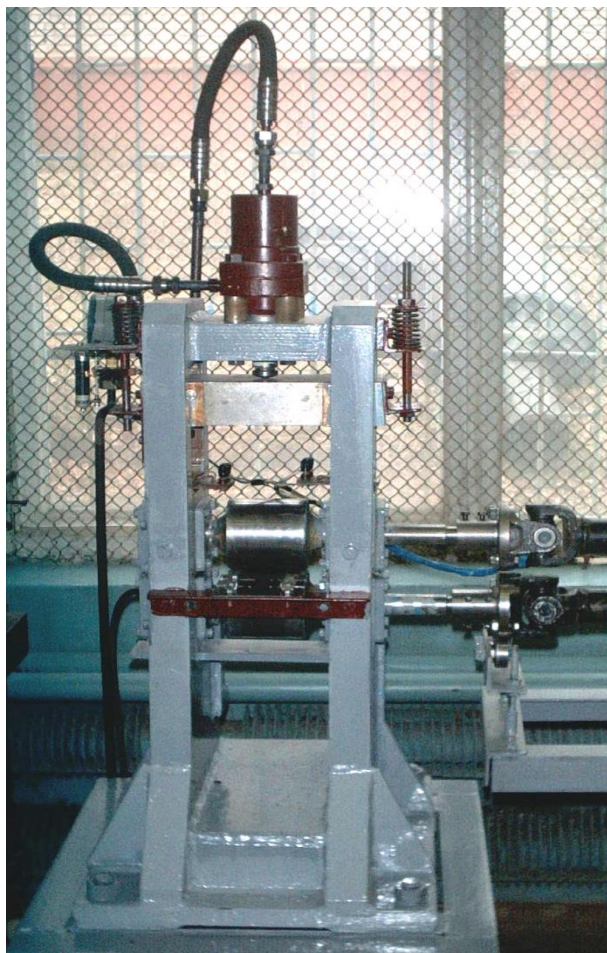
Рисунок 2.3 – Общий вид оборудования лабораторного прокатного мини-стана 100x100 Г кафедры АММ ДГМА

плоскости подушки 4 нижнего рабочего валка 1 фиксировали нижними поперечинами данного узла, а подушки 5 верхнего рабочего валка 2 – через кольцевые упругие элементы месдоз 8 и сферические тела качения 9 сопрягают с нажимными винтами 10 механической части нажимного механизма. Бронзовые гайки 11 данного механизма, имеющие метрические резьбовые нарезки с шагом 3 мм, фиксировали в расточках промежуточной подвижной траверсы 12, размещенной по аналогии с подушками 4, 5 рабочих валков 1, 2 в направляющих окнах узла станин 7. В случае регулирования величины предварительного межвалкового зазора с использованием только механической части нажимного механизма промежуточную подвижную траверсу 12 фиксируют в вертикальной плоскости при помощи дополнительных проставок 13, сопрягаемых с верхними поперечинами узла станин 7.

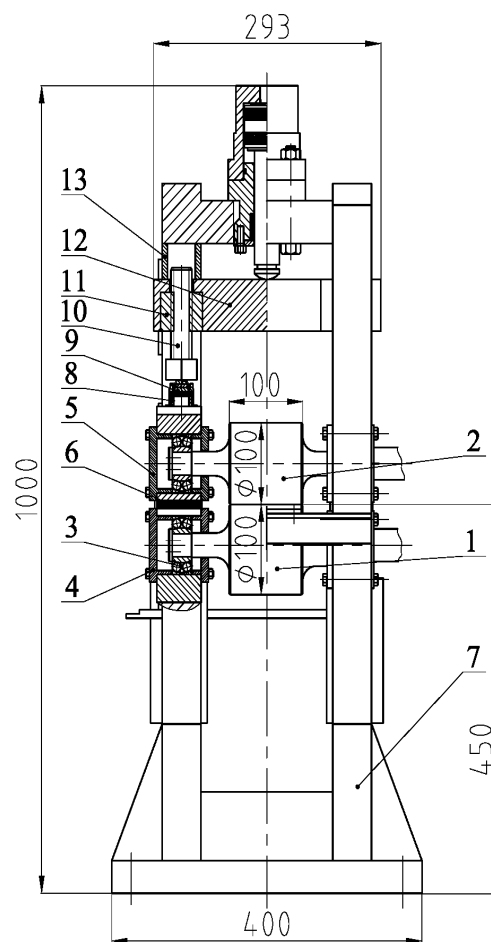
Помимо механической части конструкция нажимного механизма рабочей клетки лабораторного мини-стана 100x100Г ДГМА (см. рис. 2.5) включает в себя и гидравлическую часть, выполненную в виде гидроцилиндра 14 поршневого типа, корпус 15 которого размещен неподвижно в расточке верхней траверсы узла станин 7, а штоковый элемент 16 сопряжен с верхней опорной поверхностью промежуточной подвижной траверсы 12. Гидравлическая часть была использована для силовой разгрузки дополнительных проставок 13, для непосредственного регулирования величины предварительного межвалкового зазора с достаточно высоким быстродействием. Учитывая возможность перемещения промежуточной траверсы 12 в вертикальной плоскости при подаче рабочей жидкости в поршневую или в штоковую полости гидроцилиндра 14, ее снабжали пружинным механизмом уравнивания 17, а также датчиком линейных перемещений 18 реостатного типа (см. рис. 2.5).

С учетом технических характеристик оборудования главной линии рабочей клетки лабораторного прокатного мини-стана 100x100Г ДГМА (см. рис. 2.5) окружная скорость вращения рабочих валков составила порядка $\approx 50 \text{ мм/с}$. При этом для создания и экспериментального исследования асимметричных по кинематике условий реализации процесса прокатки порошковых лент конструкция

шестеренной клетки 5 главной линии предполагала возможность перехода на одноступенчатый цилиндрический редуктор со сменными ведомыми зубчатыми колесами.



а)



б)

Рисунок 2.5– Общий вид (а) и конструкция (б) рабочей клетки лабораторного прокатного мини-стана 100x100 Г ДГМА

Измерение сил, действующих на рабочие валки, производили при помощи месдоз с кольцевым упругим элементом, размещенных между подушками и нажимными винтами. Тарировку кольцевых месдоз осуществляли на расположенном в непосредственной близости от установки специальном гидравлическом прессе (рис. 2.6) путем их попарного имитационного нагружения силой известной величины без разборки коммутационной электрической цепи подключения датчиков к аналогово-цифровому преобразователю.



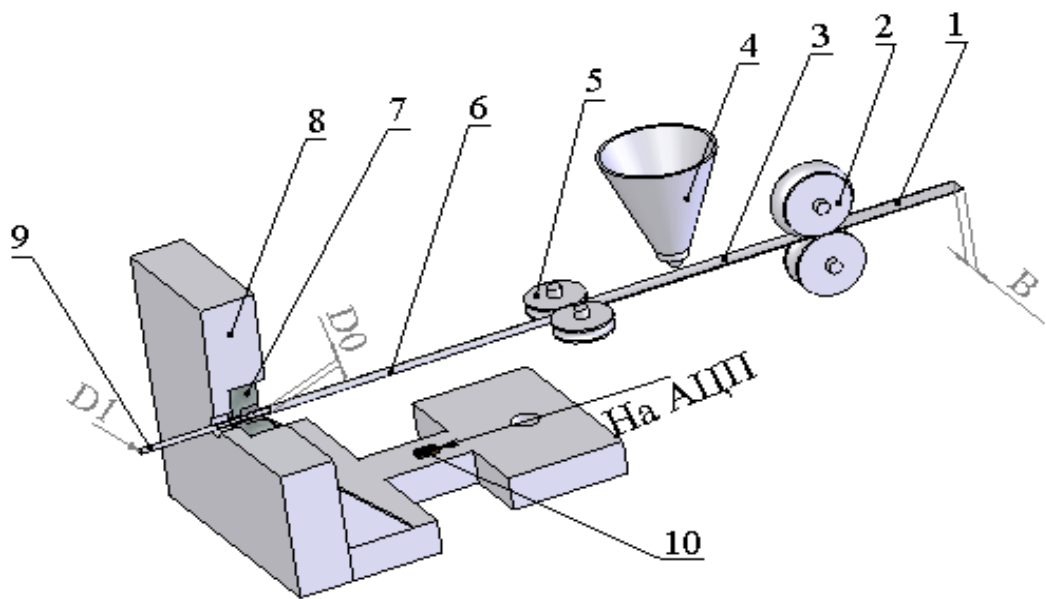
Рисунок 2.6– Схема тарировки кольцевых месдоз на гидравлическом прессе

Запись текущих во времени значений всех регистрируемых параметров производили при помощи многофункционального модуля АЦП-ЦАП m-DAQ12, который подсоединяется к ПК через USB-интерфейс (HighSpeed). Подключение сигналов осуществляли через разъем, расположенный на боковой стенке модуля. Их последующую расшифровку осуществляли с использованием ЭВМ путем аналитической интерпретации соответствующих тарировочных графиков. Степень несоответствия показаний при тарировке в относительном измерении не превысила $\pm 8 \%$.

Экспериментальное исследование процесса волочения порошковых проволок производили на специальном волочильном однобарабанном стане (рис. 2.7). Процесс волочения осуществляли следующим образом: холоднокатаную металлическую ленту 1 шириной B , подавали в профилигибочное устройство 2, с одновременным дозированием шихты из автоматического дозатора 4 и последующего формирования ленты в калиброванных роликах 5 в исходную трубчатую заготовку 6 диаметром D_0 . Затем в волокодержатель 8 подавали заготовку порошковой проволоки, представляющую собой свернутую в трубку холоднокатаную



а)



б)

Рисунок 2.7– Общий вид установки (а) и схема измерительного блока (б) при исследовании волочения порошковой проволоки

металлическую ленту, полость которой заполнена смесью порошкообразных материалов, определенного состава (рис. 2.7, б). В дальнейшем осуществляли волочение проволоки до необходимого диаметра D_1 . Перед каждым проходом производили замеры исходных диаметров порошковой проволоки \varnothing . По окончании эксперимента измеряли абсолютное удлинение порошковой проволоки и абсолютное утонение оболочки. Силу волочения порошковой проволоки (рис. 2.7) при каждом переходе измеряли при помощи тензодатчиков собранных по мостовой схеме на волочильной плите, показание регистрировали с помощью тензостанции подключенной через АЦП к лабораторному стану.

Обработку результатов экспериментальных исследований, проводимых и в промышленных, и в лабораторных условиях, производили на основе общепринятых методов теории вероятности и математической статистики.

Выводы

1 Необходимость повышения степени научной обоснованности технических решений, принимаемых в области производства длинномерных изделий из металлопорошков, неразрывно связана с проведением широкого круга всесторонних теоретических и экспериментальных исследований, направленных на развитие методов расчета и разработку рекомендаций по совершенствованию конкретных технологий и оборудования. При этом, одним из основных требований, предъявляемых к объему и характеру данных исследований, является использование комплексного подхода, в полной мере учитывающего особенности и взаимосвязи отдельных звеньев всей технологической цепи конкретного производства.

2 В основу теоретических исследований процессов производства длинномерных изделий из металлопорошков должны быть положены методы теории упругости и пластичности, методы теории вероятности и математической статистики, а также методы теории исследования операций, включающее в себя решение задач оптимизации и имитационного моделирования.

3 Уточнение исходных данных, а также оценка степени достоверности полученных теоретических решений и разработанных с их использованием практических рекомендаций могут быть осуществлены на основе результатов экспериментальных исследований, проведенных в лабораторных и промышленных условиях. Целесообразной в этом случае является и разработка принципиально новых экспериментальных установок, обеспечивающих снижение трудоемкости, расширение объемов и повышение точности проводимых исследований за счет рационального изменения масштабов при физическом моделировании различных технологических процессов.

РАЗДЕЛ 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЯ ПЛАСТИЧНОСТИ ПРИ ОПИСАНИИ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

3.1 Использование условия пластичности для пористых тел при моделировании процессов изготовления порошковых лент и проволоки

Одним из условий, описывающим напряженно-деформированное состояние при обработке давлением порошковых материалов является условие пластичности, которое описывает взаимосвязь между главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и относительной плотностью порошкового материала γ_x .

Для определения величины главного напряжения σ_2 в случае плоской деформации, то есть для процессов прокатки, воспользуемся основными уравнениями теории течения пористых материалов, а именно, зависимостями между главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и главными скоростями $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ пластической деформации [129]:

$$\dot{\varepsilon}_1 = 3\dot{\lambda} \left[\sigma_1 - (1 - 2\alpha) \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right]; \quad (3.1)$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = 3\dot{\lambda} \left[\sigma_2 - (1 - 2\alpha) \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right]; \quad (3.2)$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = 3\dot{\lambda} \left[\sigma_3 - (1 - 2\alpha) \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right], \quad (3.3)$$

где $\dot{\lambda}$ – множитель Лагранжа.

Зависимость скорости объемной пластической деформации от напряжений [129]:

$$\dot{\varepsilon}_v = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 + \dot{\varepsilon}_3 = 6\dot{\lambda}\alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (3.4)$$

Подставляя выражения (3.1) ... (3.3) в зависимость (3.4), учитывая, что в силу предположения о плоском деформированном состоянии, реализующемся в зоне очага деформации, когда $\dot{\varepsilon}_2 = 0$, получим:

$$3\dot{\lambda} \left[\sigma_1 - (1-2\alpha) \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} + \sigma_3 - (1-2\alpha) \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \right] = 6\dot{\lambda}\alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (3.5)$$

Преобразовываем выражение:

$$\sigma_1 + \sigma_3 - \frac{2}{3}(1-2\alpha)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = 2\alpha(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3). \quad (3.6)$$

Вынося главные напряжения за скобки, получаем:

$$\sigma_1 \left(\frac{3-2+4\alpha-6\alpha}{3} \right) + \sigma_3 \left(\frac{3-2+4\alpha-6\alpha}{3} \right) = \sigma_2 \left(\frac{2-4\alpha+6\alpha}{3} \right). \quad (3.7)$$

Далее

$$\sigma_1(1-2\alpha) + \sigma_3(1-2\alpha) = 2\sigma_2(1+\alpha). \quad (3.8)$$

Отсюда

$$\sigma_2 = \frac{1-2\alpha}{2(1+\alpha)}(\sigma_1 + \sigma_3). \quad (3.9)$$

В случае прокатки порошковых лент и плющения порошковой проволоки, то есть в случае плоского напряженного состояния [196] главные напряжения в эллиптическом условии пластичности (2.1) равны

$$\sigma_1 = p_x, \sigma_2 = \frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x + \sigma_x), \sigma_3 = \sigma_x, \quad (3.10)$$

где индекс x означает текущее значение параметра вдоль оси прокатки;

σ_x, p_x – нормальные и нормальные контактные напряжения.

Подставив главные напряжения в условие пластичности (2.1) получим:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \left[\left\{ p_x - \frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x + \sigma_x) \right\}^2 + \left\{ \frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x + \sigma_x) - \sigma_x \right\}^2 + (\sigma_x - p_x)^2 \right] + \\ & + \alpha_x \left[p_x + \frac{1-2\alpha_x}{2(1+\alpha_x)}(p_x + \sigma_x) + \sigma_x \right]^2 = \beta_x \sigma_{sx}^2. \end{aligned} \quad (3.11)$$

После упрощений и преобразований условие пластичности для пористых материалов для плоского напряженного состояния будет иметь вид [196...199]:

$$p_x^2 - 2 \frac{1-2\alpha_x}{1+4\alpha_x} p_x \sigma_x + \sigma_x^2 = \frac{4}{3} \frac{1+\alpha_x}{1+4\alpha_x} \beta_x \sigma_{sx}^2. \quad (3.12)$$

Для определения величины относительной плотности γ_x также воспользуемся основными уравнениями теории течения пористых материалов, а именно, зависимостями между главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и главными скоростями $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ пластической деформации (3.1)-(3.3). Учитывая равенство отношений главных деформаций и главных скоростей деформаций, преобразовываем выражения к следующему виду [129]:

$$\frac{\dot{\varepsilon}_1}{\dot{\varepsilon}_3} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \frac{\sigma_1 - (1-2\alpha)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\sigma_3 - (1-2\alpha)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}. \quad (3.13)$$

В силу предположения о плоском деформированном состоянии будут иметь силу соотношения $\varepsilon_1 = \varepsilon_h$; $\varepsilon_2 = 0$; $\varepsilon_3 = \varepsilon_x$; $\sigma_3 = \sigma_x$; $\sigma_1 = p_x$; $\sigma_2 = (1 - 2\alpha)(p_x + \sigma_x)/[2(1 + \alpha)]$.

С учетом этого соотношение главных деформаций [200]:

$$\frac{\varepsilon_h}{\varepsilon_x} = \frac{p_x(1 + 4\alpha_x) - \sigma_x(1 - 2\alpha_x)}{\sigma_x(1 + 4\alpha_x) - p_x(1 - 2\alpha_x)}. \quad (3.14)$$

Переходя к параметрам напряженно-деформированного состояния выделенного элементарного объема, получим:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x(1 + 4\alpha_x) - p_x(1 - 2\alpha_x)}{p_x(1 + 4\alpha_x) - \sigma_x(1 - 2\alpha_x)} \frac{h_{x1} - h_{x2}}{h_{x1}}, \quad (3.15)$$

где h_{x1}, h_{x2} – толщины полосы на входе и выходе из элементарного объема очага деформации.

Необходимо заметить, что закон сохранения объема не имеет силы в случае прокатки порошковых материалов, вследствие их уплотняемости, поэтому для проведения дальнейших преобразований используем закон сохранения массы [129]. С учетом этого, выражение для относительной плотности записывается следующим образом [196]:

$$\gamma_{x2} = \gamma_{x1} \frac{h_{x1}}{h_{x2}(1 + \varepsilon_x)}. \quad (3.16)$$

В случае волочения порошковой проволоки, то есть в случае осесимметричного напряженного состояния главные напряжения в уравнении

(2.1) равны [200] $\sigma_1 = \sigma_x$; $\sigma_2 = \sigma_3 = p_x$. Подставив эти данные в уравнение (2.1) получим

$$f = \frac{1}{2}[(\sigma_x - p_x)^2 + (p_x - \sigma_x)^2] + \alpha_x(\sigma_x + 2p_x)^2 - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0. \quad (3.17)$$

Проведя математические преобразования, получим [201, 202]

$$\frac{1}{2}[\sigma_x^2 - 2\sigma_x p_x + p_x^2 + p_x^2 - 2p_x\sigma_x + \sigma_x^2] + \alpha_x\sigma_x^2 + 4p_x\sigma_x\alpha_x + 4p_x^2\alpha_x - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0;$$

$$\sigma_x^2 + p_x^2 - 2\sigma_x p_x + \alpha_x\sigma_x^2 + 4\alpha_x p_x^2 + 4\alpha_x p_x\sigma_x - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0;$$

$$\sigma_x^2(1 + \alpha_x) + p_x^2(1 + 4\alpha_x) - 2\sigma_x p_x(1 - 4\alpha_x) - \beta_x\sigma_{sx}^2 = 0;$$

$$\sigma_x^2 - 2\sigma_x p_x \frac{1 - 4\alpha_x}{1 + \alpha_x} + p_x^2 \frac{1 + 4\alpha_x}{1 + \alpha_x} = \frac{1}{(1 + \alpha_x)} \beta_x \sigma_{sx}^2. \quad (3.18)$$

Воспользовавшись зависимостями между главными скоростями пластической деформации и главными напряжениями, предоставляемыми теорией течения пористых материалов [129], соотношение скоростей, а вместе с этим и соотношение показателей соответствующих деформаций $\varepsilon_1 / \varepsilon_3$ может быть определено как:

$$\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_3} = \frac{\sigma_1 - (1 - 2\alpha)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}{\sigma_3 - (1 - 2\alpha)(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3}, \quad (3.19)$$

где учитывая то, что применительно к рассматриваемой осесимметричной схеме нагружения в силу принятых допущений имеет место выполнение

соотношений $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \varepsilon_{dx}$; $\varepsilon_1 = \varepsilon_{Lx}$; $\sigma_2 = \sigma_3 = p_x$; $\sigma_1 = \sigma_x$, искомая величина соотношения показателей степени деформации $\varepsilon_L / \varepsilon_d$ может быть выражена зависимостью следующего вида:

$$\frac{\varepsilon_{Lx}}{\varepsilon_{dx}} = \frac{\sigma_x - (1 - 2\alpha_x)(2p_x + \sigma_x)/3}{p_x - (1 - 2\alpha_x)(2p_x + \sigma_x)/3}. \quad (3.20)$$

Соответственно показатель степени деформации ε_{Lx} будет равен [200]

$$\varepsilon_{Lx} = 2 \frac{\sigma_x(1 + \alpha_x) - p_x(1 - 2\alpha_x)}{p_x(1 + 4\alpha_x) - \sigma_x(1 - 2\alpha_x)} \cdot \frac{F_{x1}}{F_{x1} - F_{x2}}, \quad (3.21)$$

где F_{x1}, F_{x2} – площади поперечного сечения проволоки на входе и выходе из элементарного объёма очага деформации.

С учётом этого в рамках каждого отдельного элементарного объёма согласно закону сохранения массы результирующая относительная плотность порошкового материала будет соответствовать:

$$\gamma_{x2} = \gamma_{x1} F_{x1} / [F_{x2}(1 + \varepsilon_{Lx})], \quad (3.22)$$

где γ_{x1}, γ_{x2} – относительная плотность порошкового материала на входе и выходе из элементарного объёма очага деформации.

Полученные зависимости легли в основу математических моделей процессов прокатки порошковых лент [203], плющения [204] и волочения [200] порошковой проволоки.

3.2 Экспериментальное определение физико-механических свойств порошков различного состава

В настоящее время появляется множество порошков разнообразного состава, описание процесса деформации которых требует проведения дополнительных экспериментов. Одними из основных характеристик, используемых при расчете различных технологических процессов обработки порошковых материалов, являются функциональные связи коэффициентов условия пластичности (2.1) и относительной плотности, т.е. функциональные связи $\alpha(\gamma)$, $\beta(\gamma)$ и $\sigma_s(\gamma)$.

В частности, применительно к процессам прокатки порошковых материалов знание количественных оценок указанных выше функциональных связей является необходимым для расчета как локальных, так и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния, а, следовательно, и для расчета всего комплекса основных технологических параметров.

Конструкция экспериментальной установки для определения физико-механических свойств порошковых материалов представлена на рисунке 2.2, а общий вид – на рисунке 3.1. Установка размещалась в рабочей клетке прокатного стана между нажимным винтом и подушкой рабочего вала (рис. 2.1, 2.2, 3.2) [206; 207].

Преимуществом использования конструкции данной экспериментальной установки является повышение точности эксперимента за счет применения вместо штифтовой месдозы [129] – месдозы с полым цилиндрическим упругим элементом, а также применение сердечника, с помощью которого исключается влияние касательных контактных напряжений на поверхности испытуемой заготовки.

Тарировку месдоз для измерения радиальной составляющей силы прессования производили на отдельном гидравлическом прессе путем имитационного нагружения силой известной величины. При определении в ходе экспериментальных исследований усилия прессования было также учтена

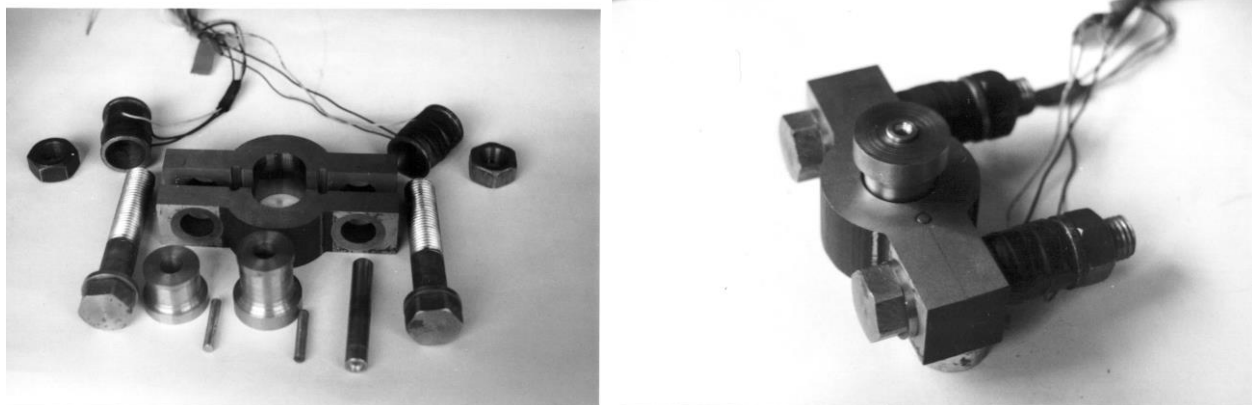


Рисунок 3.1 – Общий вид экспериментальной установки для определения физико-механических свойств порошковых материалов

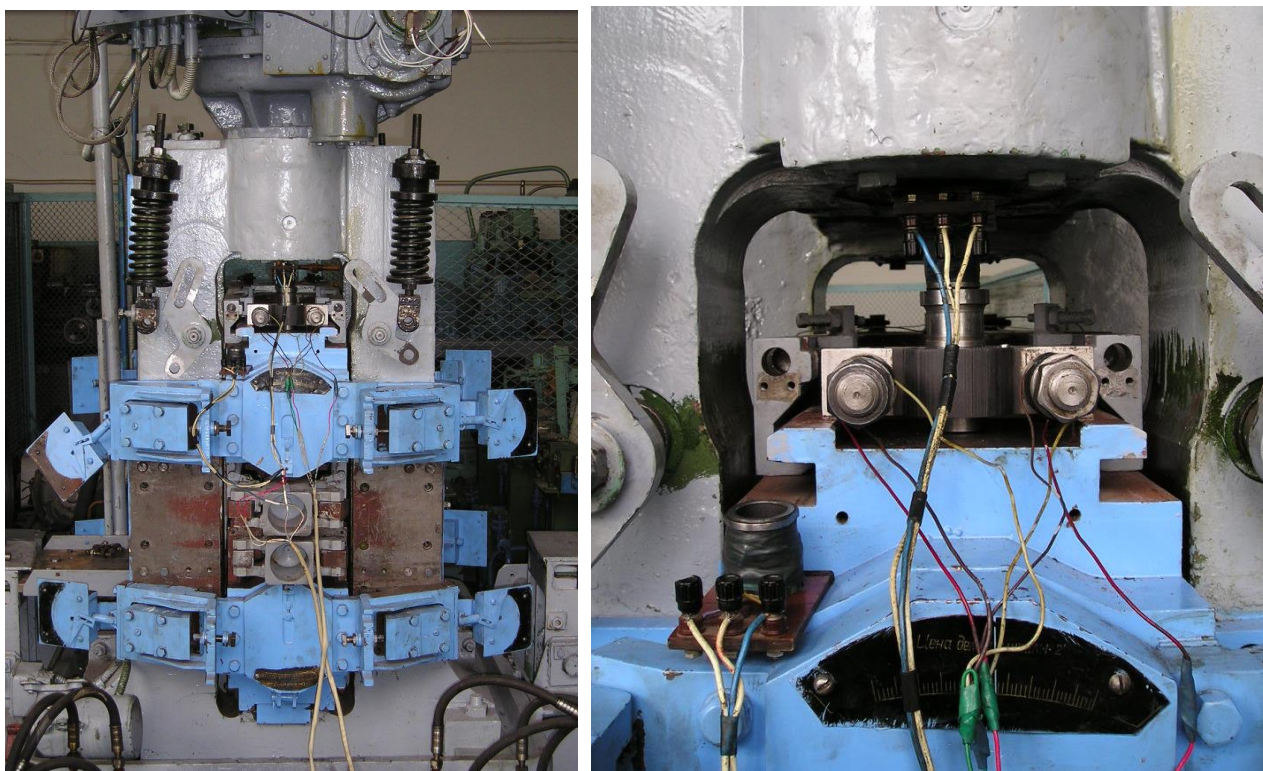


Рисунок 3.2 – Общий вид экспериментальной установки для определения физико-механических свойств порошковых материалов, размещенной в станине рабочей клетки прокатного стана

упругая деформация рабочей клетки прокатного стана, для чего была дополнительно определена её жесткость.

Устройство работает следующим образом: под действием прессующего механизма верхний пуансон 3 (см. рис. 2.2) воздействует на порошковую композицию известной силой Y , под действием которой происходит деформация порошкового материала, которая, в свою очередь, вызывает радиальную силу F , измеряемую при помощи месдоз 9 (см. рис. 2.2). Непосредственно нормальные контактные p_i напряжения определяют в этом случае по формуле [129; 205]:

$$p_i = \frac{4Y_i}{\pi(D_M^2 - D_C^2)}. \quad (3.23)$$

Касаясь определения радиальных напряжений σ_{ri} , рассмотрим условие равновесия при проецировании всех сил на горизонтальную плоскость (рисунок 3.3):

$$\begin{aligned} F_i &= \int_0^\pi \sigma_{ri} \cdot \sin \alpha \cdot R \, d\alpha \cdot h_i = \sigma_{ri} \cdot (-\cos \alpha) \cdot R \Big|_0^{180} \cdot h_i = \\ &= 2 \cdot \sigma_{ri} \cdot R \cdot h_i = \sigma_{ri} \cdot D_M \cdot h_i, \end{aligned} \quad (3.24)$$

откуда с учетом известного измеренного значения F_i величина σ_{ri} соответствует:

$$\sigma_{ri} = \frac{F_i}{h_i D_M}. \quad (3.25)$$

Определение коэффициента α_i осуществляется по формуле [129]:

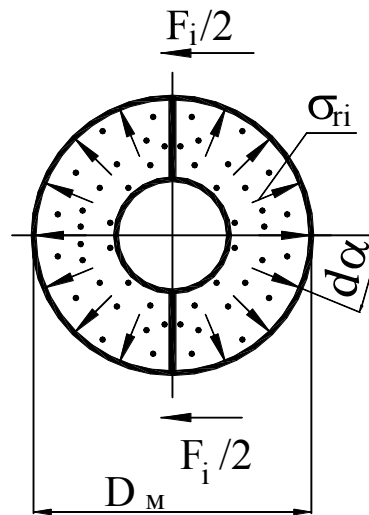


Рисунок 3.3 – Расчетная схема для определения радиальных напряжений

$$\alpha_i = \frac{1 - \sigma_{ri} / p_i}{2(1 + 2\sigma_{ri} / p_i)}. \quad (3.26)$$

Коэффициенты β и σ_s определяются по следующей зависимости [129]:

$$\beta_i \sigma_s^2 = \frac{9\alpha_i}{1 + 4\alpha_i} p_i^2, \quad (3.27)$$

где последующее определение коэффициента β_i осуществляется на основе метода наименьших квадратов, исходя из допущения о постоянстве значения σ_s .

Затем производилось измерение геометрических характеристик и массы получаемого образца, определяли значения его абсолютной и относительной плотности.

В качестве примера в приложении А приведена методика и результаты определения механических свойств порошка на основе меди.

Выводы

1 Уточнено условие пластичности порошковых материалов для плоского и осесимметричного напряженного состояния, которое возникает при прокатке и волочении, за счет приближения к реальным взаимосвязей между напряжениями, деформациями и плотностью пористых тел, что позволило повысить точность расчета напряженно-деформированного состояния при реализации данных процессов.

РАЗДЕЛ 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПОРОШКОВЫХ ЛЕНТ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

4.1 Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при первичной (уплотняющей) прокатке порошкового сердечника в металлической оболочке

В соответствие с основными тенденциями развития методов расчета процесса прокатки [208...210], и по аналогии с методиками работ [140; 141; 211...213], решение задачи о прокатке исключительно порошковой среды получено авторами работы [214] для случая свободного поступления порошка в очаг деформации, помимо этого в работах [196; 214] рассмотрены математические модели для прокатки однослойных порошков на металлической подложке. Общее решение задачи о прокатке порошковых материалов осуществлялось путем решения плоской одномерной задачи посредством численного рекуррентного решения конечно-разностной формы условия статического равновесия выделенного элементарного объема очага деформации совместно с условием пластичности для пористых материалов. Тем не менее, первичная прокатка порошкового сердечника в металлической оболочке коробчатого сечения (рис. 4.1), перемещающейся со скоростью V_n , равной выходной скорости прокатываемой композиции, и обладающей определенной жесткостью приводит к изменению кинематических параметров очага деформации, а также его формы из-за неплотного прилегания оболочки.

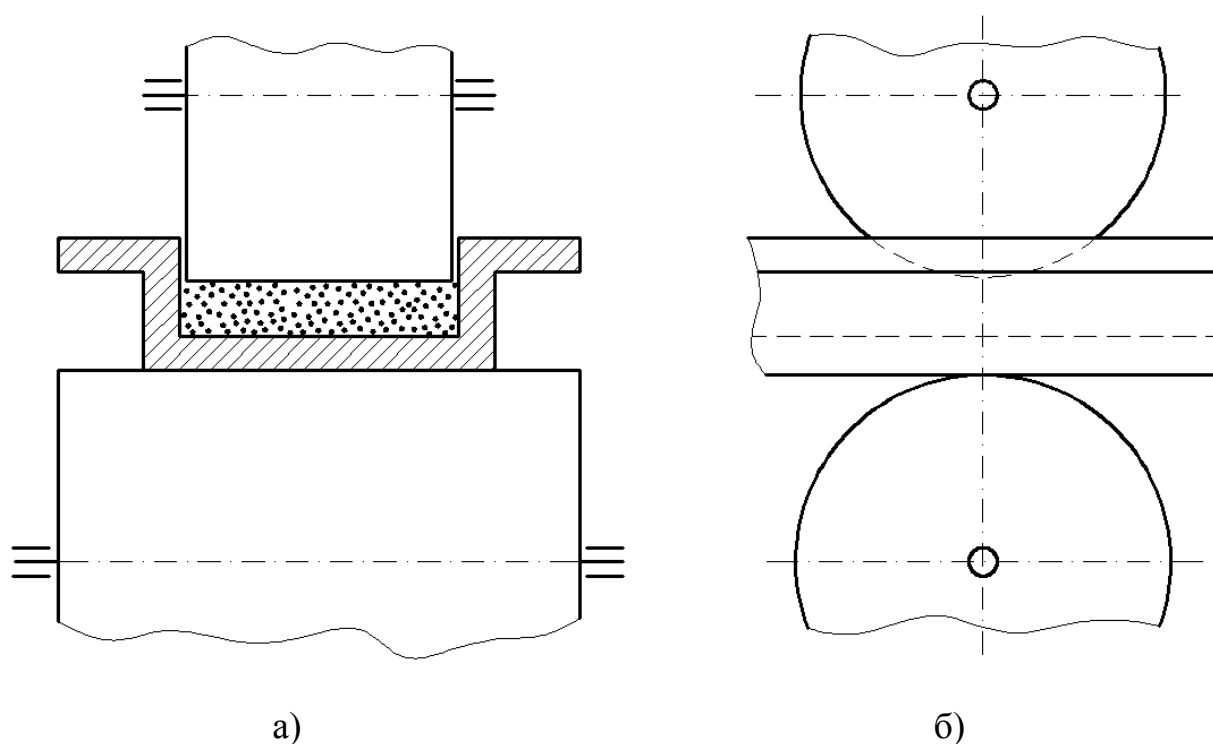


Рисунок 4.1 – Схема процесса первичной (уплотняющей) прокатки порошкового сердечника в металлической оболочке коробчатого сечения:

а – вид спереди; б – вид сбоку

Как следствие, происходит некоторое изменение напряженно-деформированного состояния, реализуемого в очаге деформации. При этом очаг деформации включает в себя зону уплотнения и зону упругого восстановления. Зона уплотнения, в свою очередь, состоит из зон опережения и отставания. Расчетная схема очага деформации представлена на рисунке 4.2.

При построении математической модели напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, плоскости, осуществляющие разбиение очага деформации на конечные объемы и, соответственно, ограничивающие их, приняты параллельными плоскости, проходящей через оси вращения рабочих валков [215...217].

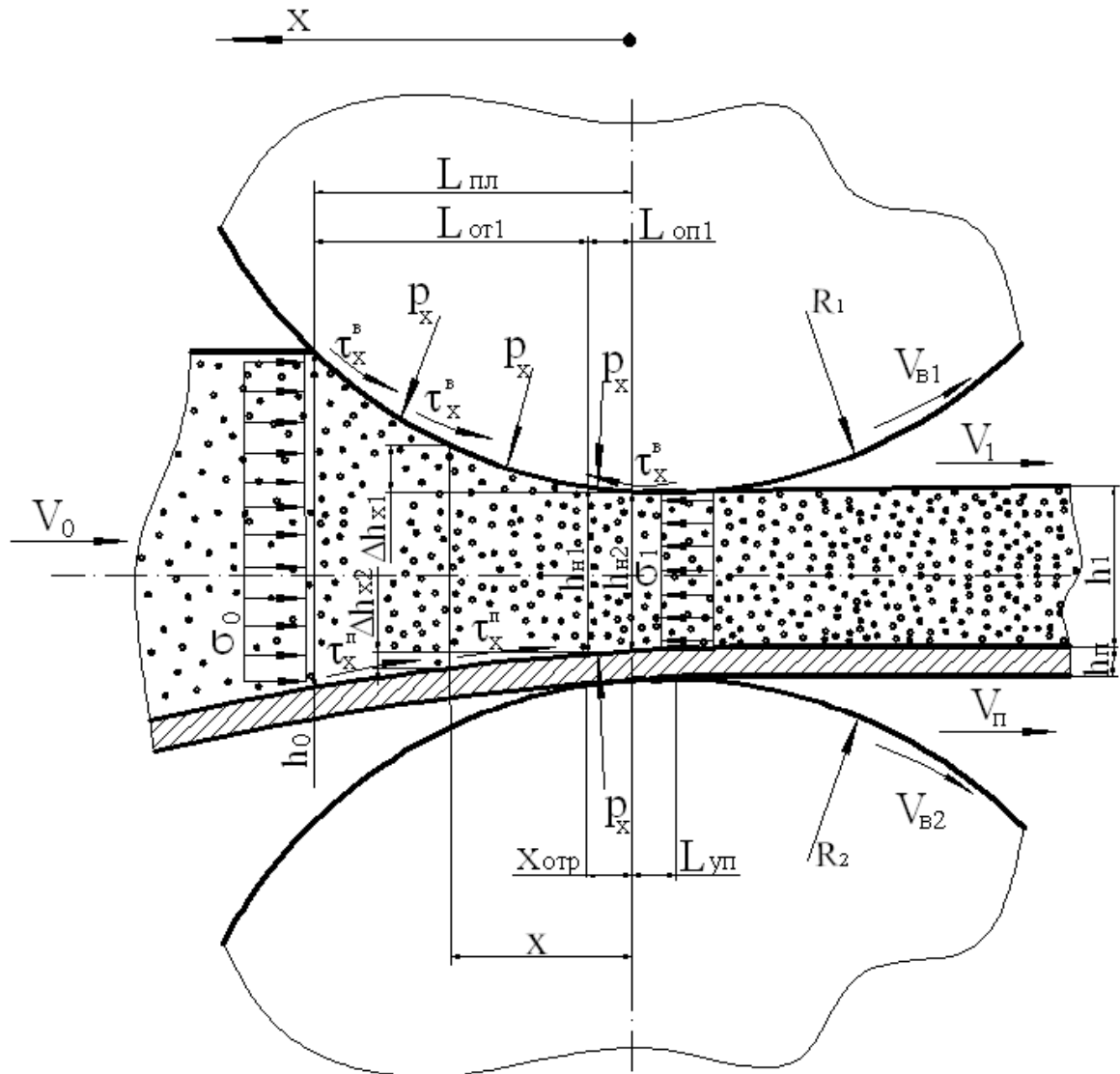


Рисунок 4.2 – Расчетная схема очага деформации процесса первичной прокатки порошкового сердечника в металлической оболочке коробчатого сечения

Кроме того, были приняты следующие допущения:

- показатели механических свойств, нормальные осевые напряжения σ_x , нормальные контактные напряжения p_x и кинематические параметры процесса прокатки изменяются только в направлении прокатки, оставаясь постоянными по высоте каждого отдельного сечения;

- металлическая оболочка деформируется только упруго, и ее толщина остается неизменной;

– текущие значения углов контакта по длине элементарного объема не изменяются, изменения нормальных контактных напряжений p_{xi} и контактных касательных напряжений τ_{xi1}^e и τ_{xi2}^e , τ_{xi1}^n и τ_{xi2}^n по длине каждого отдельного элементарного объема носят линейный характер, где верхние индексы e и n соответствуют принадлежности контактного касательного напряжения, возникающего между рабочим валком и порошковым материалом, а также между порошковым материалом и металлической оболочкой соответственно.

– касательные напряжения на поверхности контакта подчиняются закону трения Аммонтона-Кулона [218]: $\tau_x = p_x f_x$, распределения коэффициентов внешнего трения для зон опережения и отставания имеют, соответственно, следующий вид [219]:

– со стороны нижнего валка по всей длине очага деформации:

$$f_{x12} = \tau_{x2}^e / p_{x2} = f_{on1} \left(\frac{L_{on1} - x}{L_{on1}} \right)^{a_{f1}}, \text{ при } 0 \leq x \leq L_{on1}$$

$$f_{x12} = \tau_{x2}^e / p_{x2} = f_{om1} \left(\frac{x - L_{on1}}{L_{nl} - L_{on1}} \right)^{a_{f1}}, \text{ при } L_{on1} \leq x \leq L_{nl} \quad (4.1)$$

– со стороны верхнего валка по всей длине очага деформации:

$$f_{x22} = \tau_{x2}^n / p_{x2} = f_{om2} \left(\frac{x - L_{on2}}{L_{nl} - L_{on2}} \right)^{a_{f2}}, \text{ при } L_{on2} \leq x \leq L_{nl} \quad (4.2)$$

$$f_{x22} = \tau_{x2}^n / p_{x2} = f_{on2} \left(\frac{L_{on2} - x}{L_{on2}} \right)^{a_{f2}}, \text{ при } 0 \leq x \leq L_{on2} \quad (4.3)$$

где x – геометрическая координата, имеющая начало в плоскости сопряжения зон уплотнения и упругого восстановления;

$f_{om1(2)}, f_{on1(2)}$ – опорные значения коэффициентов трения, соответствующие их значениям на входе в зону уплотнения и на выходе из нее соответственно;

a_{f1}, a_{f2} – степенные показатели, характеризующие форму эпюры распределения коэффициентов трения по длине контактных поверхностей со стороны верхнего и нижнего валков, соответственно;

$L_{on1(2)}, L_{om1(2)}$ – соответственно протяженность зоны опережения и отставания.

При расчете текущего значения толщины композиции была использована известная степенная форма аналитического описания [219]:

$$h_x = h_1 + (h_0 - h_1) \left(\frac{x}{L_{nl}} \right), \quad (4.4)$$

где h_1 – конечная толщина получаемой порошковой составляющей заготовки;

h_0 – исходная толщина порошкового слоя композиции;

L_{nl} – протяженность зоны уплотнения.

Напряжения, действующие на выделенный элементарный объем порошкового сердечника, представлены на рисунке 4.3.

Условие статического равновесия элементарного объема под действием сил от этих напряжений при единичной ширине имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{xi} = & \sigma_{xi1} h_{xi1} - \sigma_{xi2} h_{xi2} - \frac{p_{xi1} + p_{xi2}}{2} \Delta x_i \left(\frac{\sin \alpha_{xi1}}{\sin \alpha_{xi2}} + \frac{\sin \alpha_{xi2}}{\cos \alpha_{xi2}} \right) + \\ & + \frac{\tau_{xi1}^e + \tau_{xi2}^e}{2} \Delta x_i + \frac{\tau_{xi1}^n + \tau_{xi2}^n}{2} \Delta x_i = 0, \end{aligned} \quad (4.5)$$

где $\Delta x_i = L_{nl}/k_r$ – шаг разбиения зоны уплотнения;

k_r – количество разбиений очага деформаций;

$x_{i1}, x_{i2} = x_{i1} - \Delta x_i$ – начальная и конечная координаты сечений i -го элементарного объема в направлении прокатки;

h_{xi1}, h_{xi2} – высоты начального и конечного сечений i -го элементарного объема, определяемые согласно степенной зависимости (4.4);

$\sigma_{xi1}, \sigma_{xi2}, P_{xi1}, P_{xi2}$ – нормальные осевые и нормальные контактные напряжения в начальном и конечном сечениях объема соответственно.

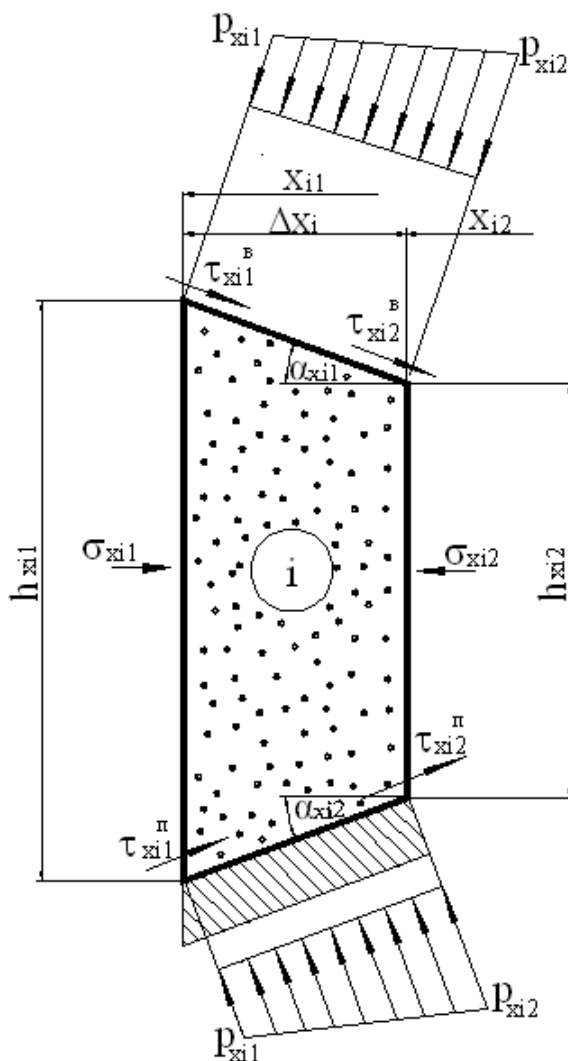


Рисунок 4.3 – Расчетная схема выделенного i -того элементарного объема очага деформации процесса первичной прокатки порошкового сердечника в металлической оболочке коробчатого сечения

Преобразовав уравнение (4.5), получим:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{xi} = \sigma_{xi1} h_{xi1} - \sigma_{xi2} h_{xi2} - \frac{(p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} + h_{xi2})}{2} \Delta x_i + \\ + \frac{p_{xi1} f_{xi11} + p_{xi2} f_{xi12}}{2} \Delta x_i + \frac{p_{xi1} f_{xi21} + p_{xi2} f_{xi22}}{2} \Delta x_i = 0. \end{aligned} \quad (4.6)$$

В уравнениях равновесия положительная величина нормальных напряжений σ_{xi} соответствует напряжениям сжатия, направление касательных напряжений в зонах отставания и опережения учтены знаком коэффициентов трения, определяемых по формулам (4.1)–(4.3).

Для окончательного определения значений осевых и контактных напряжений было использовано условие пластичности пористых материалов для плоского деформированного состояния (3.11). Подставляя его в уравнение равновесия (4.6), получаем в итоге:

$$\begin{aligned} \sigma_{xi1} h_{xi1} - \frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} p_{xi2} h_{xi2} + h_{xi2} \sqrt{p_{xi2}^2 \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \right) - 1 \right] + \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \beta_x \sigma_{sx}^2} - \\ - \frac{1}{2} p_{xi1} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi11} + f_{xi21}) \Delta x_i] - \frac{1}{2} p_{xi2} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi12} + f_{xi22}) \Delta x_i] = 0. \end{aligned} \quad (4.7)$$

В данной записи индексы 1 и 2 говорят о принадлежности параметра начальному или конечному сечению объема соответственно.

Производя дальнейшие преобразования, приведем уравнение к виду [220]:

$$\begin{aligned} h_{xi2} \sqrt{p_{xi2}^2 \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \right) - 1 \right] + \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \beta_x \sigma_{sx}^2} = \frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} p_{xi2} h_{xi2} - \sigma_{xi1} h_{xi1} + \\ + \frac{1}{2} p_{xi1} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi11} + f_{xi12}) \Delta x_i] + \frac{1}{2} p_{xi2} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi21} + f_{xi22}) \Delta x_i]. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Возводя правую и левую части уравнения в квадрат получим:

$$\begin{aligned}
& p_{xi2}^2 \left[\left(\frac{1-2\alpha_{xi2}}{1+4\alpha_{xi2}} \right)^2 - 1 \right] h_{xi1}^2 + \frac{4}{3} \cdot \frac{1+\alpha_{xi2}}{1+4\alpha_{xi2}} \beta_{x2} \sigma_{sx}^2 h_{xi2}^2 = \\
& = p_{xi2}^2 \left\{ \frac{1-2\alpha_{xi2}}{1+4\alpha_{xi2}} + \frac{1}{2} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi21} + f_{xi21}) \Delta x_i] \right\}^2 + \\
& + 2p_{ix2} \left\{ \frac{1-2\alpha_{xi2}}{1+4\alpha_{xi2}} + \frac{1}{2} [h_{ix1} - h_{ix2} - (f_{xi21} + f_{xi21}) \Delta x_i] \right\}^2 \times \\
& \times \left\{ \frac{1}{2} p_{xi2} [h_{ix1} - h_{ix2} - (f_{xi11} + f_{xi21}) \Delta x_i - \sigma_{xi1} h_{xi1}] \right\}^2 + \\
& + \left\{ \frac{1}{2} p_{xi2} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi11} + f_{xi21}) \Delta x_i] - \sigma_{xi1} h_{xi1} \right\}^2.
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Для упрощения формы записи произведем замены, вводя обозначения [220]:

$$t_{i1} = \frac{1-2\alpha_{xi2}}{1+4\alpha_{xi2}} h_{xi2} + \frac{1}{2} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi21} + f_{xi22}) \Delta x_i]; \tag{4.10}$$

$$t_{i2} = \frac{1}{2} p_{xi1} [h_{xi1} - h_{xi2} - (f_{xi11} + f_{xi21}) \Delta x_i] - \sigma_{xi1} h_{xi1}; \tag{4.11}$$

$$t_{i3} = \left[\left(\frac{1-2\alpha_{xi2}}{1+4\alpha_{xi2}} \right)^2 - 1 \right] h_{xi2}^2; \tag{4.12}$$

$$t_{i4} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1+\alpha_{xi2}}{1+4\alpha_{xi2}} h_{xi2}^2 \beta_{x2} \sigma_{sx}^2. \tag{4.13}$$

С использованием равенств (4.10) – (4.13) уравнение (4.9) примет вид

$$p_{xi2}^2 (t_{i1}^2 - t_{i3}) + 2p_{xi2} t_{i1} t_{i2} + t_{i2}^2 - t_{i4} = 0. \tag{4.14}$$

Данное уравнение представляет собой квадратное уравнение относительно переменной p_{xi2} . Решение этого квадратного уравнения позволяет получить в окончательном виде величину искомым контактных напряжений [221; 222]:

$$p_{xi2} = \left[\sqrt{t_{i1}^2 t_{i2}^2 - (t_{i1}^2 - t_{i3}^2)(t_{i2}^2 - t_{i4}^2)} - t_{i1} t_{i2} \right] / (t_{i1}^2 - t_{i3}^2). \quad (4.15)$$

Воспользовавшись определенной величиной p_{xi2} и возвращаясь к уравнению (3.12), определим величину нормальных осевых напряжений σ_{xi2} [223; 224]:

$$\sigma_{xi2} = \frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} p_{xi2} - \sqrt{p_{xi2} \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \right)^2 - 1 \right] + \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xi2}}{1 + 4\alpha_{xi2}} \beta_x \sigma_{sx}^2}, \quad (4.16)$$

а также величины касательных напряжений τ_{xi2}^6 и τ_{xi2}^n :

$$\tau_{xi2}^6 = p_{xi2} f_{xi12}, \quad (4.17)$$

$$\tau_{xi2}^n = p_{xi2} f_{xi22}. \quad (4.18)$$

Полученные значения σ_{xi2} , p_{xi2} , τ_{xi2}^6 и τ_{xi2}^n полностью описывают напряженное состояние в очаге деформации и позволяют перейти к определению относительной плотности порошкового слоя γ_{xi2} , значение которой необходимо для корректного учета реального характера распределения коэффициентов α и β и по длине очага деформации.

Для определения величины относительной плотности γ_{xi2} воспользуемся основными уравнениями теории течения пористых материалов, а именно, зависимостями между главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ и главными скоростями $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2, \dot{\varepsilon}_3$ пластической деформации (см. разд. 3).

Исходя из выводов, определенных формулой (3.15), для выделенного элементарного объема получим:

$$\varepsilon_{xi} = \frac{\sigma_{xi2}(1 + 4\alpha_{xi2}) - p_{xi2}(1 - 2\alpha_{xi2})}{p_{xi2}(1 + 4\alpha_{xi2}) - \sigma_{xi2}(1 - 2\alpha_{xi2})} \cdot \frac{h_{xi1} - h_{xi2}}{h_{xi1}}. \quad (4.19)$$

Согласно (3.16) выражение для относительной плотности записывается следующим образом:

$$\gamma_{xi2} = \gamma_{xi1} \frac{h_{xi1}}{h_{xi2}(1 + \varepsilon_{xi})}. \quad (4.20)$$

Совместно с вычислением главных деформаций ε_{hx} и ε_x производится вычисление эквивалентной деформации ε_e [129]:

$$\varepsilon_{ek} = \sum_{i=1}^{k_r} \Delta \varepsilon_{ei} = \frac{\sqrt{\beta_{xi}}}{\gamma_{xi}} \cdot \frac{2}{9} \cdot \left[(\varepsilon_{xi} - \varepsilon_{1i})^2 + \varepsilon_{hi}^2 + \varepsilon_{1i}^2 \right]. \quad (4.21)$$

Необходимо отметить особо, что при прокатке неспеченного порошкового материала предел текучести порошковой фазы σ_{sx} рассматривается независимым от величины эквивалентной пластической деформации.

Таким образом, приведенные зависимости полностью описывают процесс первичной прокатки порошкового материала в оболочке в конечно-разностной форме. В качестве направления решения выбирается направление, совпадающее с направлением движения прокатываемого материала. Связь при переходе от

предыдущего конечного объема (i -го) к последующему ($i+1$ -му) осуществляется согласно зависимостям:

$$\begin{aligned} x_{i2} &= x_{(i+1)1}; h_{xi2} = h_{x(i+1)1}; f_{xi12} = f_{x(i+1)11}; f_{xi22} = f_{x(i+1)21}; \\ \gamma_{xi2} &= \gamma_{x(i+1)1}; p_{xi2} = p_{x(i+1)1}; \sigma_{xi2} = \sigma_{x(i+1)}. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Начальные условия задаются непосредственно на входе в очаг уплотнения, при этом они имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} x_1|_{i=1} &= l_{nl}; \quad h_{x1}|_{i=1} = h_0; \quad f_{x11}|_{i=1} = f_{om1}; \quad f_{x21}|_{i=1} = f_{om2}; \\ \gamma_{x1}|_{i=1} &= \rho_{ym} / \rho_0; \quad p_{x1}|_{i=1} = 1,155 \sigma_{sx} \sqrt{\frac{1 + \alpha_{x1}|_{i=1}}{1 + 4\alpha_{x1}|_{i=1}}}; \\ \sigma_{x1}|_{i=1} &= 0, \end{aligned} \quad (4.23)$$

где ρ_{ym} – плотность утряски порошкового материала;

ρ_0 – плотность порошкового материала в монолитном состоянии.

Наличие металлической оболочки определенной жесткости в очаге деформации вносит изменение геометрических характеристик, что требует введения дополнительной итерационной процедуры по нахождению протяженности зоны пластического формоизменения и толщины порошкового слоя на входе в очаг деформации.

Максимальная протяженность очага деформации L_{nl} реализуется при горизонтальной задаче ленты в валки, т.е. ленты «бесконечной жесткости», а минимальная, соответственно, – при полном прилегании ленты к поверхности рабочего вала. Численно их можно описать следующими зависимостями [225...227]:

$$L_{nl}^{\max} = \sqrt{2R_1\Delta h(R_2 + h_n)/(R_1 + R_2 + h_n)}; \quad (4.24)$$

$$L_{nl}^{\min} = \sqrt{2R_1\Delta h},$$

где R_1, R_2 – радиусы рабочих валков;

$\Delta h = h_0 - h_1$ – величина абсолютного обжатия порошковой составляющей;

h_n – толщина оболочки.

Наличие металлической оболочки вносит асимметрию в очаг деформации, а также обуславливает появление зависимости протяженности очага уплотнения от жесткости ленты-оболочки, определяемой ее толщиной. Тем самым, усложняются и аналитические зависимости, описывающие геометрические параметры очага. Так, для описания величины текущей толщины композиции, необходимо использовать трехчленную запись:

$$h_{x1} = h_1 + \Delta h_{x1} + \Delta h_{x2}, \quad (4.25)$$

где Δh_{x1} и Δh_{x2} – текущие значения абсолютных обжатий со стороны верхнего и нижнего рабочих валков. Величина абсолютного обжатия со стороны ведомого валка описывается зависимостью геометрического характера:

$$\Delta h_{x1} = R_1 - \sqrt{R_1^2 - x^2}. \quad (4.26)$$

Для описания величины обжатия Δh_{x2} следует, прежде всего, отметить, что в общем случае со стороны ведущего валка возникают две зоны – зона прилегания подложки к поверхности рабочего валка и зона ее провисания, расположенная на входе в очаг уплотнения. При этом координата отрыва подложки от бочки валка $x_{отр}$ определяется при прочих равных условиях жесткостью металлической оболочки.

В зоне прилегания, то есть при $x < x_{omp}$, величина обжатия определяется также исходя из геометрии системы:

$$\Delta h_{x2} = R_2 + h_n - \sqrt{(R_2 + h_n)^2 - x^2}; \quad (4.27)$$

Для описания величины Δh_{x2} в зоне провисания ($x > x_{omp}$), потребуется более сложная зависимость, состоящая из трех компонент [227]:

$$\Delta h_{x2} = \Delta h_{x2}^1 + \Delta h_{x2}^2 + \Delta h_{x2}^3, \quad (4.28)$$

где $\Delta h_{x2}^1 = (R_2 + h_n) \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{x_{omp}}{R_2 + h_n} \right) \right]$ – геометрическая координата точки отрыва оболочки;

ната точки отрыва оболочки;

$\Delta h_{x2}^2 = (x - x_{omp}) \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_{omp}}{R_2 + h_n} \right)$ – координата оси оболочки, как жесткого недеформируемого тела;

кого недеформируемого тела;

$\Delta h_{x2}^3 = W_x$ – прогиб металлической оболочки от недеформированного состояния [228]:

$$W_x = \frac{p_x b (L_{нл} - x_{omp})^5}{120 E_n I} \left[4 - 5 \frac{L_{нл} - x}{L_{нл} - x_{omp}} + \left(\frac{L_{нл} - x}{L_{нл} - x_{omp}} \right)^5 \right], \quad (4.29)$$

E_n – модуль упругости материала металлической оболочки;

I – момент инерции сечения металлической оболочки относительно оси x [228; 229]:

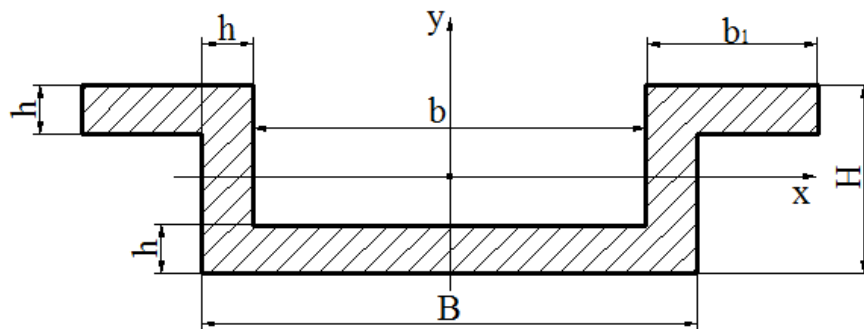
- для оболочек коробчатого и прямоугольного сечения (рис. 4.4, а-б):

$$I = \frac{(B + 2b_1)H^3 - b(H - h)^3 - 2b_1(H - h)^3}{12}; \quad (4.30)$$

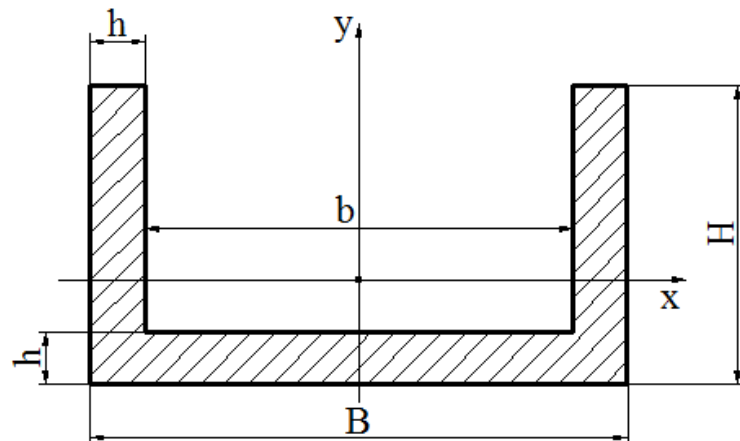
- для металлической подложки (рис. 4.4, в):

$$I = \frac{Bh^3}{12}, \quad (4.31)$$

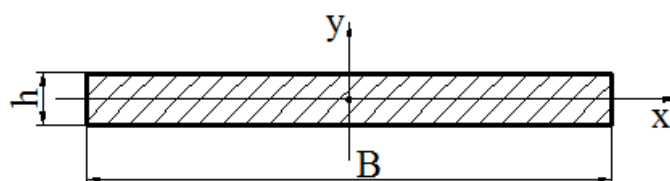
B, H, b, b_1, h – геометрические параметры сечения металлической оболочки (рис. 4.4).



а)



б)



в)

Рисунок 4.4 – Расчетные схемы сечений металлических оболочек

Протяженность зоны пластического формоизменения была определена с использованием метода дихотомии, что обусловлено наличием функциональной зависимости текущей высоты очага деформации и его общей протяженностью. Внутри цикла дихотомии осуществлялось последовательное итерационное определение координаты точки отрыва полосы от поверхности вала на основании соответствия упруго-деформационного и чисто геометрического решений. Принимаем $x_{отр} = x_i$, $p_x|_{x=x_{отр}} = p_{xi}$. Уравнение нахождения координаты точки отрыва $x_{отр}$ в этом случае имеет вид:

$$\begin{aligned} \delta h_{x2} = & \sqrt{(R_2 + h_n)^2 - x_i^2} - \sqrt{(R_2 + h_n)^2 - x_{(i-1)}^2} = [x_{(i-1)} - x_i] \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_i}{R_2 + h_n} \right) + \\ & + \frac{p_{xi} b (L_{nl} - x_i)^5}{120 E_n I} \left[4 - 5 \frac{L_{nl} - x_{(i-1)}}{L_{nl} - x_i} + \left(\frac{L_{nl} - x_{(i-1)}}{L_{nl} - x_i} \right)^5 \right] = \delta h_{x1}. \end{aligned} \quad (4.32)$$

Далее производится расчет величины толщины насыпного слоя на входе в зону уплотнения, т.е. при $x = L_{nl}$ с учетом ранее определенной координаты точки отрыва. При этой операции направление решения меняется и становится противонаправленным движению композиции.

Расчетная величина обжатия определяется по формуле:

$$\begin{aligned} h_{x2}|_{x=L_{nl}} = & h_1 + R_1 \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{L_{nlk}}{R_1} \right) \right] + (R_2 + h_n) \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{x_{отрк}}{R_2 + h_n} \right) \right] + \\ & + (L_{nlk} - x_{отрк}) \cdot \operatorname{tg} \left(\arcsin \left(\frac{x_{отрк}}{R_2 + h_n} \right) \right) + \left[\frac{4 p_{xk}|_{x=x_{отрк}} b (L_{nlk} - x_{отрк})^5}{120 E_n I} \right]. \end{aligned} \quad (4.33)$$

Заданное значение исходной толщины порошкового слоя сравнивается с величиной, определенной по формуле (4.33). Начальными условиями являются:

$$\begin{aligned}
 L_{0 \max k} \Big|_{k=1} &= \sqrt{2R_1 \Delta h (R_2 + h_n) / (R_1 + R_2 + h_n)}; \\
 L_{0 \min k} \Big|_{k=1} &= \sqrt{2R_1 \Delta h},
 \end{aligned}
 \tag{4.34}$$

в решении используются следующие зависимости:

$$\begin{aligned}
 L_{nl k} &= (L_{0 \min k} + L_{0 \max k}) / 2; \\
 \left. \begin{aligned}
 L_{o \min(k+1)} &= L_{nl} \\
 L_{o \max(k+1)} &= L_{0 \max k}
 \end{aligned} \right\} \text{при } h_{xk} \Big|_{x=L_{nlk}} < h_0; \\
 \left. \begin{aligned}
 L_{o \min(k+1)} &= L_{0 \min k} \\
 L_{o \max(k+1)} &= L_{nl}
 \end{aligned} \right\} \text{при } h_{xk} \Big|_{x=L_{nlk}} > h_0,
 \end{aligned}
 \tag{4.35}$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры.

Критерием сходимости решения является выполнение неравенства:

$$\delta_2 = 2(L_{0 \max k} - L_{0 \min k}) / (L_{0 \max k} + L_{0 \min k}) < \Delta \delta_2,
 \tag{4.36}$$

где $\Delta \delta_2$ – погрешность определения протяженности очага деформации, при расчетах принимали $\Delta \delta_2 = 0,1\%$.

По мере окончания итерационного решения определяется приращение толщины порошкового слоя:

$$\delta h_2 = \frac{h_1 p_{x2} \Big|_{i=kr}}{E_{nn}},
 \tag{4.37}$$

где E_{nn} – модуль упругости прокатанной порошковой композиции.

Окончательная толщина порошкового слоя с учетом упругого восстановления составит:

$$h_k = h_1 + \delta h_2. \quad (4.38)$$

Длина зоны упругого восстановления определяется как:

$$L_{yn} = \sqrt{2R_2 \delta h_2 (R_2 + h_n) / (R_1 + R_2 + h_n)}, \quad (4.39)$$

где R_1 и R_2 – радиусы ведущего и ведомого рабочих валков.

Расчетное значение нормального напряжения σ_x в выходном сечении (см. рис. 4.3) принимает значение:

$$\sigma_x = \sigma_{x2}|_{i=kr} - 0,5 \cdot p_{x2}|_{i=kr} \cdot L_{yn} (f_{on1} + f_{on2}) / h_1. \quad (4.40)$$

Со стороны верхнего валка скорость движения прокатываемой порошковой композиции синхронизирована со скоростью оболочки, поэтому зона опережения со стороны рабочего верхнего валка отсутствует $L_{on2} = 0$. В этом случае, основываясь на выражении [219], длину зоны опережения на нижнем валке можно определить зависимостью:

$$L_{on1} = L_{nl} \sqrt{h_1 (k_v - 1) / (h_0 - h_1)}, \quad (4.41)$$

где $k_v = k_{v1} k_{v2}$ – обобщенный показатель соотношения окружных скоростей на контактных поверхностях оболочки и нижнего рабочих валков, определяемый показателями кинематической $k_{v1} = V_{e1} / V_{e2}$ и геометрической $k_{v2} = (R_2 + h_n) / R_1$ асимметрии.

Также определению подлежит величина длины дуги контакта рабочего валка R_2 и металлической оболочки порошковой ленты:

$$L_{\partial yz} = \sqrt{R_2^2 - (R_2 - \Delta h_{x2})^2}. \quad (4.42)$$

Учет упругого сплющивания валков выполнялся на основании зависимости [219]:

$$L_{nl} = \sqrt{\frac{2R_1R_2}{R_1 + R_2} (H_0 - h_1) + x_{L(t+1)}^2} + x_{L(t+1)}, \quad (4.43)$$

где $x_{L(t+1)}$ – вспомогательная характеристика, определяемая в зависимости от среднеинтегрального значения нормальных контактных напряжений в предыдущем цикле расчетов p_{cpt} как [219]:

$$x_{L(t+1)} = \frac{16R_1R_2}{R_1 + R_2} p_{cp} \frac{(1 - \nu_\epsilon^2)}{\pi E_\epsilon}, \quad (4.44)$$

ν_ϵ – коэффициент Пуассона материала рабочих валков;

E_ϵ – модуль упругости материала рабочих валков.

При определении протяженности зоны уплотнения учет упругого сплющивания может быть осуществлен только на основе итерационной схемы решения, при которой в первом цикле рабочие валки принимаются упруго недеформируемыми и производится расчет $P_{cpt}(L_{ynt})$, $L_{yn(t+1)}(P_{cpt})$, $P_{cpt(t+1)}(L_{yn(t+1)})$ и т.д. Оценку сходимости итерационной процедуры осуществляли по величине относительного приращения протяженности зоны уплотнения в предыдущем L_{ynt} и последующем $L_{yn(t+1)}$ цикле расчетов $\delta L = 100(L_{yn(t+1)} - L_{ynt})/L_{yn(t+1)}$, принимая величину $\delta L \leq 0,1\%$ в качестве допустимого значения.

По мере вычисления всех компонент напряженно-деформированного состояния и геометрии очага деформации были определены основные интегральные характеристики прокатки, в том числе сила прокатки P_{np} , среднеинтегральное значение нормальных контактных напряжений p_{cp} и моменты прокатки на верхнем и нижнем рабочих валках M_1 и M_2 [220]:

$$P_{np} = b \sum_{i=2}^{Kr} \frac{P_{x2(i-1)} + P_{x2i}}{2} \Delta X + \left\{ \frac{P_{x2(1)}}{2} \Delta X + \frac{P_{x2(Kr)}}{2} L_{yn} \right\} b; \quad (4.45)$$

$$p_{cp} = P_{np} / b \cdot (L_{nl} + L_{yn}); \quad (4.46)$$

$$M_2 = \left\{ \begin{aligned} & \sum_{i=2}^{Kr} \frac{P_{x2(i-1)} f_{x22(i-1)} + P_{x2i} f_{x22i}}{2} \Delta X + \\ & + \frac{P_{x2(1)} f_{x22(1)}}{2} \Delta X - \frac{P_{x2(Kr)} f_{on}}{2} L_{yn} \end{aligned} \right\} R_2 b. \quad (4.47)$$

В связи с необходимостью синхронизации скоростей движения оболочки и порошкового слоя, к композиции, в общем случае, прикладывается напряжения подпора или натяжения. С учетом напряжения σ_1 (или интегрального аналога – силы подпора T_{1n}) формула для определения момента на верхнем валке примет вид:

$$M_1 = \left\{ \sum_{i=2}^{Kr} \frac{P_{x2(i-1)} f_{x12(i-1)} + P_{x2i} f_{x12i}}{2} \Delta X + \frac{P_{x2(1)} f_{x12(1)}}{2} \Delta X - \sigma_1 h_1 + \frac{T_{1n}}{b} \right\} R_1 b. \quad (4.48)$$

Положительным значениям величин σ_1 и T_{1n} соответствуют напряжения сжатия. Рассмотренные зависимости (4.1) – (4.48) составили полный алгоритм

по определению напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров процесса первичной прокатки порошковых материалов, укрупненная блок-схема которого представлена на рисунке 4.5.

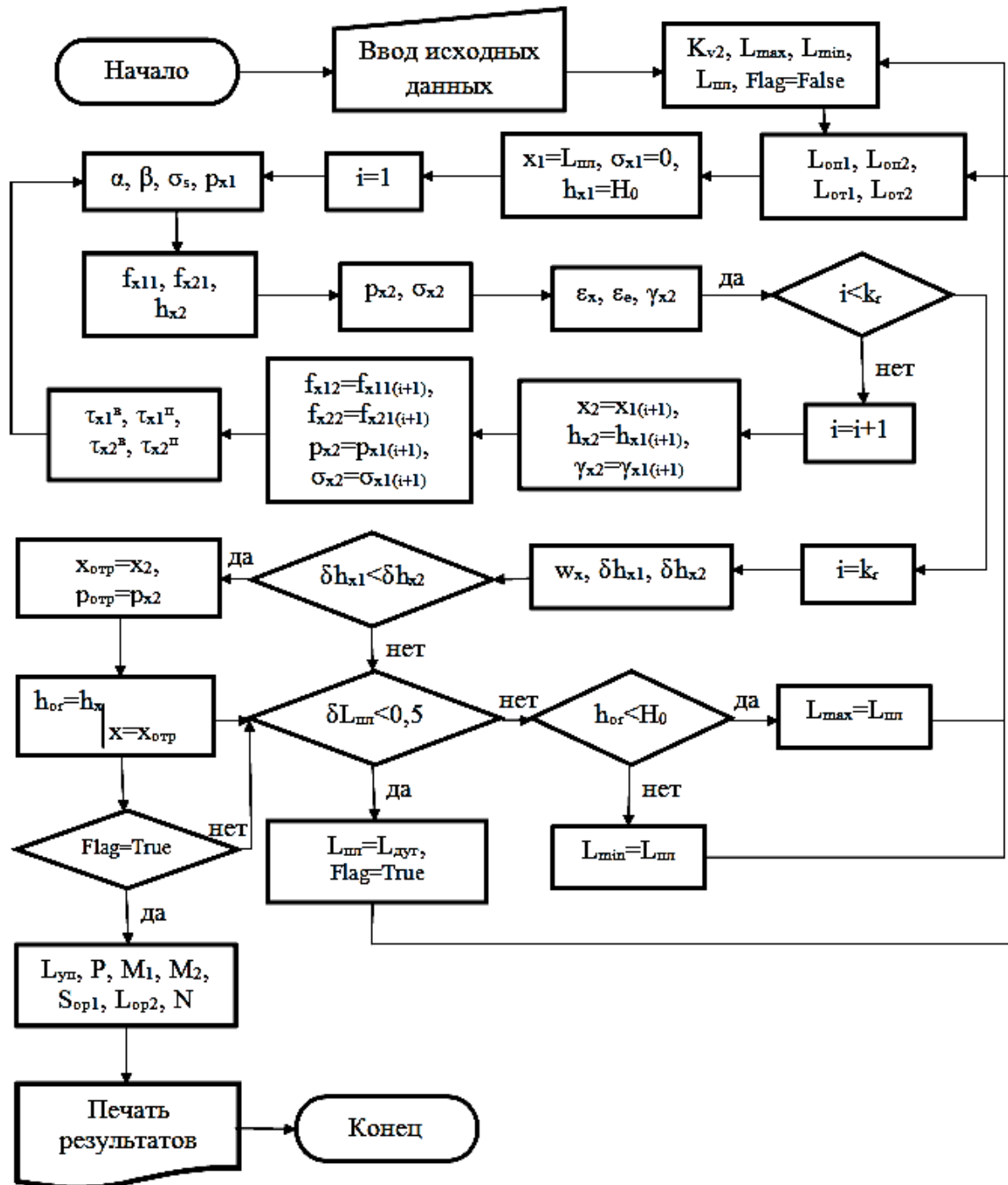


Рисунок 4.5 – Укрупненная блок-схема алгоритма по одномерному математическому моделированию напряженно-деформированного состояния при первичной (уплотняющей) прокатке порошковой электродной ленты

На основе данного алгоритма разработаны соответствующие программные средства, расчетный блок которых представлен в приложении Б.

В качестве примера результата численной реализации программных средств, разработанных на основе полученной математической модели, на рисунке 4.6 представлены расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта рабочего валка и металлической оболочки, а на рисунке 4.7 распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения коэффициента асимметрии.

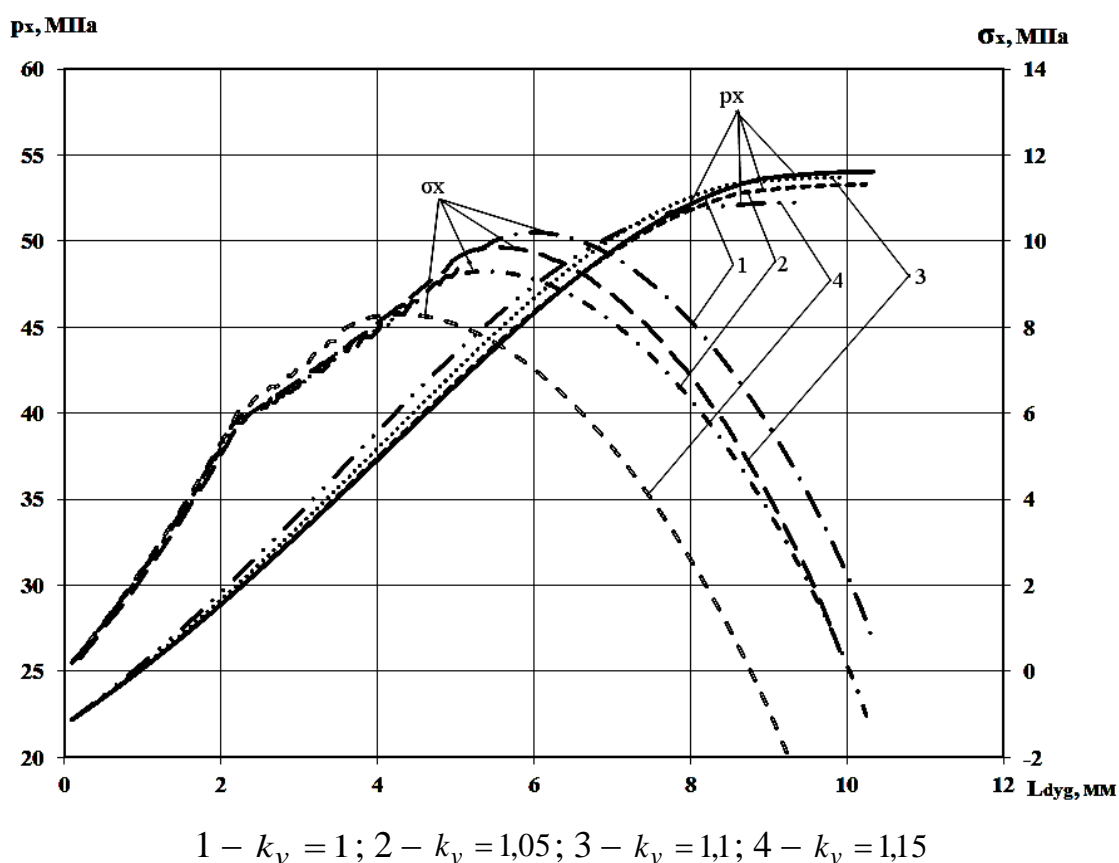
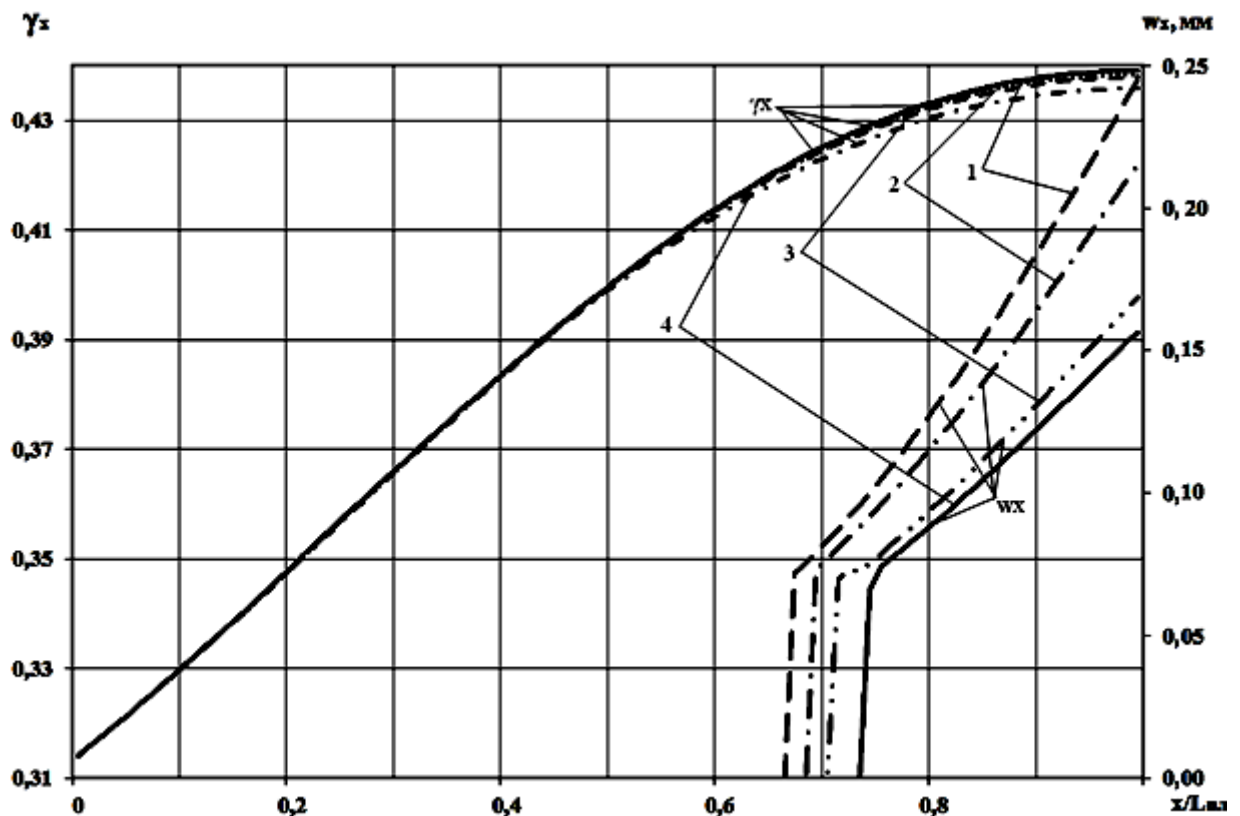


Рисунок 4.6 – Расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта рабочего валка и металлической оболочки в зависимости от изменения коэффициента асимметрии



1 – $k_v = 1$; 2 – $k_v = 1,05$; 3 – $k_v = 1,1$; 4 – $k_v = 1,15$

Рисунок 4.7 – Расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения коэффициента асимметрии

Расчеты выполнены для прокатки железного порошка марки ПЖРЗ с начальной толщиной слоя 2,6 мм в валках диаметром 100 мм со скоростью прокатки 0,03 м/с и обжатием 0,3. Геометрические параметры ленты: $h_n = 1$ мм, $B = 20$ мм, $b_1 = 3$ мм, $b = 18$ мм. Высота профиля оболочки коробчатого сечения $H = 3$ мм.

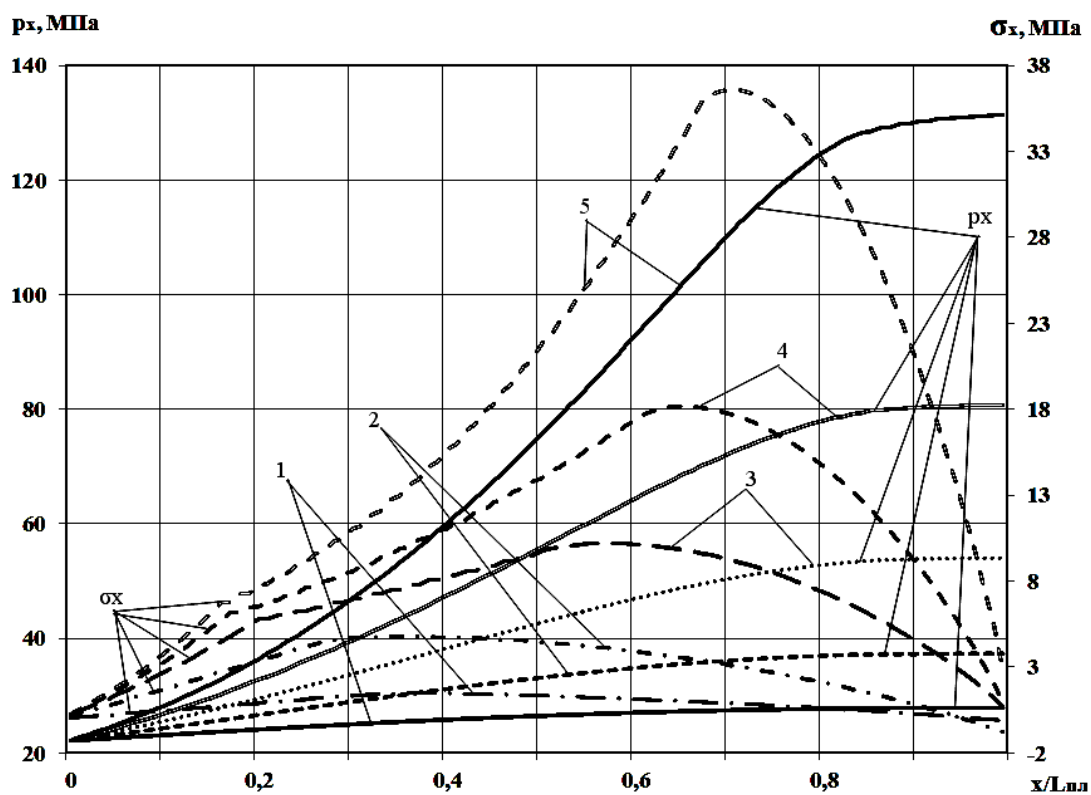
Из анализа полученных распределений следует, что:

- величины нормальных напряжений σ_x снижаются при увеличении значений показателя асимметрии (см. рис. 4.6);
- наименьшие значения длины очага деформации будут при $k_v = 1,15$; наибольшие – при $k_v = 1$ (см. рис. 4.6);

– по мере прохождения очага деформации относительная плотность γ_x монотонно возрастает и происходит стабилизация роста на выходе из зоны деформации (см. рис. 4.7);

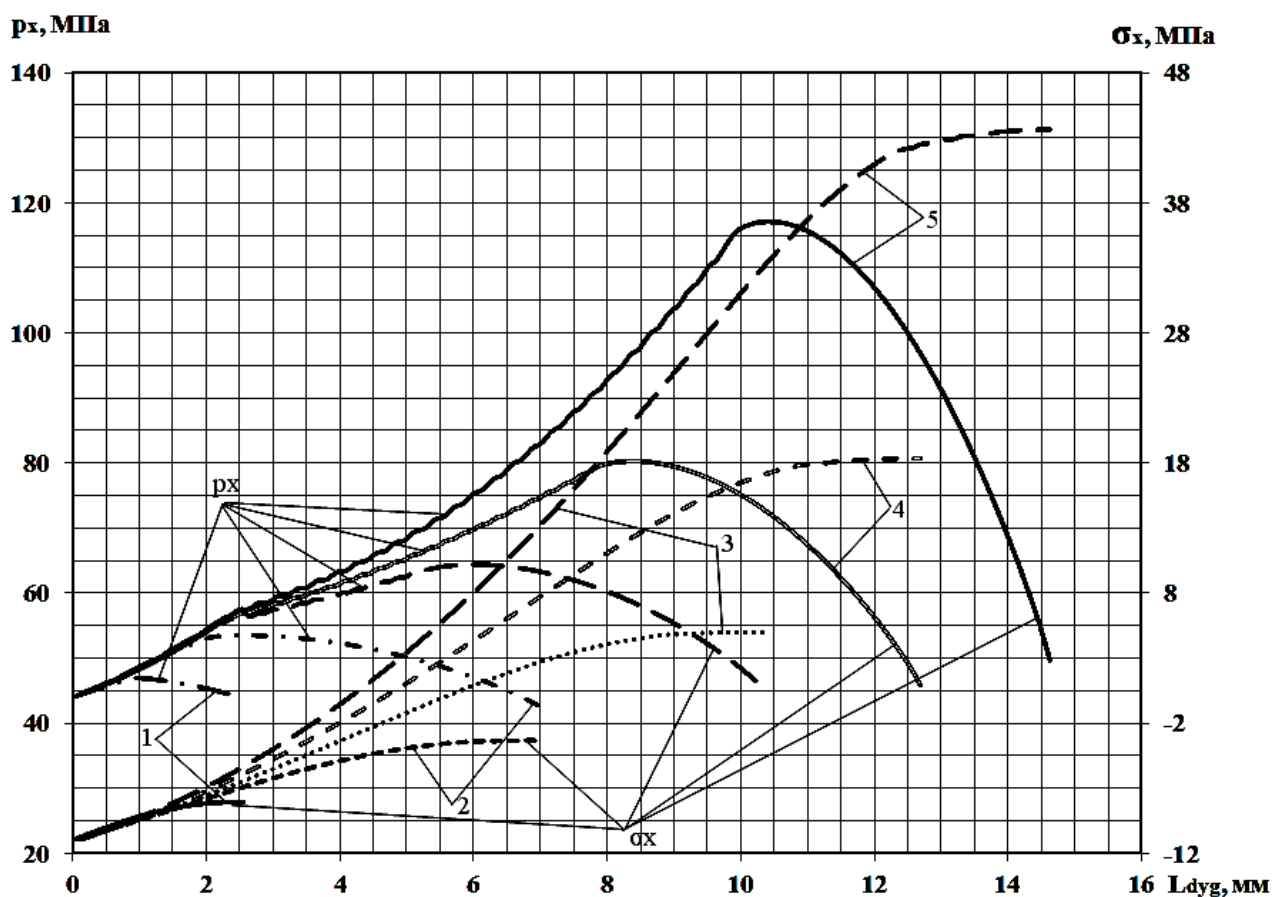
– с увеличением коэффициента асимметрии упругий прогиб металлической оболочки уменьшается (рис. 4.7).

На рисунках 4.8-4.9 показаны расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине очага деформации в зависимости от изменения обжатия.



1 – $\varepsilon = 0,1$; 2 – $\varepsilon = 0,2$; 3 – $\varepsilon = 0,3$; 4 – $\varepsilon = 0,4$; 5 – $\varepsilon = 0,5$

Рисунок 4.8 – Расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине очага деформации в зависимости от изменения обжатия ε



1 – $\varepsilon = 0,1$; 2 – $\varepsilon = 0,2$; 3 – $\varepsilon = 0,3$; 4 – $\varepsilon = 0,4$; 5 – $\varepsilon = 0,5$

Рисунок 4.9 – Расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта в зависимости от изменения обжатия ε

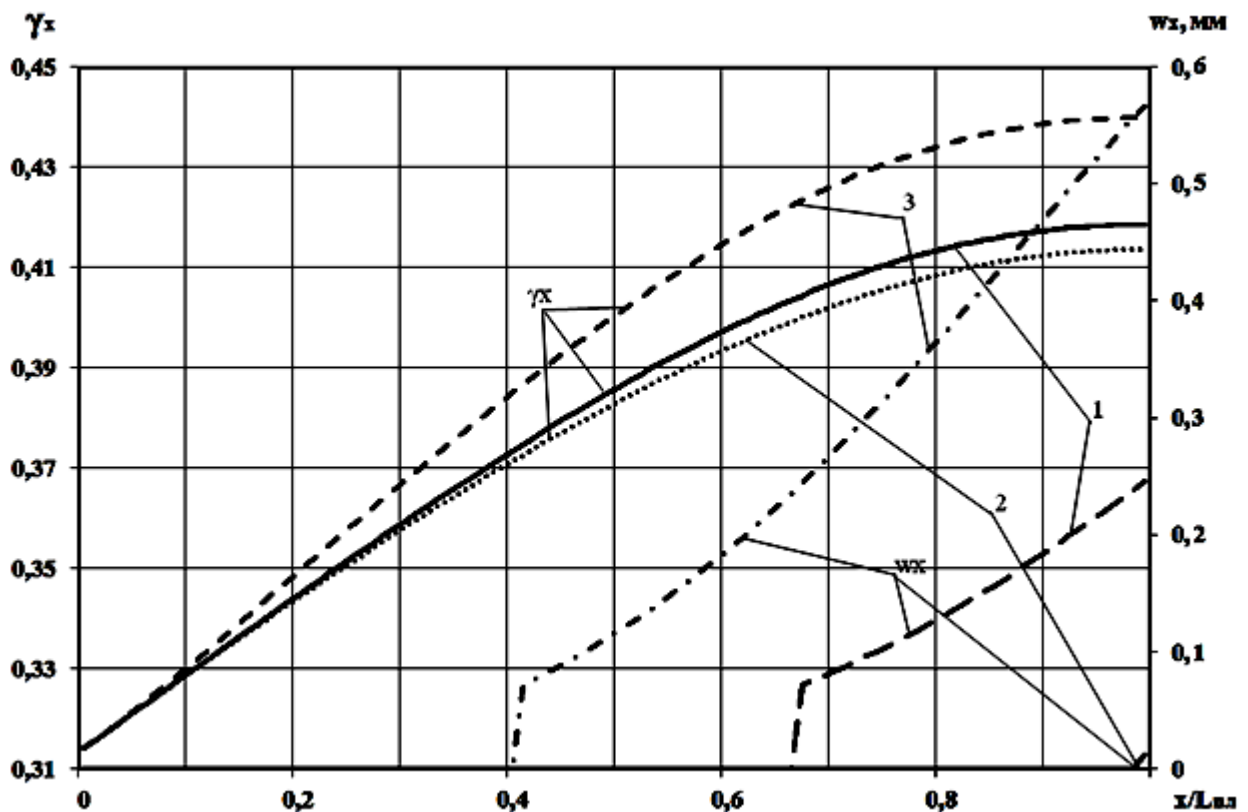
Из анализа полученных распределений следует, что:

- после прохождения середины очага деформации, значения нормальных напряжений σ_x монотонно убывают (см. рис. 4.8);
- нормальные контактные напряжения p_x достигают своего максимального значения в последних сечениях, т.е. на выходе из очага деформации (см. рис. 4.8);
- с увеличением обжатия протяженность очага деформации увеличивается, при этом характер изменения напряжений остается прежним (см. рис. 4.9).

Было исследовано влияние формы и толщины металлических оболочек на параметры напряженного состояния процесса прокатки порошковых лент. В результате получены расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от формы оболочки (рисунки 4.10, 4.11).

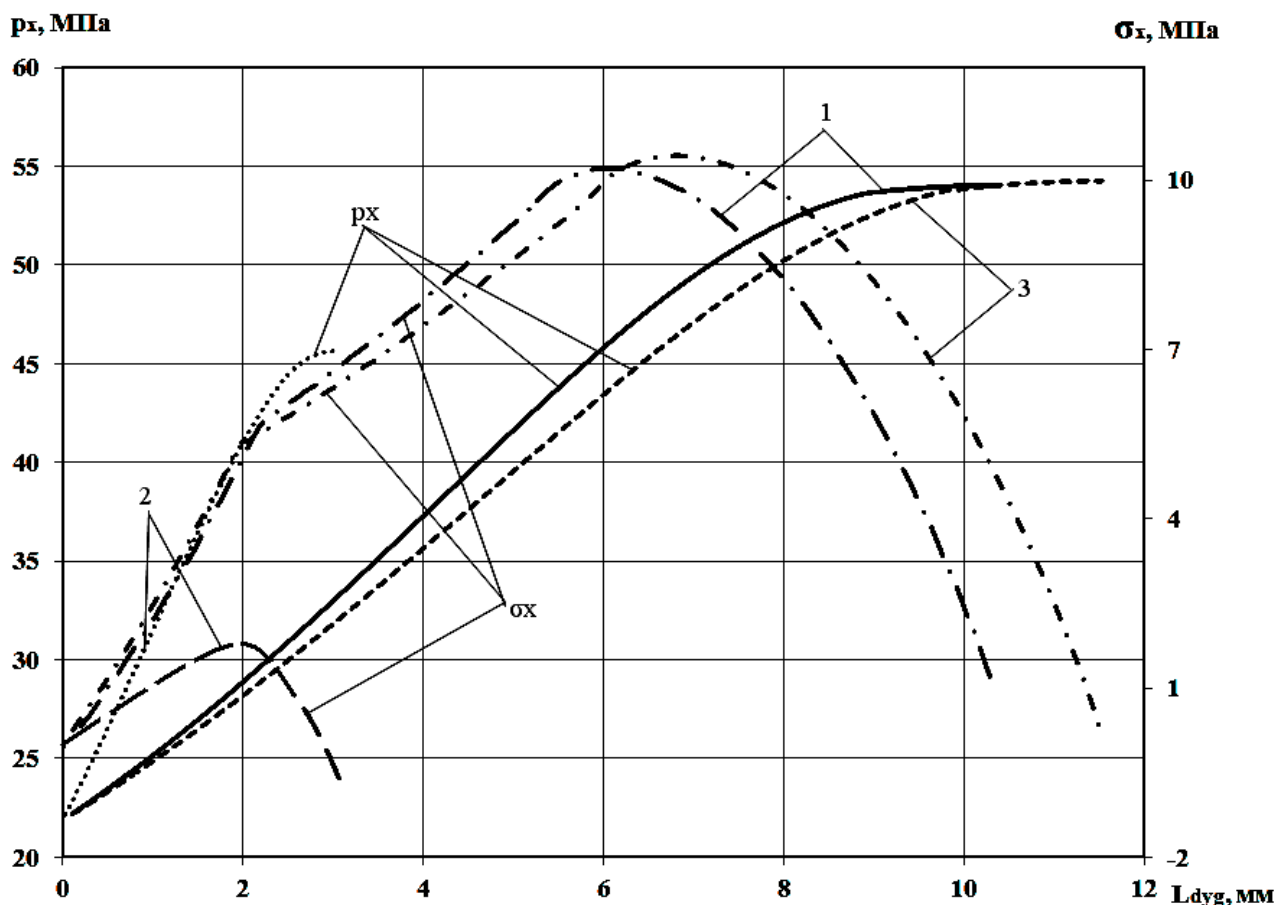
Из анализа полученных распределений следует, что:

– по мере прохождения очага деформации относительная плотность γ_x монотонно возрастает и происходит стабилизация роста на выходе из зоны деформации (см. рис. 4.10);



1 – прямоугольная оболочка, 2 – подложка, 3 – коробчатая оболочка

Рисунок 4.10 – Расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника и значений упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения формы оболочки



1 –прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

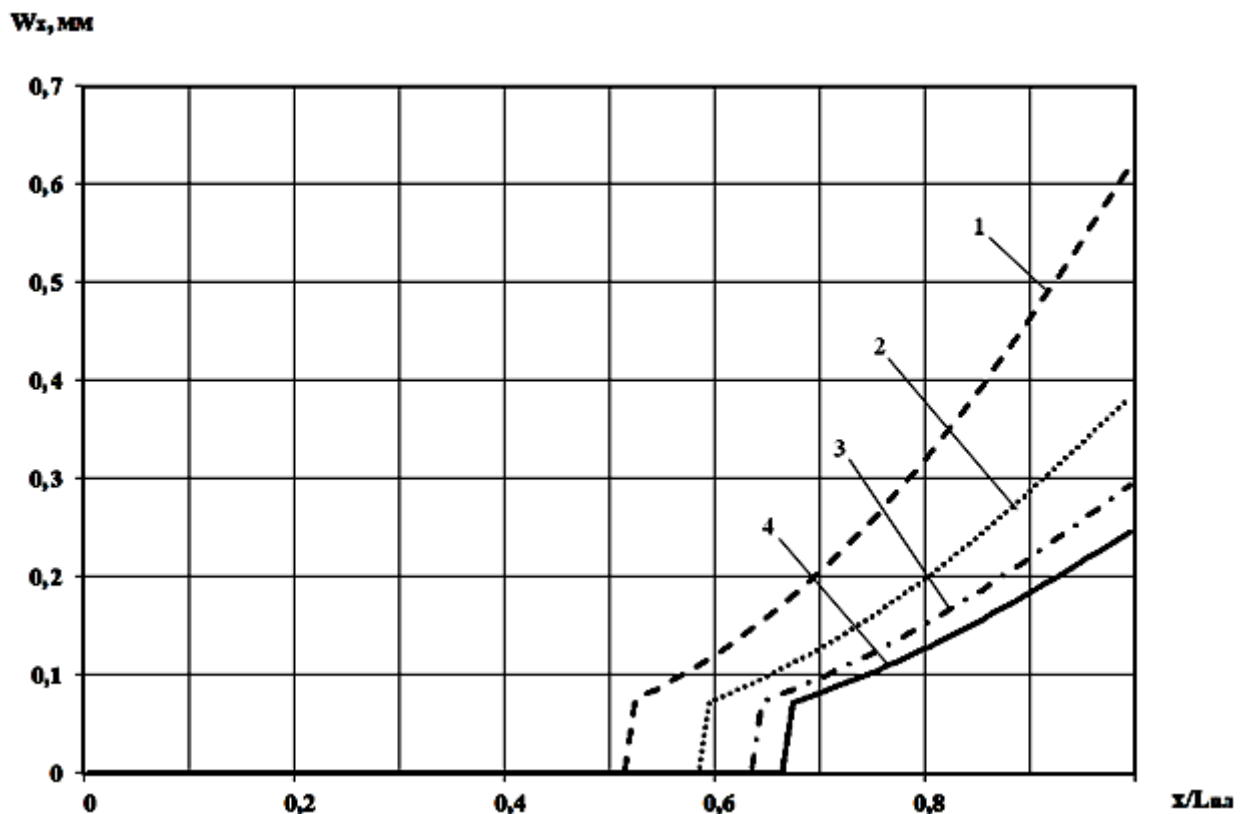
Рисунок 4.11 – Расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта в зависимости от изменения формы оболочки:

- максимальные значения плотности порошкового сердечника достигаются при использовании оболочки коробчатого сечения, минимальные – для прямоугольной оболочки (см. рис. 4.10);
- упругий прогиб металлической оболочки наблюдается на входе в очаг деформации и будет тем выше, чем меньше жесткость оболочки (см. рис. 4.10);
- величина нормальных и нормальных контактных напряжений зависит от формы оболочки, при уменьшении жесткости оболочки максимальные значения данных напряжений падают (см. рис. 4.11).

На рисунке 4.12 представлены распределения величины прогиба оболочки от её толщины. Установлено, что с уменьшением толщины оболочки величина её прогиба увеличивается. Так, при прочих равных условиях зона провисания

оболочки при толщине стенки 0,25 мм составляет 48% от общей протяженности очага деформации, а при толщине 1,0 мм – 33%, что свидетельствует о весомости данного фактора и необходимости его учета при проектировании технологических режимов.

Максимальное же значение упругого прогиба оболочки получено для $k_v = 1$ и $h=0,25$ мм, наименьший же упругий прогиб будет при $k_v = 1,15$ и $h=1$ мм (см. рис. 4.7, 4.12).

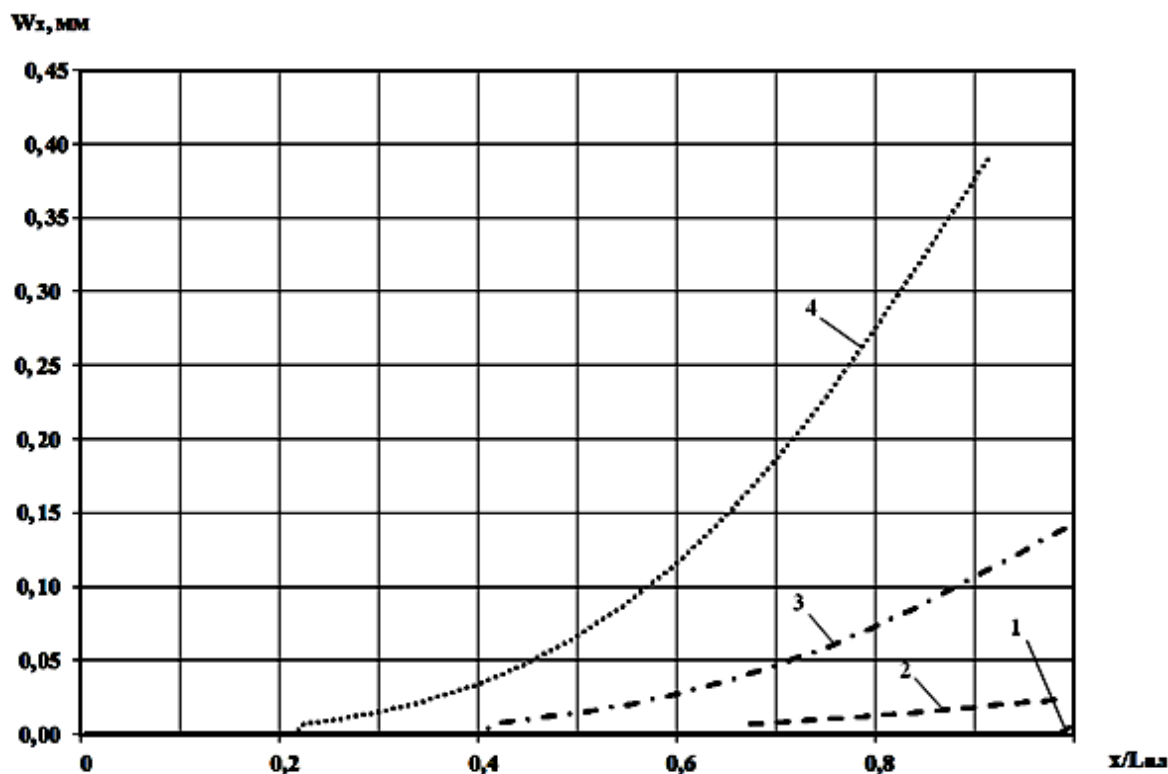


1 – $h=0,25$ мм; 2 – $h=0,5$ мм; 3 – $h=0,75$ мм; 4 – $h=1$ мм

Рисунок 4.12 – Расчетные распределения упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения толщины оболочки

На рисунке 4.13 представлены расчетные распределения упругого прогиба оболочки в зависимости от радиуса валков. Установлено, что с увеличением радиуса упругий прогиб оболочки увеличивается. Так при радиусе валков 50 мм

зона провисания оболочки составляет 2% от общей протяженности очага деформации, а при радиусе 300 мм – 78%, что свидетельствует о важности данного фактора при проектировании конструктивных параметров рабочей клетки.



1 – $R=50$ мм; 2 – $R=100$ мм; 3 – $R=200$ мм; 4 – $R=300$ мм

Рисунок 4.13 – Расчетные распределения упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения радиуса рабочих валков

На рисунке 4.14 представлены расчетные распределения упругого прогиба оболочки в зависимости от величины относительной деформации. Установлено, что с увеличением обжатия упругий прогиб оболочки увеличивается. Так при обжатии 10% он практически отсутствует, а при обжатии 50% зона провисания оболочки составляет 54% от общей протяженности очага деформации, что свидетельствует о важности данного фактора при проектировании технологических режимов прокатки порошковых лент.

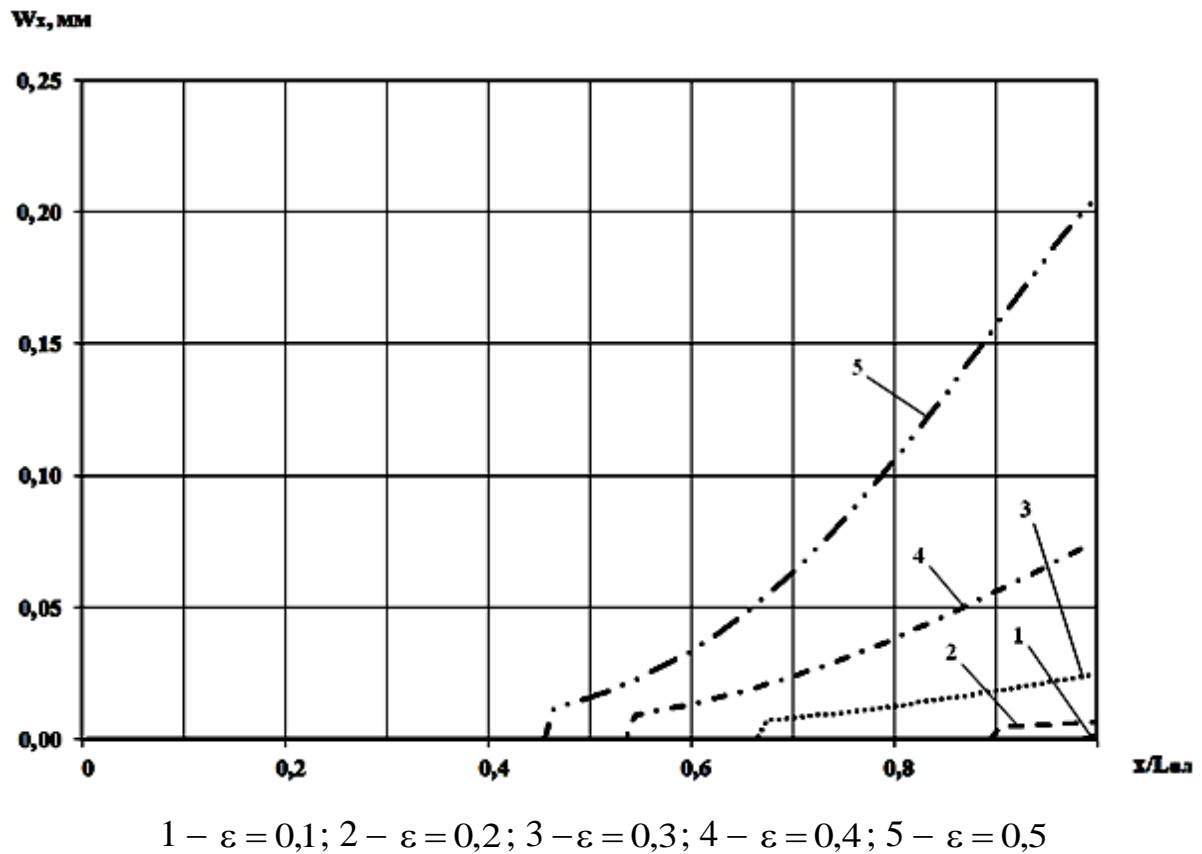
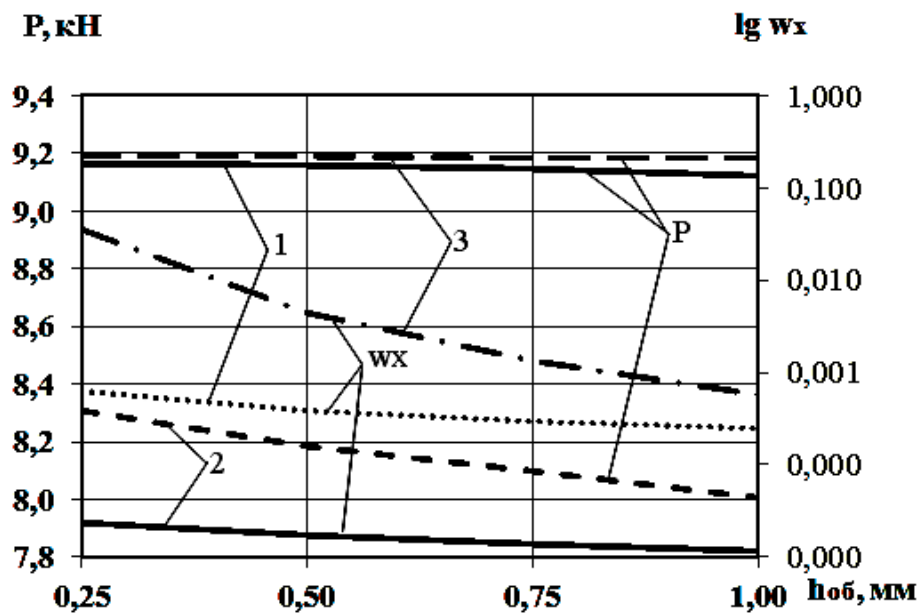


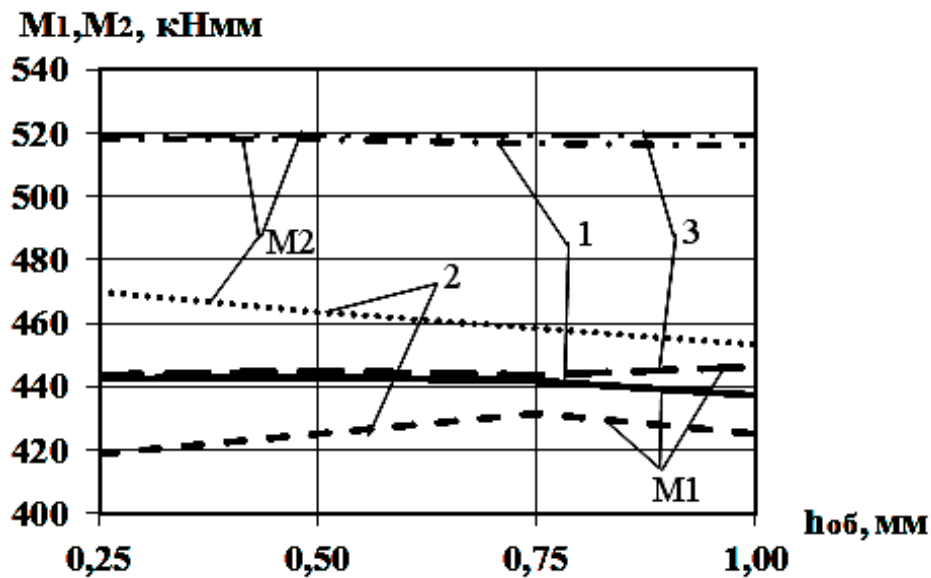
Рисунок 4.14 – Расчетные распределения упругого прогиба металлической оболочки по длине очага деформации в зависимости от изменения обжатия

На рисунке 4.15, а представлены зависимости силы прокатки и максимального прогиба оболочки от её толщины при различных формах оболочки. Из анализа полученных распределений видно, что при увеличении толщины оболочки с 0,25 до 1,0 мм сила прокатки изменяется в небольших диапазонах (до 5%), максимальный прогиб оболочки также склонен к уменьшению. При использовании оболочек различной формы величина силы прокатки изменяется в пределах 15%.

На рисунке 4.15, б представлены зависимости моментов прокатки от толщины и формы оболочки. Из анализа данных распределений видно, что моменты увеличиваются на незначительную величину до 5%. При использовании оболочек различной формы момент прокатки на верхнем валке со стороны порошка практически не изменяется, в то время как момент на нижнем валке со стороны оболочки изменяется в диапазоне до 13,5%.



а)



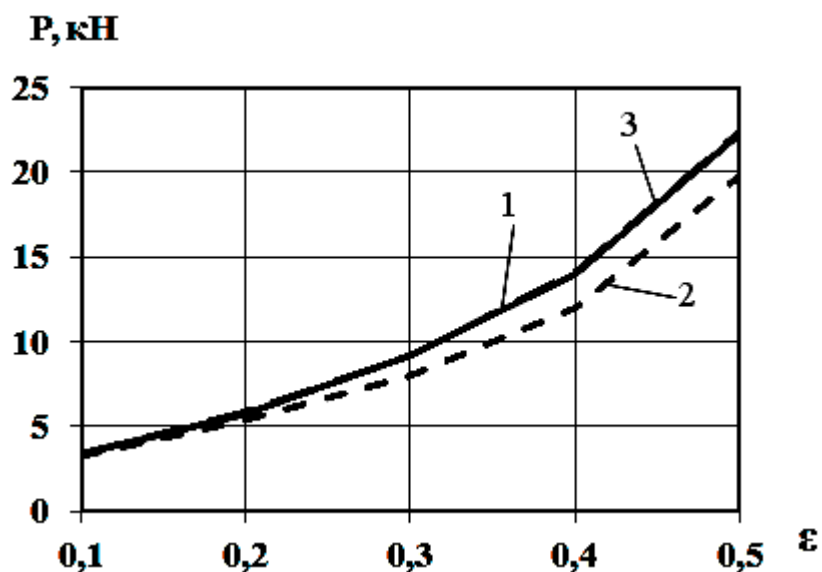
б)

1 – прямоугольная оболочка, 2 – подложка, 3 – коробчатая оболочка

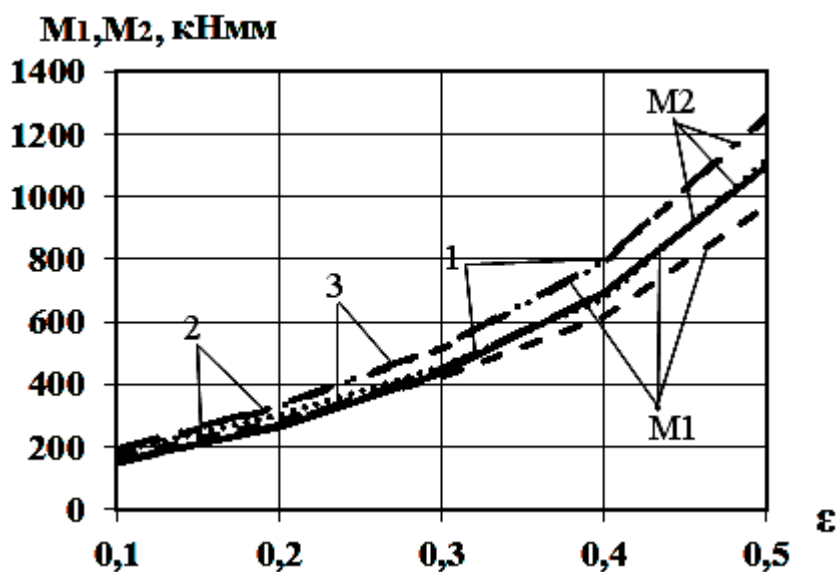
Рисунок 4.15 – Расчетные распределения силы прокатки и упругого прогиба металлической оболочки (а) и моментов прокатки (б) в зависимости от изменения толщины оболочки при разных ее формах

На рисунке 4.16 представлены зависимости силы и моментов прокатки от величины обжатия, из анализа которых видно, что с увеличением степени деформации энергосиловые параметры возрастают. Так, при изменении обжатия с 10%

до 50% уровень силы и моментов прокатки поднимается в 4...5 раз. При использовании оболочки различной формы сила прокатки изменяется в 1,16 раз, момент на верхнем валке – в 1,14 раз, момент на нижнем валке – в 1,32 раза.



а)



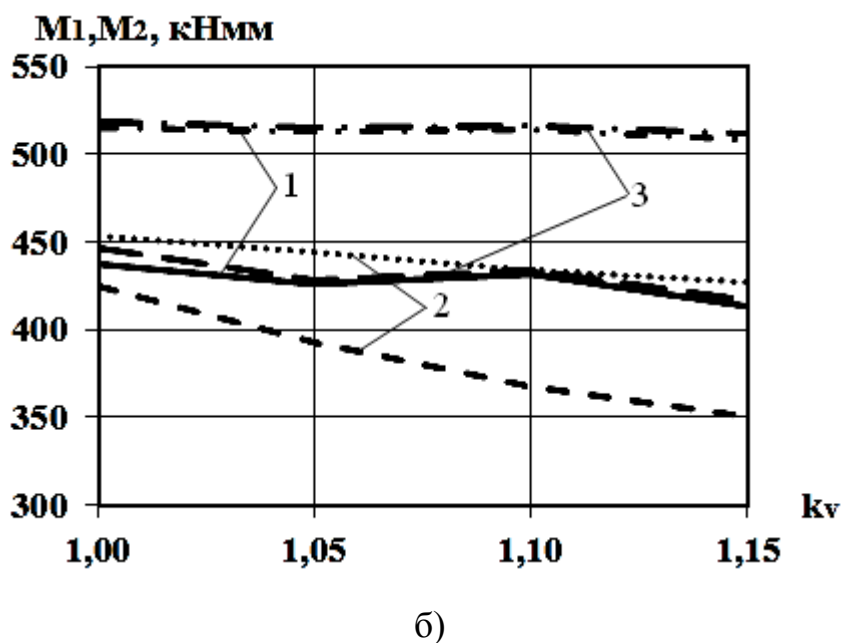
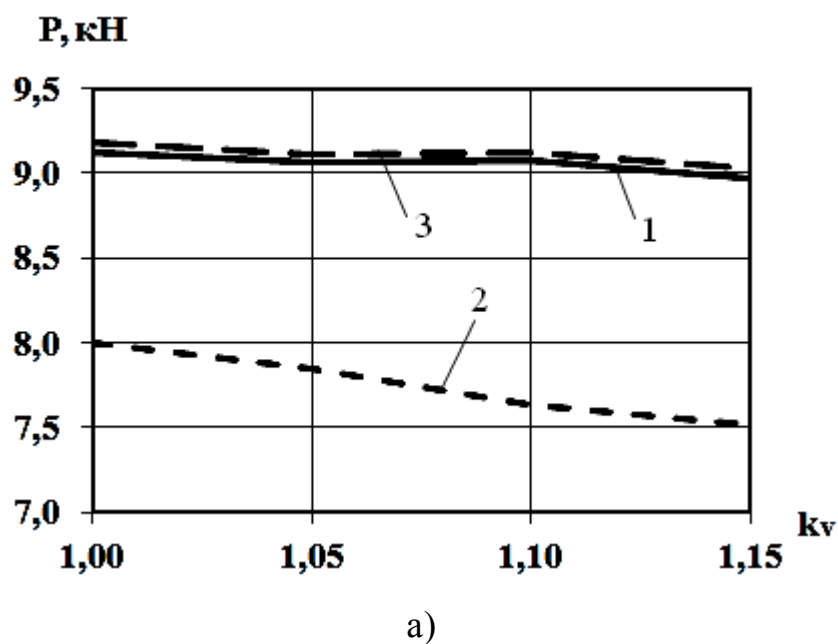
б)

1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

Рисунок 4.16 – Расчетные распределения силы (а) и моментов прокатки (б) в зависимости от изменения обжатия при разных формах оболочки

На рисунке 4.17 представлены распределения силы и моментов прокатки в зависимости от коэффициента асимметрии. Установлено, что при увеличении коэффициента асимметрии с 1,0 до 1,15 сила прокатки уменьшается в диапазоне

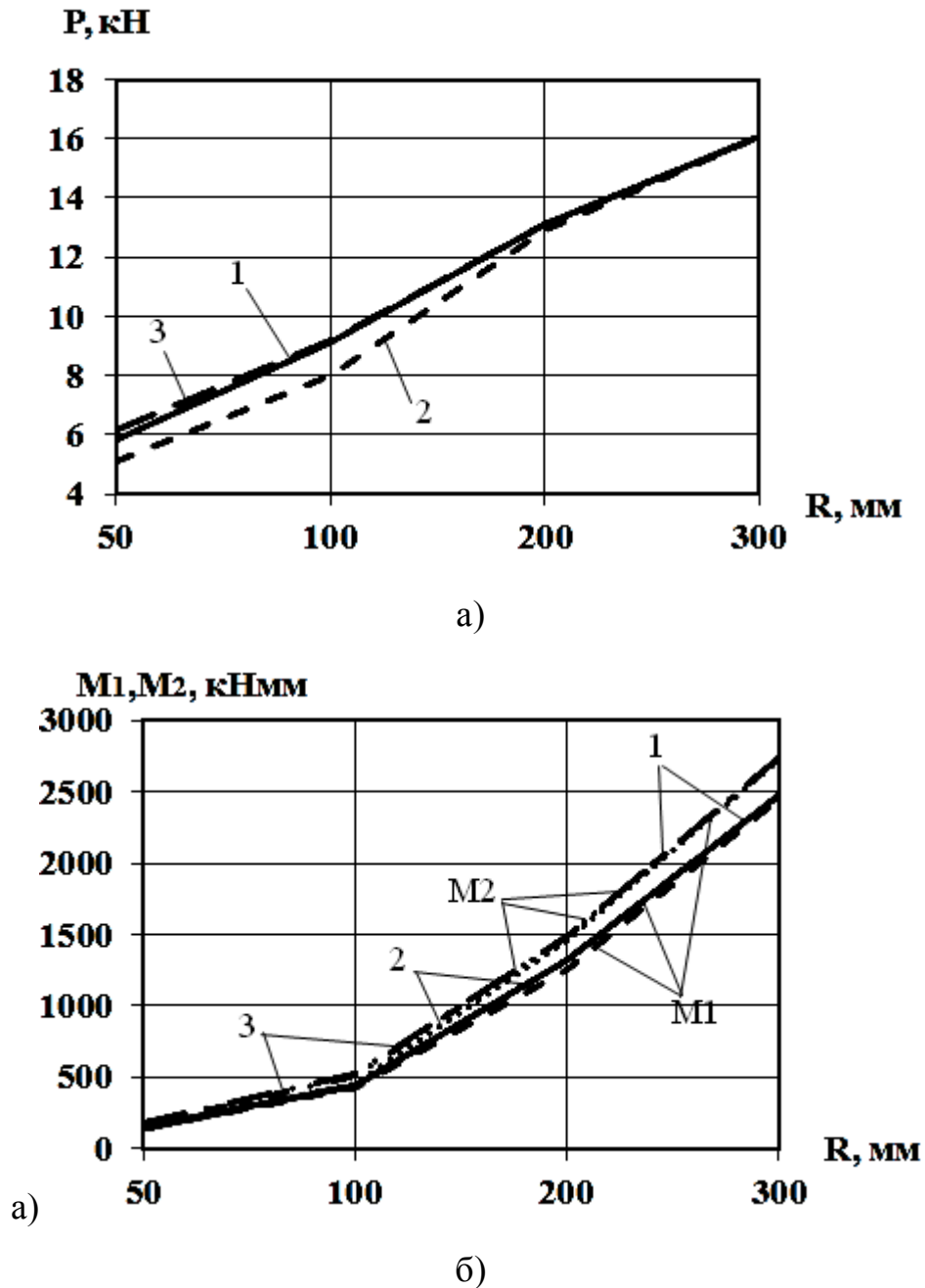
до 5%. При использовании оболочки различной формы сила прокатки изменяется до 1,2 раз. При увеличении коэффициента асимметрии момент на верхнем валке со стороны порошка уменьшается в 1,31 раза, при этом изменения момента на нижнем валке незначительны. При изменении формы оболочки моменты изменяются в диапазоне до 20%.



1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

Рисунок 4.17 – Расчетные распределения силы (а) и моментов прокатки (б) в зависимости от коэффициента асимметрии при разных формах оболочки

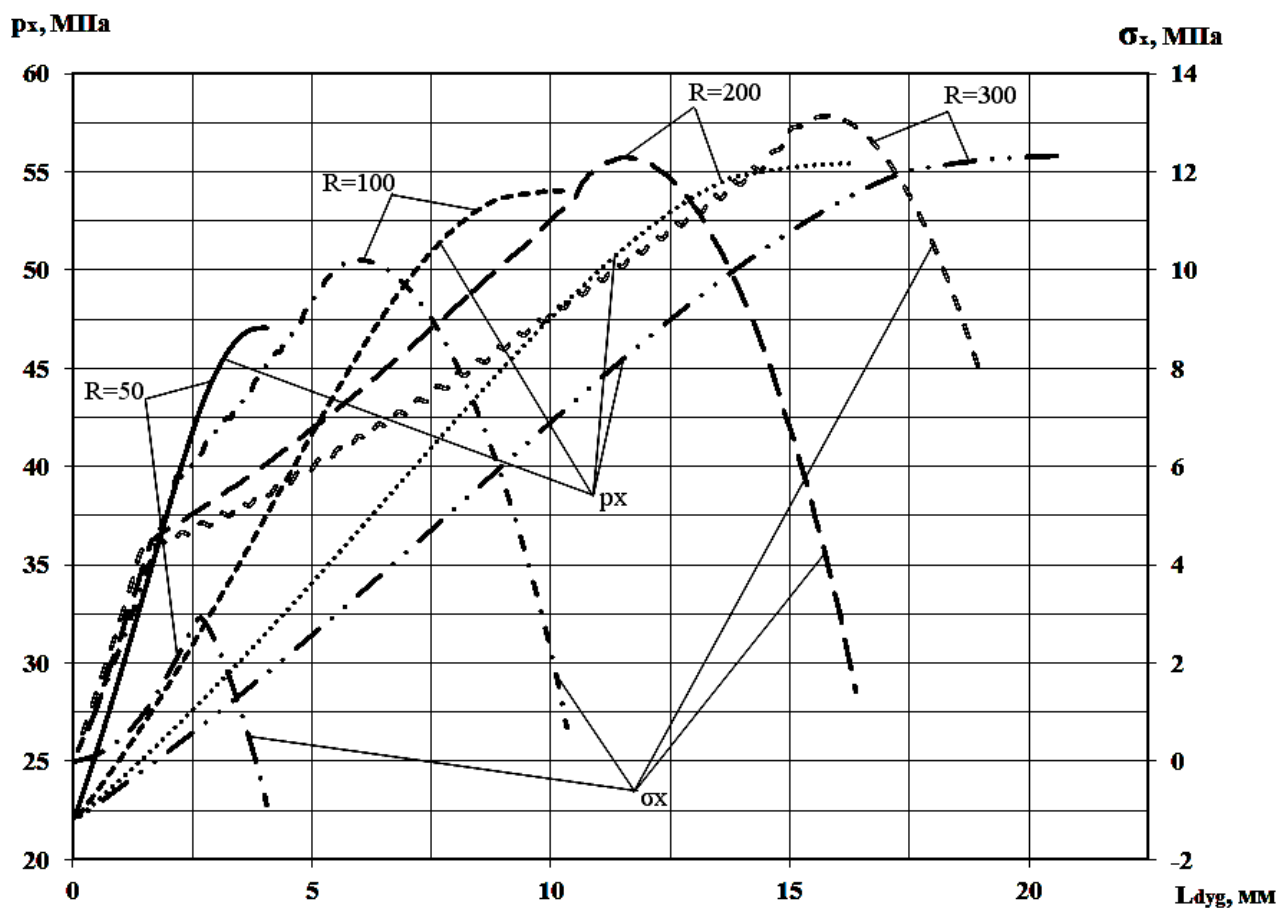
На рисунке 4.18 представлены распределения силы и моментов прокатки в зависимости от радиуса рабочих валков. При увеличении радиуса с 50 до 300 мм сила прокатки возрастает в 4 раза, а моменты – до 12 раз. При использовании оболочки различной формы диапазон изменения силы прокатки составляет до 22%, а моментов – до 10%.



1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

Рисунок 4.18 – Расчетные распределения силы (а) и моментов прокатки (б) в зависимости от изменения радиуса рабочих валков при разных формах оболочки

Также при увеличении радиуса валков наблюдается перераспределение эпюр нормальных и нормальных контактных напряжений (рис. 4.19). так, при увеличении радиуса валков с 50 до 300 мм максимальное значение нормальных контактных напряжений p_x возрастает в 1,2 раза, нормальных контактных σ_x – в 4,4 раза, длина очага деформации при этом возрастает до 5 раз.

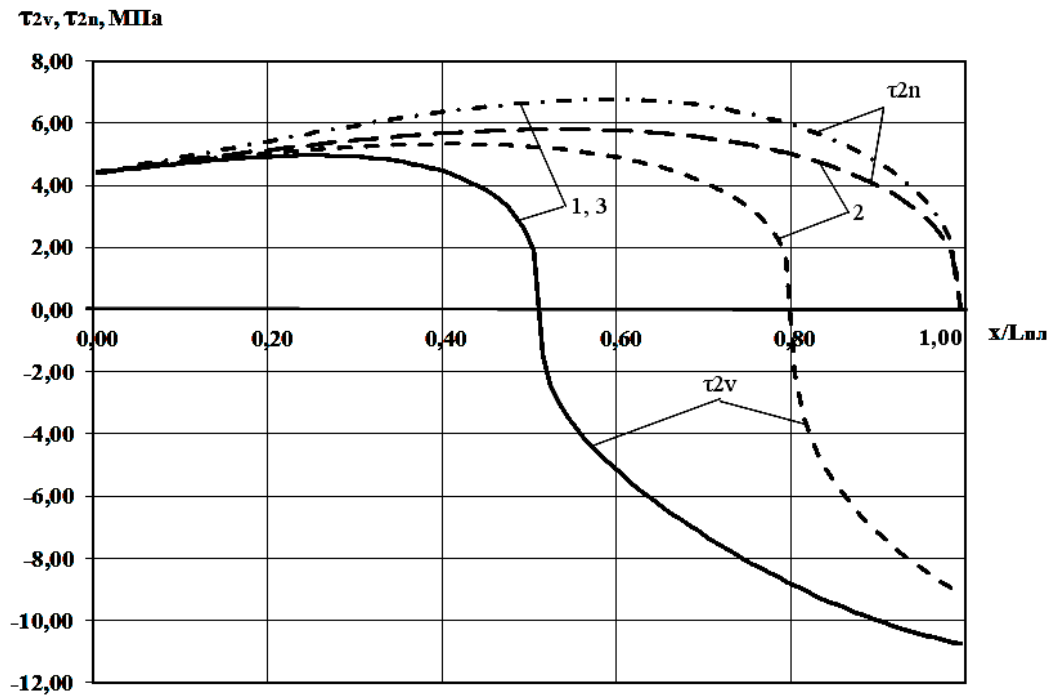


1 – $R=50$ мм; 2 – $R=100$ мм; 3 – $R=200$ мм; 4 – $R=300$ мм

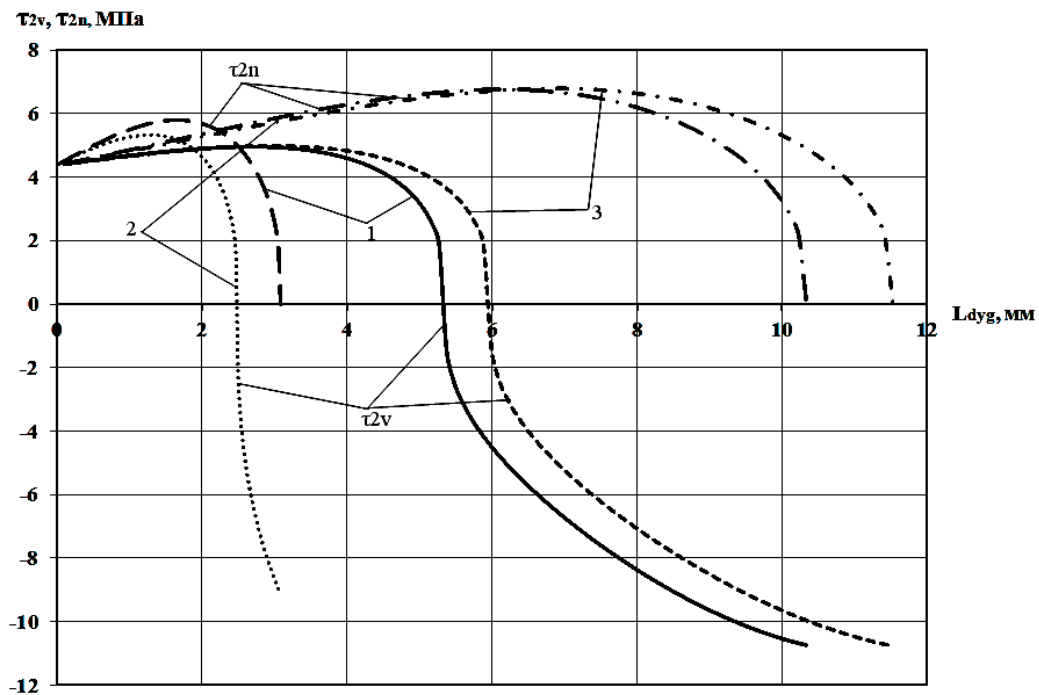
Рисунок 4.19 – Расчетные распределения нормальных и нормальных контактных напряжений по длине дуги контакта в зависимости от изменения радиуса рабочих валков

На рисунке 4.20 даны распределения касательных контактных напряжений τ_x в зависимости от формы оболочки. При этом максимальные значения данных напряжений изменяются незначительно, в то время как существенно изменяется характер их распределения по длине очага деформации. Так, при изменении

формы оболочки нейтральное сечение со стороны верхнего вала меняет свое положение в диапазоне 0,5...0,8 от общей протяженности очага деформации, которая также зависит от формы оболочки и изменяется в диапазоне до 4 раз.



а)

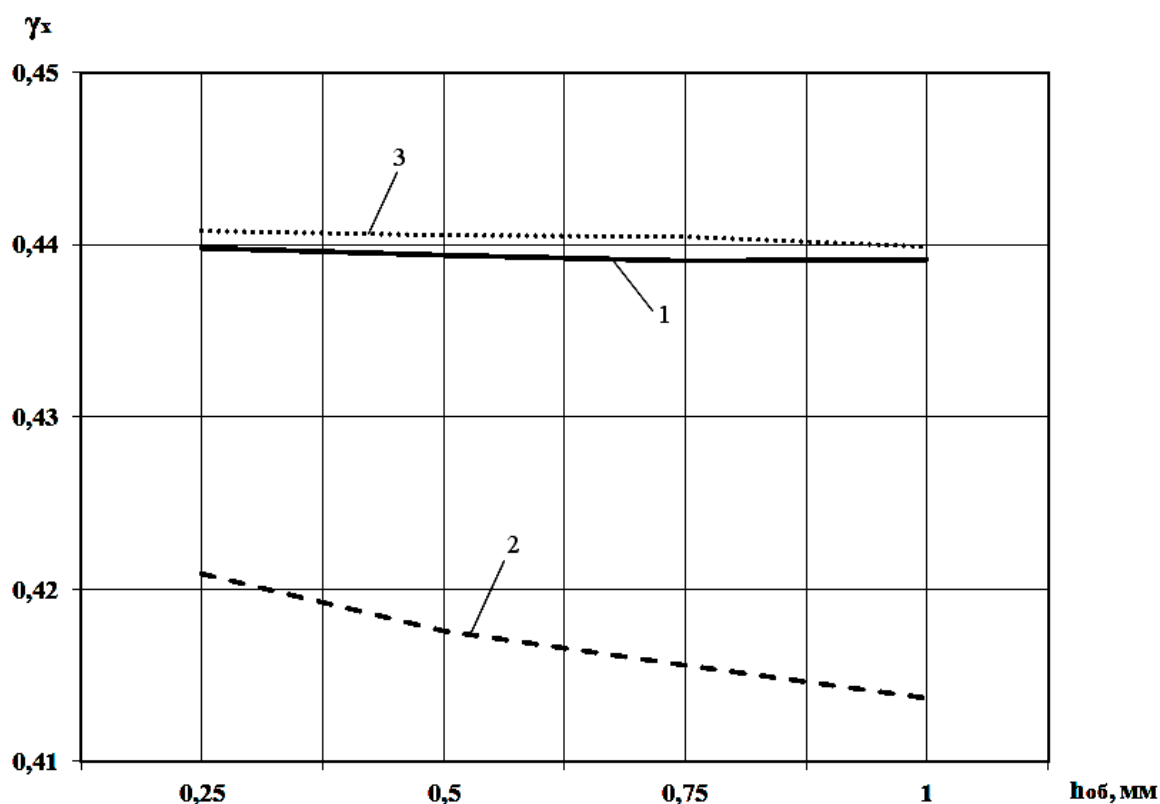


б)

1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

Рисунок 4.20 – Расчетные распределения касательных нормальных напряжений по длине очага деформации (а) и по длине дуги контакта (б) в зависимости от изменения формы оболочки

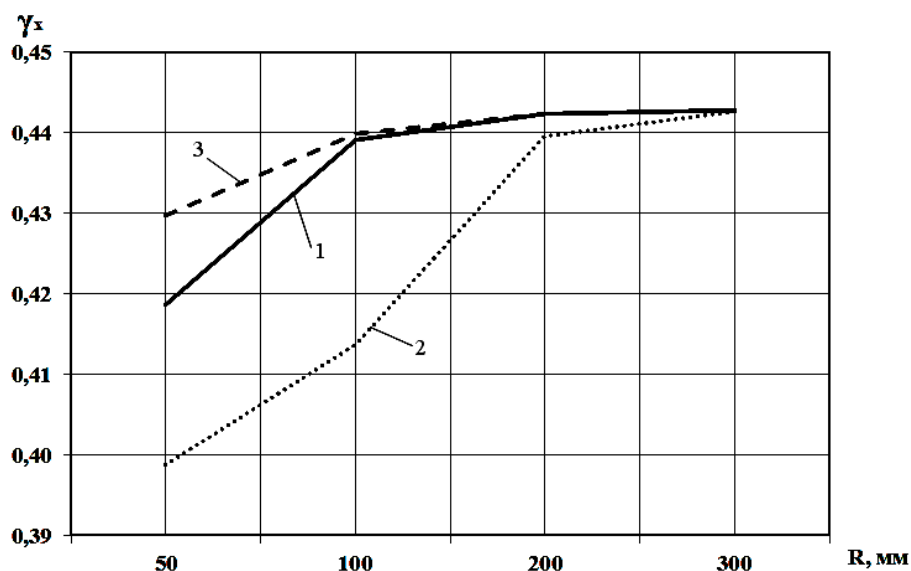
Увеличение толщины оболочки приводит к незначительному снижению плотности порошкового сердечника (рис. 4.21), форма оболочки оказывает более существенное влияние порядка 10%.



1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

Рисунок 4.21 – Расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника в зависимости от изменения толщины оболочки при разных формах оболочки

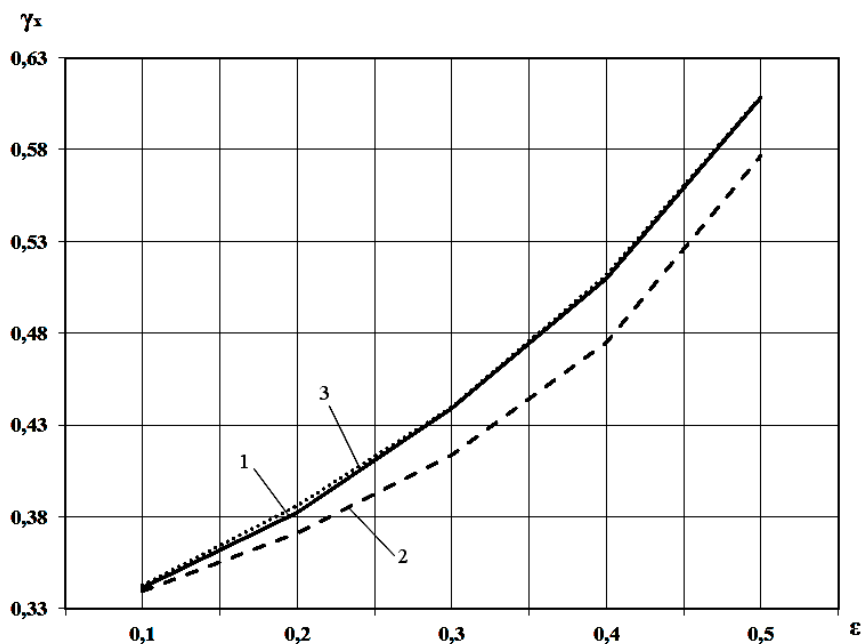
Увеличение радиуса валков приводит к увеличению относительной плотности порошкового сердечника до определенного значения (рис. 4.22), то есть наблюдается определенное значение радиуса валков, при котором его дальнейшее увеличение не приводит к значительному росту плотности порошка. В рассматриваемом случае данное значение радиуса составило 200 мм. Форма оболочки также оказывает влияние на величину плотности. В частности, диапазон её изменения составил до 10%.



1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

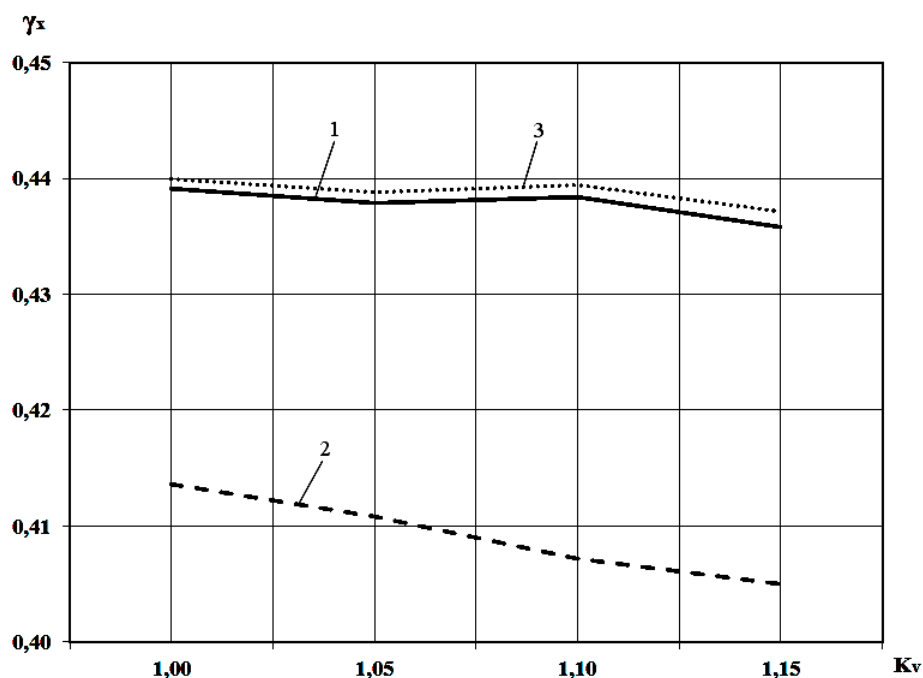
Рисунок 4.22 – Расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника от радиуса валков при разных формах оболочки

На рисунке 4.23 приведены зависимости относительной плотности порошкового сердечника от степени обжатия, с увеличением которого наблюдается рост плотности. В то же время увеличение коэффициента асимметрии приводит к снижению относительной плотности (рис. 4.24).



1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

Рисунок 4.23 – Расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника от изменения обжатия при разных формах оболочки



1 – прямоугольная оболочка, 2 – коробчатая оболочка, 3 – подложка

Рисунок 4.24 – Расчетные распределения относительной плотности порошкового сердечника в зависимости коэффициента асимметрии при разных формах оболочки

4.2 Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке двухслойного порошкового сердечника в металлической оболочке

По аналогии с методикой расчета, изложенной в подразд. 4.1, в основу предлагаемой математической модели прокатки двухслойного порошкового сердечника в металлической оболочке коробчатого сечения (рис. 4.25) положено численное рекуррентное решение конечно-разностной формы условия статического равновесия каждого из отдельно выделенных элементарных объемов, полученных путем разбиения зоны пластического формоизменения на их конечное множество.

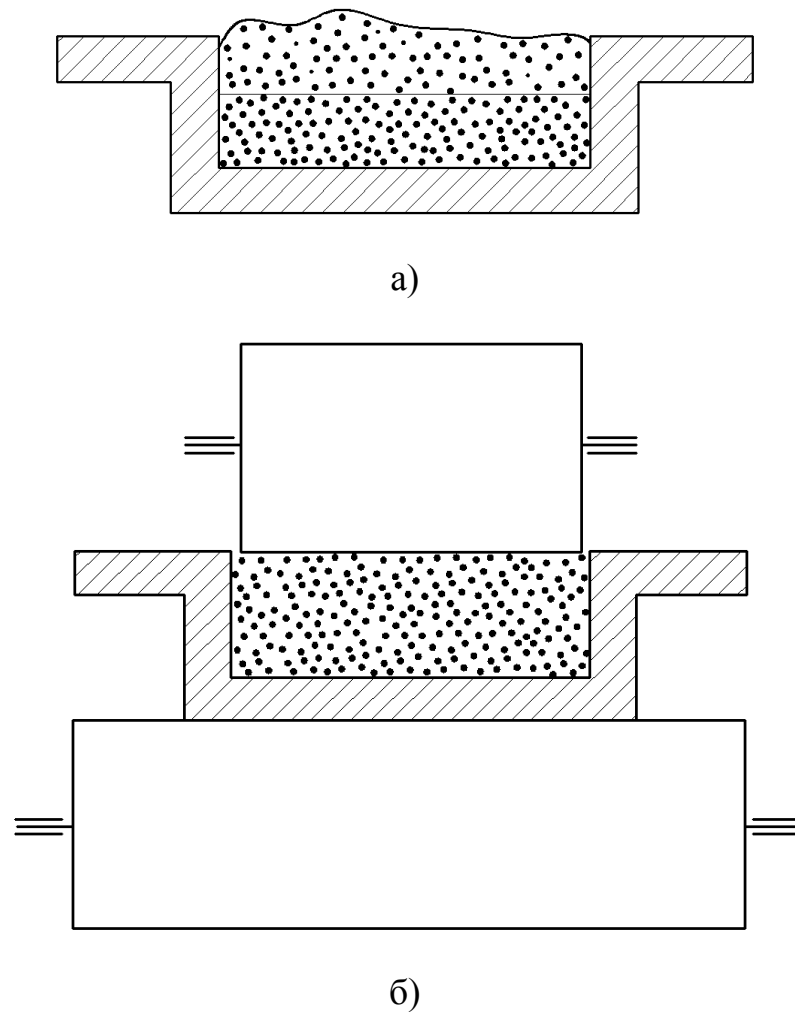


Рисунок 4.25 – Схема прокатки двух слоев порошка в металлической оболочке коробчатого сечения:

а – вторичная засыпка слоя шихты; б – уплотнение порошка

Используемая в этом случае расчетная схема интегрального очага деформации представлена на рисунке 4.26. Данная расчетная схема интегрального очага деформации включает зону уплотнения $L_{пл}$ и зону последующего упругого восстановления $L_{уп}$. С точки зрения кинематических соотношений зона уплотнения, в свою очередь, была подразделена на зоны отставания L_{om1} , L_{om2} и зоны опережения L_{on1} , L_{on2} . В связи с возможностью наличия кинематической или геометрической асимметрии процесса прокатки, протяженности указанных зон на верхнем и нижнем валках могут быть не равны между собой.

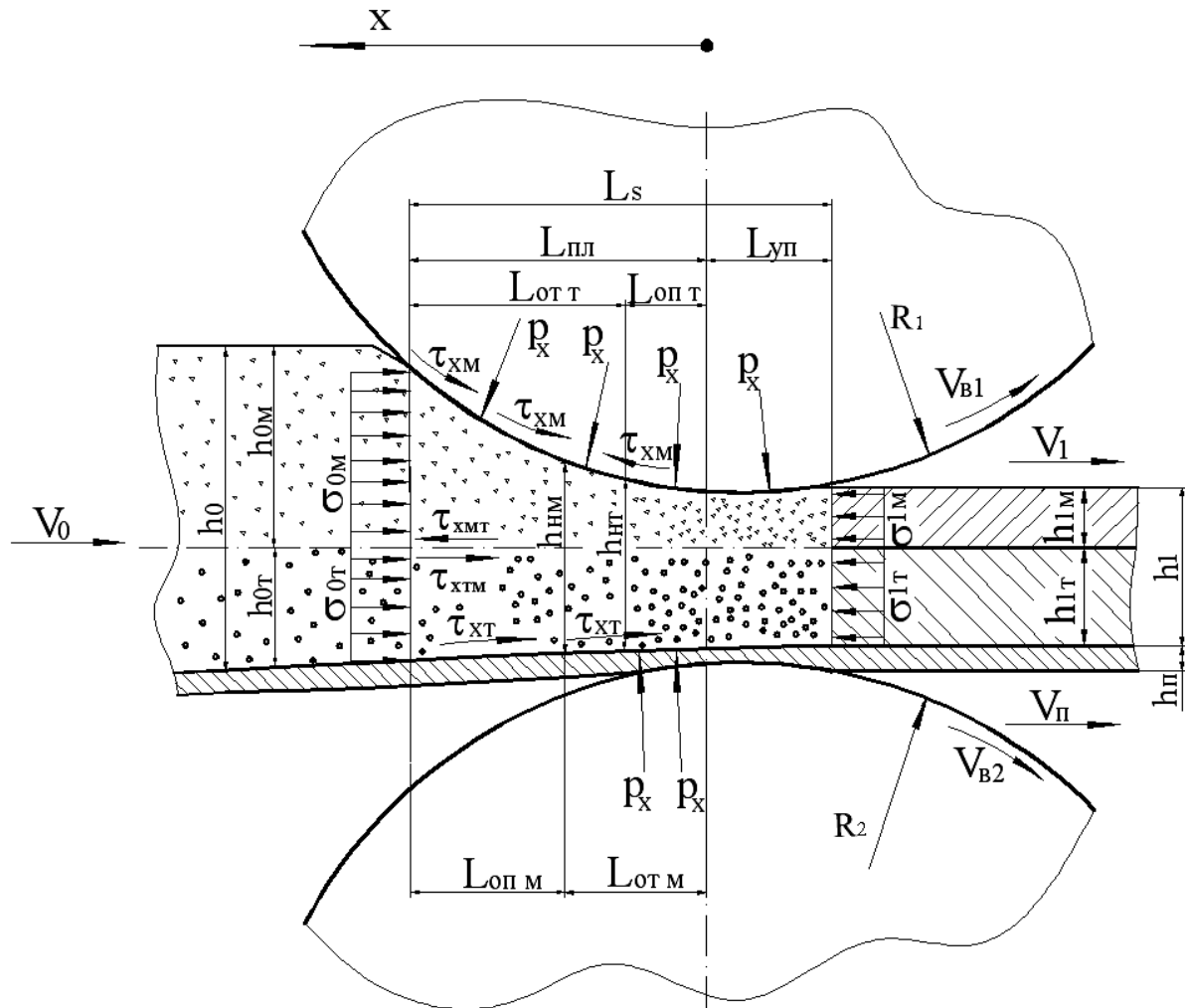


Рисунок 4.26 – Расчетная схема очага деформации процесса прокатки двух слоев порошкового материала в металлической оболочке коробчатого сечения

Расчетная схема включала в себя два слоя порошковой композиции: нижний слой – предварительно уплотненный, верхний – насыпной (деление условно и введено для учета различных физико-механических свойств порошковых сред) [230].

В качестве аналитического описания текущего по длине очага деформации значения толщины полосы h_x использовали параболическую аппроксимацию контактных дуг по формуле (4.4).

Текущие значения показателей, характеризующих, согласно закону Амонтона-Кулона, условия трения на контакте рабочих валков с насыпным слоем порошка $f_{xM} = \tau_{xM} / p_x$, оболочки с уплотнённым слоем $f_{xm} = \tau_{xm} / p_x$, а также между слоями $f_{xmm} = \tau_{xmm} / p_x$ (см. рис. 4.27) [218], определяли с учетом реального характера их распределений по длине очага деформации:

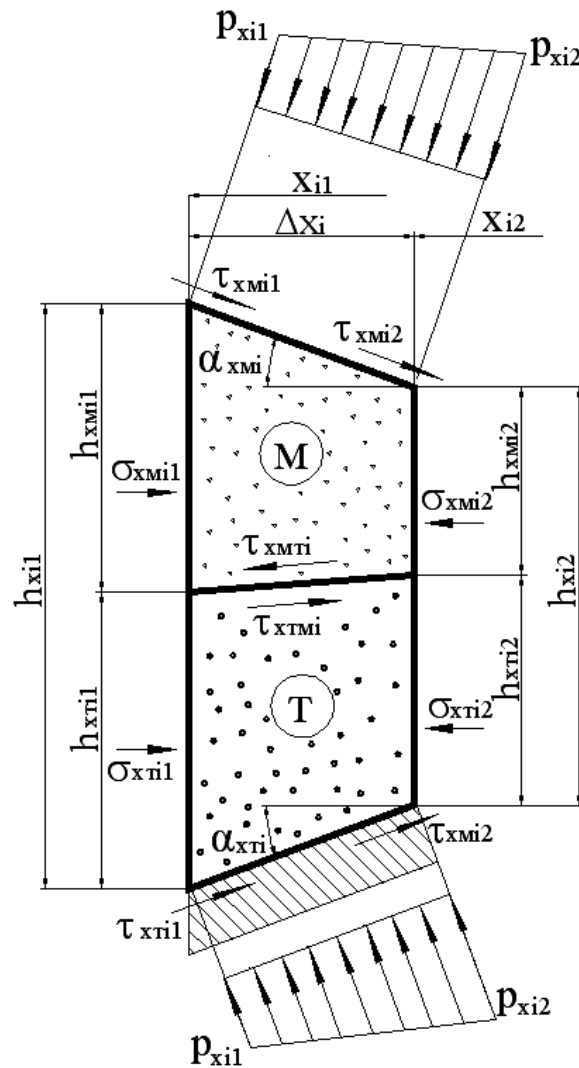


Рисунок 4.27 – Расчетная схема выделенного i -того элементарного объема при реализации процесса прокатки двух слоев порошкового материала в металлической оболочке коробчатого сечения

- со стороны нижнего валка:

$$f_{xm(m)} = \tau_{xm(m)} / P_x = -f_{on\ m(m)} \left[\frac{L_{on\ m(m)} - x}{L_{on\ m(m)}} \right]^{a_{fm(m)}} \quad \text{при } 0 < x \leq L_{on\ m(m)}; \quad (4.49)$$

- со стороны верхнего валка:

$$f_{xm(m)} = \tau_{xm(m)} / P_x = f_{om\ m(m)} \left[\frac{x - L_{on\ m(m)}}{L_{nl} - L_{on\ m(m)}} \right]^{a_{fm(m)}} \quad \text{при } L_{on\ m(m)} < x \leq L_{nl}; \quad (4.50)$$

$$f_{xm(m)} = \tau_{xm(m)} / P_x = -f_{on\ m(m)} \left[\frac{L_{on\ m(m)} - x}{L_{on\ m(m)}} \right]^{a_{fm(m)}} \quad \text{при } 0 < x \leq L_{on\ m(m)}; \quad (4.51)$$

- между слоями:

$$-f_{xmm} = f_{xmm} = -\tau_{xmm} / P_x = \tau_{xmm} / P_x = f_{om\ m} \left[\frac{x}{L_{nl}} \right]^{a_{fmm}}, \quad (4.52)$$

где $f_{om\ m(m)}$, $f_{on\ m(m)}$, $f_{om\ m}$ – опорные значения, равные значениям соответствующих коэффициентов трения в сечении на входе ($x = L_{nl}$) и в сечении на выходе ($x = 0$) из зоны уплотнения;

$a_{fm(m)}$, a_{fmm} – степенные показатели, характеризующие форму эпюры распределения коэффициентов трения по длине очага деформации ($a_{fm(m)(mm)} = 0,2 \dots 0,5$) [231, 232];

m , m – индексы, обозначающие предварительно уплотненный и насыпной слои прокатываемой порошковой композиции;

$L_{on m(m)}$ – протяженности зон опережения на контактных поверхностях соответствующих рабочих валков, связанные между собой функциональным описанием, вытекающим из параболической аппроксимации (4.4) и показателя степени кинематической асимметрии процесса прокатки $K_v = V_{B1}/V_{B2}$:

$$L_{on m} = \sqrt{\frac{h_1(K_v - 1)}{h_0 - h_1} + K_v \cdot \left(\frac{L_{on m}}{L_{nl}}\right)^2}. \quad (4.53)$$

Помимо отмеченных выше при разработке математической модели был принят дополнительно ряд следующих основных допущений:

- деформация порошковой полосы двумерная и установившаяся во времени, при этом кинематика течения каждого из порошковых слоев подчиняется гипотезе плоских сечений;

- граничные сечения зон уплотнения и упругого восстановления вертикальны;

- текущие значения углов контакта α_{xmi} и α_{xmi} , касательных межслойных (сдвиговых) τ_{xmmi} напряжений по длине каждого отдельного i -го выделенного элементарного объема не изменяются, в то время как изменения нормальных p_{xi} и касательных τ_{xmi} , τ_{xmi} контактных напряжений носят линейный характер;

- показатели механических свойств, нормальные напряжения $\sigma_{xm(m)i1(2)}$, а также кинематические параметры процесса прокатки изменяются только по длине очага деформации, в то время как по толщине каждого отдельного сечения рассматриваемой составляющей их величина остается постоянной.

При моделировании процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в металлической оболочке коробчатого сечения всю протяженность зоны уплотнения L_{nl} разбивали на K_R элементарных объемов, при этом геометрические

координаты для каждого i -го отдельного элементарного объема соответствовали:

$$\Delta x_i = L_{нл} / K_R; \quad x_{i2} = x_{i1} - \Delta x_i. \quad (4.54)$$

При прокатке предварительно уплотненного слоя порошкового материала в металлической оболочке и слоя добавленной шихты, то есть при отсутствии полученных предварительно межслойных связей, скорости перемещения составляющих полосы в очаге деформации будут гарантировано эквивалентны только в сечениях, близких к выходу из очага деформации: $V_{1m} = V_{1M} = V_1$, в то время, как в остальных сечениях они будут несколько отличаться друг от друга: $V_{xm} \neq V_{xM}$ и $V_{0m} \neq V_{0M}$.

Следовательно, кинематические V_{xmi} , V_{xMi} , а также геометрические h_{xmi} , h_{xMi} параметры процесса прокатки в этом случае являются неизвестными и подлежат определению. Известными в этом случае являются только значения исходных толщин предварительно уплотненного h_{0m} и насыпного h_{0M} слоев.

Полный расчет напряженно-деформированного состояния для i -го выделенного элементарного объема производится на основе целенаправленного перебора толщин h_{xmi2} , h_{xMi2} , исходя из условия равновесия конечного граничного сечения [233...236]:

$$P_{xi2} = P_{xmi2} = P_{xMi2}. \quad (4.55)$$

Для определения нормальных контактных напряжений p_{xi2} рассмотрим условие статического равновесия элементарного объема очага деформации единичной ширины, которое для уплотненного слоя будет иметь вид [237]:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{xmm} = & \sigma_{xmm2} h_{xmm2} - \sigma_{xmm1} h_{xmm1} - \frac{p_{xmm1} f_{xmm1} + p_{xmm2} f_{xmm2}}{2} \Delta x_i - \\ & - \frac{p_{xmm1} f_{xmm1} + p_{xmm2} f_{xmm2}}{2} \Delta x_i + \frac{(p_{xmm1} + p_{xmm2})(h_{xi1} - h_{xi2})}{4} - \\ & - \frac{(p_{xmm1} + p_{xmm2})(h_{xmi1} - h_{xmi2} - (h_{xi1} - h_{xi2})/2)}{2} = 0, \end{aligned} \quad (4.56)$$

где за положительные значения нормальных напряжений σ_x приняты напряжения сжатия, а направление действия касательных контактных $\tau_{xm(m)}$ и межслойных τ_{xmm} напряжений учтено знаками в функциональных описаниях (4.49)–(4.52).

Аналогично для насыпного слоя [237]:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{xmm} = & \sigma_{xmm2} h_{xmm2} - \sigma_{xmm1} h_{xmm1} - \frac{p_{xmm1} f_{xmm1} + p_{xmm2} f_{xmm2}}{2} \Delta x_i + \\ & + \frac{p_{xmm1} f_{xmm1} + p_{xmm2} f_{xmm2}}{2} \Delta x_i + \frac{(p_{xmm1} + p_{xmm2})(h_{xi1} - h_{xi2})}{4} - \\ & - \frac{(p_{xmm1} + p_{xmm2})(h_{xmi1} - h_{xmi2} - (h_{xi1} - h_{xi2})/2)}{2} = 0. \end{aligned} \quad (4.57)$$

Следует отметить, что нормальные напряжения σ_{xmi2} и σ_{xmi2} можно выразить через соответствующие нормальные контактные напряжения p_{xmi2} и p_{xmi2} , исходя из условия пластичности для сыпучих сред (3.4), выразив из него величину нормальных напряжений σ_x :

$$\begin{aligned} \sigma_{xm(m)i2} = & \frac{1 - 2\alpha_{xm(m)i2}}{1 + 4\alpha_{xm(m)i2}} p_{xm(m)i2} - \\ & - \sqrt{p_{xm(m)i2}^2 \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xm(m)i2}}{1 + 4\alpha_{xm(m)i2}} \right)^2 - 1 \right] + \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xm(m)i2}}{1 + 4\alpha_{xm(m)i2}} \beta_{xm(m)i2} \sigma_{sxm(m)i2}^2}, \end{aligned} \quad (4.58)$$

и подставив его в уравнения статического равновесия (4.56) и (4.57) можно определить нормальные контактные напряжения:

$$P_{xm(m)i2} = \frac{\sqrt{t_{1m(m)}^2 t_{2m(m)}^2 - (t_{1m(m)}^2 - t_{3m(m)}^2)(t_{2m(m)}^2 - t_{4m(m)}^2)} - t_{1m(m)} t_{2m(m)}}{t_{1m(m)}^2 - t_{3m(m)}^2}, \quad (4.59)$$

где для уплотненного слоя:

$$t_{1m} = \frac{1 - 2\alpha_{xmi2}}{1 + 4\alpha_{xmi2}} h_{xmi2} + \frac{1}{2} \left((h_{xi1} - h_{xi2}) - \frac{1}{2} (h_{xi1} - h_{xi2}) - (h_{xmi1} - h_{xmi2}) - (f_{xmi2} + f_{xmi1}) \Delta x_i \right);$$

$$t_{2m} = \frac{1}{2} P_{xmi1} \left((h_{xi1} - h_{xi2}) - \frac{1}{2} (h_{xi1} - h_{xi2}) - (h_{xmi1} - h_{xmi2}) - (f_{xmi1} + f_{xmi2}) \Delta x_i \right) - \sigma_{xmi1} h_{xmi1};$$

$$t_{3m} = h_{xmi2}^2 \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xmi2}}{1 + 4\alpha_{xmi2}} \right)^2 - 1 \right];$$

$$t_{4m} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xmi2}}{1 + 4\alpha_{xmi2}} \beta_{xmi2} \sigma_{xmi2}^2 h_{xmi2}^2, \quad (4.60)$$

для насыпного слоя:

$$t_{1M} = \frac{1 - 2\alpha_{xM2}}{1 + 4\alpha_{xM2}} h_{xM2} + \frac{1}{2} \left((h_{xi1} - h_{xi2}) - \frac{1}{2} (h_{xi1} - h_{xi2}) - (h_{xM1} - h_{xM2}) - (f_{xM2} - f_{xM1}) \Delta x_i \right);$$

$$t_{2M} = \frac{1}{2} P_{xM1} \left((h_{xi1} - h_{xi2}) - \frac{1}{2} (h_{xi1} - h_{xi2}) - (h_{xM1} - h_{xM2}) - \right) - \sigma_{xM1} h_{xM1};$$

$$t_{3M} = h_{xM2}^2 \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xM2}}{1 + 4\alpha_{xM2}} \right)^2 - 1 \right];$$

$$t_{4M} = \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xM2}}{1 + 4\alpha_{xM2}} \beta_{xM2} \sigma_{sxM2}^2 h_{xM2}^2. \quad (4.61)$$

По мере определения p_{xmi2} и P_{xmi2} конечную толщину h_{xmi2} определяли итерационно исходя из условия (4.55):

$$h_{xM2(k+1)} = h_{xM2k} - A_h \cdot \text{sign}\{p_{xmi2k} - P_{xmi2k}\}, \quad (4.62)$$

где в первом цикле k -ой итерационной процедуры, исходя из первоначального предположения о равенстве вытяжек, принимали $h_{xM2k}|_{k=1} = h_{xM1} h_{xi2} / h_{xi1}$;

A_h – шаг изменения толщины слоя, величина которого в зависимости от степени приближения к исходному результату была принята переменной;

$\text{sign}\{p_{xmi2k} - P_{xmi2k}\}$ – градиентная оценка направления следующего приращения, соответствующая:

$$\text{sign}\{p_{xmi2} - P_{xmi2}\} = \begin{cases} 1 & \text{при } p_{xmi2} > P_{xmi2}; \\ 0 & \text{при } p_{xmi2} \approx P_{xmi2}; \\ -1 & \text{при } p_{xmi2} < P_{xmi2}. \end{cases} \quad (4.63)$$

Текущие значения относительной плотности порошковых композиций в металлической оболочке коробчатого сечения определяются аналогично по методике, изложенной в подразд. 4.1 (4.19)–(4.20).

Переходя к показателям напряженно-деформированного состояния i -го выделенного элементарного объема для данного случая прокатки (см. рис. 4.27) относительная деформация порошкового слоя в продольном направлении:

$$\varepsilon_{lxm(m)i2} = \frac{\sigma_{xm(m)i2}(1 + 4\alpha_{xm(m)i2}) - p_{xm(m)i2}(1 - 2\alpha_{xm(m)i2})}{p_{xm(m)i2}(1 + 4\alpha_{xm(m)i2}) - \sigma_{xm(m)i2}(1 - 2\alpha_{xm(m)i2})} \times \times \frac{h_{xm(m)i1} - h_{xm(m)i2}}{h_{xm(m)i1}}, \quad (4.64)$$

и, исходя из условия сохранения массы, результирующее в рамках данного объема, значение относительной плотности порошковой среды может быть определено как:

$$\gamma_{xm(m)i2} = \frac{\gamma_{xm(m)i1} h_{xm(m)i1}}{h_{xm(m)i2} (1 + \varepsilon_{lxm(m)i2})}. \quad (4.65)$$

Рассмотренные в рамках данного подраздела зависимости наряду с итерационными процедурами по определению протяженности очага деформации, зоны упругого восстановления и определения интегральных характеристик процесса (подразд. 4.1) составили полный алгоритм по расчету напряженно-деформированного состояния при прокатке двухслойных порошковых лент, на основе которого были разработаны программные средства, представленные в приложении В.

В качестве примера результатов численной реализации разработанных программных средств на рисунке 4.28 представлены расчетные распределения

толщин и относительных плотностей слоев по длине очага деформации и распределения относительных плотностей слоев и силы прокатки в зависимости от обжатия (рис. 4.29).

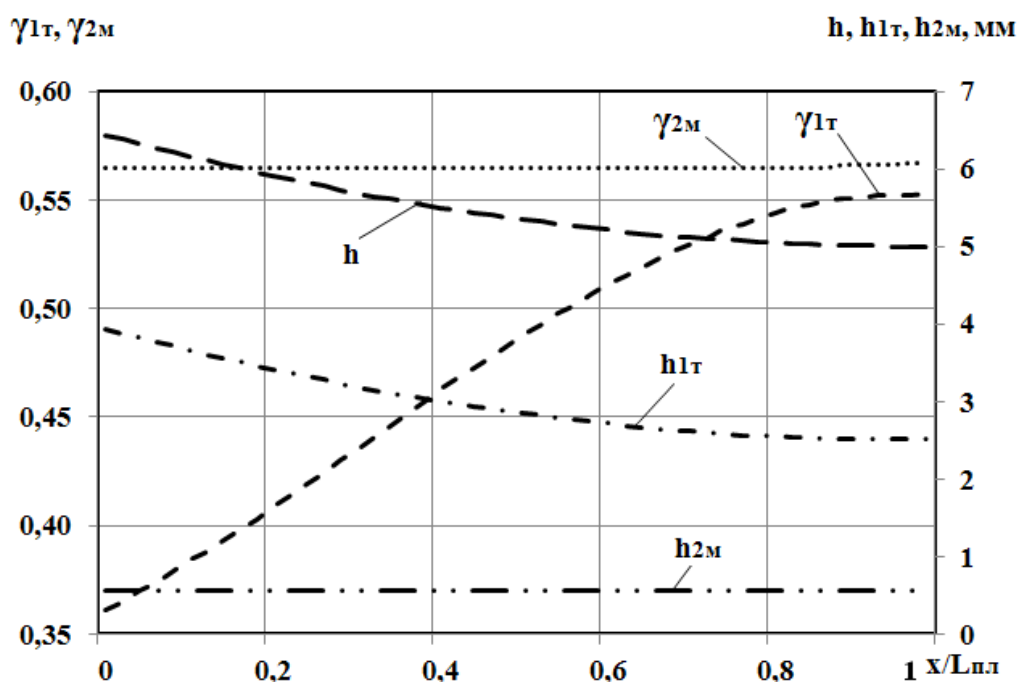


Рисунок 4.28 – Расчетные распределения толщин и относительных плотностей слоев и ленты по длине очага деформации процесса прокатки двух слоев порошковой ленты в металлической оболочке

Расчеты выполнены для прокатки железного порошка марки ПЖРЗ с относительной плотностью 0,365 и слоя медного порошка с относительной плотностью 0,565 в валках диаметром 260 мм со скоростью прокатки 0,03 м/с (толщина первого слоя – 4 мм, второго – 2,5 мм).

Из анализа представленных расчетных распределений видно, что при прокатке двухслойной порошковой ленты происходит значительное уменьшение слоя медного порошка, однако железный слой уменьшается по толщине только на выходе из очага деформации. Общая толщина ленты в процессе прокатки интенсивно снижается практически по всей длине очага деформации.

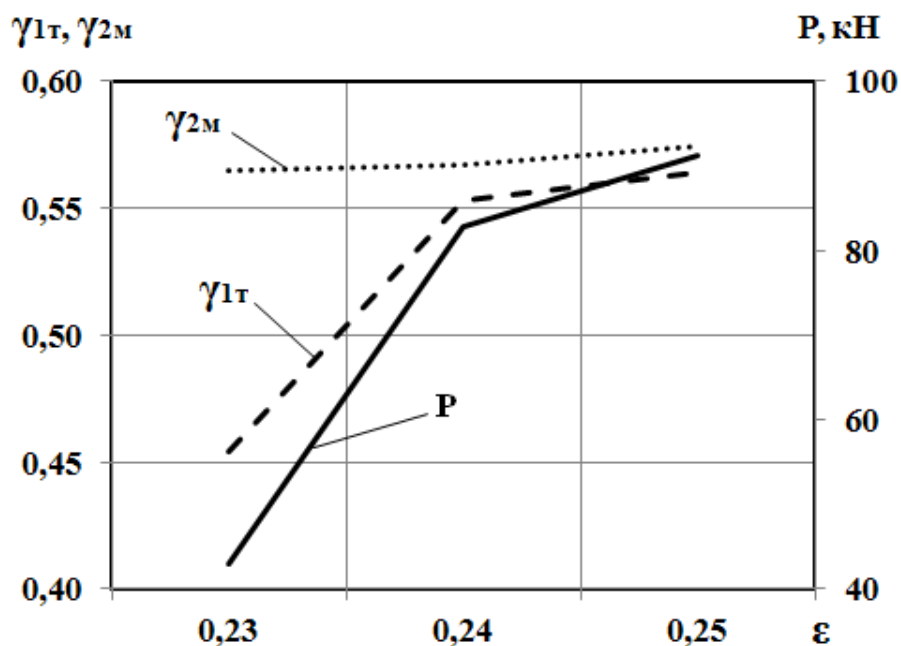


Рисунок 4.29 – Расчетные распределения относительных плотностей слоев и силы прокатки в зависимости от обжатия процесса прокатки двух слоев порошковой ленты в металлической оболочке

Также имеет место интенсивный рост конечной относительной плотности менее пластичного слоя материала и стабилизация роста на выходе из зоны деформации конечной относительной плотности второго слоя порошковой композиции, которая составляет 1-2%. Проведенные дополнительные расчеты показывают, что при меньшем обжатии плотность первого слоя не достигает плотности второго слоя. При увеличении обжатия второй слой начинает деформироваться и, в итоге, оба слоя имеют разную плотность. Это свидетельствует о целесообразности решения оптимизационных задач по выбору режимов обжатий.

4.3 Численное математическое моделирование процесса прокатки порошковой ленты в закрытой оболочке

Заключительная прокатка порошковой ленты в металлической оболочке закрытого типа (рис. 4.30), которую можно представить в виде двух металлических подложек, перемещающихся со скоростью V_n , равной выходной скорости

прокатываемой композиции, и обладающих определенной жесткостью, приводит к видоизменению кинематических и геометрических параметров процесса прокатки (рис. 4.31). В частности, имеют место задний и передний подпор, неопределенность общей протяженности очага деформации.

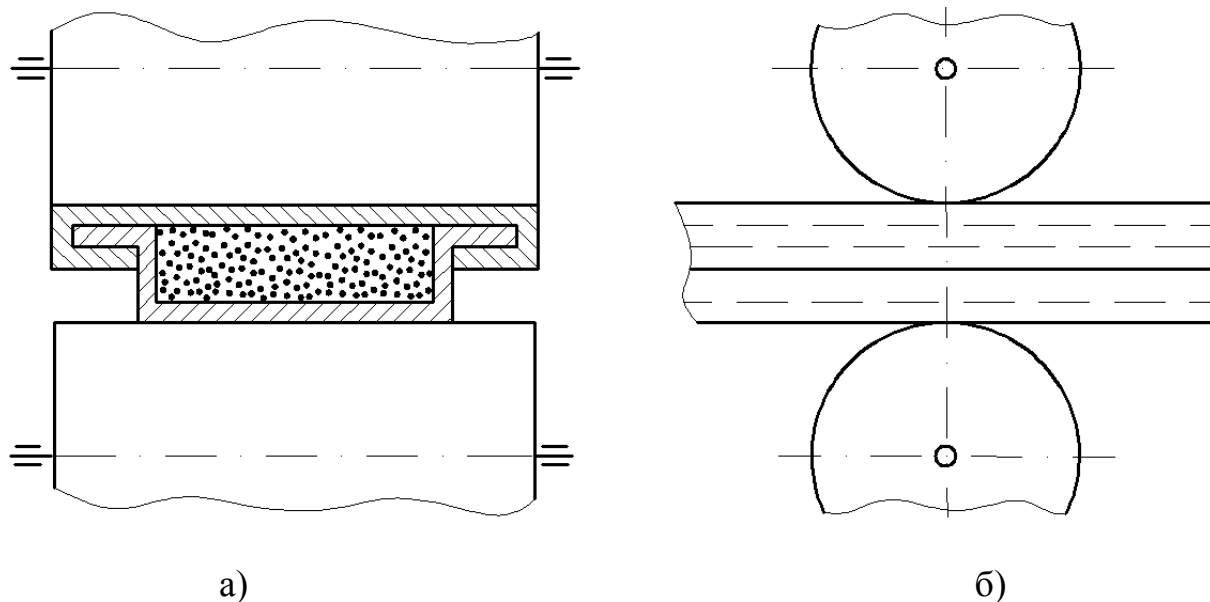


Рисунок 4.30 – Схема формирования порошковой электродной ленты:

а – вид спереди; б – вид сбоку

При прокатке порошковой ленты возникает весьма прочная связь между металлической оболочкой и порошковым слоем, как в продольном, так и в поперечном направлениях.

Это, в свою очередь, приводит к соответствующим изменениям основных параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации. С физической точки зрения, возникновению прочной связи порошка и металла подложки соответствует обращение в ноль деформаций в продольном и поперечном направлениях: $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$ [238...241].

Поэтому характер деформирования становится идентичным процессу уплотнения порошкового материала в закрытой матрице.

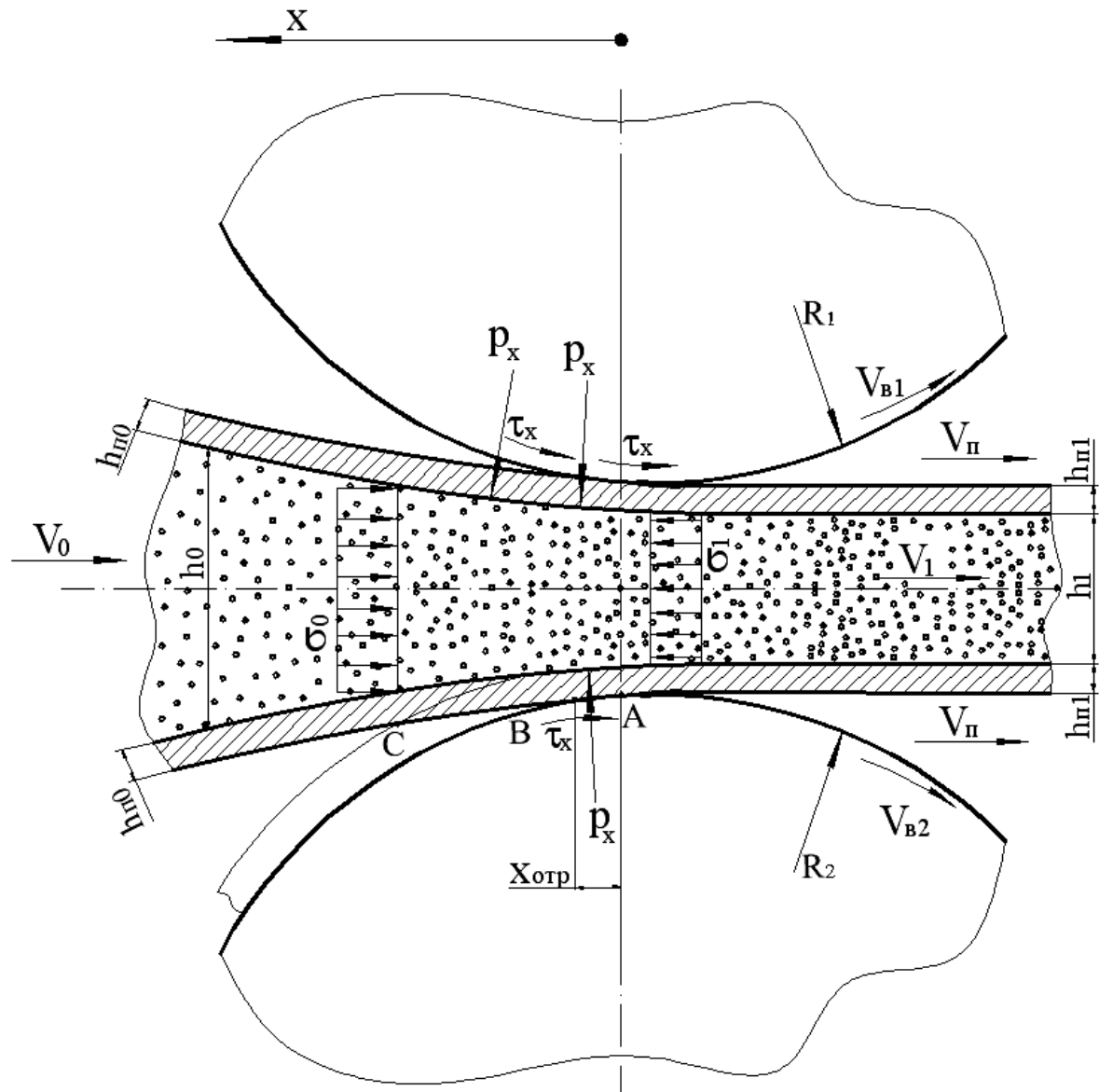


Рисунок 4.31 – Расчетная схема очага деформации при прокатке
порошковой электродной ленты

Величина нормальных контактных и нормальных осевых напряжений в этом случае определяется соотношениями [129; 242]:

$$p_x = \frac{\sigma_{sx}}{3} \cdot \sqrt{\frac{1 + 4\alpha_x}{\alpha_x} \beta_x}; \quad (4.66)$$

$$\sigma_x = \frac{1 - 2\alpha_x}{1 + 4\alpha_x} p_x, \quad (4.67)$$

где α_x, β_x – переменные по длине очага деформации коэффициенты, учитывающие специфику прокатки именно порошкового материала;

σ_{sx} – текущее значение предела текучести твердой фазы порошковой композиции.

Для вычисления величины эквивалентной пластической деформации при прокатке порошкового материала используют зависимость [129]:

$$\varepsilon_{ex} = \frac{1}{3} \sum_{\gamma=1}^{\gamma} \beta_x^{0,5} \left(4 + \frac{1}{\alpha_x} \right)^{0,5} \frac{\Delta\gamma_x}{\gamma_x^2}, \quad (4.68)$$

где $\Delta\gamma_x$ – приращение относительной плотности при переходе от $(\gamma-1)$ -го к γ -му конечному объему.

Ввиду равенства нулю величин продольной и поперечной деформации, для определения текущего значения относительной плотности γ применим закон сохранения массы, откуда:

$$\gamma_{xi} = h_0 \gamma_0 / h_{xi}. \quad (4.69)$$

Необходимо также обратить внимание на то, что, вследствие возникновения связи между порошковой средой и металлом оболочки, дополнительному определению подлежит величина сдвиговых напряжений τ_x , имеющего место в плоскости сопряжения металла оболочки и порошкового слоя. Определение величины τ_{xi} осуществляли непосредственно из уравнения равновесия выделенного элементарного объема (рис. 4.32) [233; 243]:

$$\sum F_{xi} = \sigma_{xi2} h_{xi2} - \sigma_{xi1} h_{xi1} + \frac{P_{xi1} + P_{xi2}}{2} (h_{xi1} - h_{xi2}) - \tau_{xi} \Delta x_i = 0. \quad (4.70)$$

Записав это уравнение относительно τ_{xi} , получим:

$$\tau_{xi} = \frac{\sigma_{xi2}h_{xi2} - \sigma_{xi1}h_{xi1} + (p_{xi1} + p_{xi2})(h_{xi1} - h_{xi2})/2}{\Delta x_i}. \quad (4.71)$$

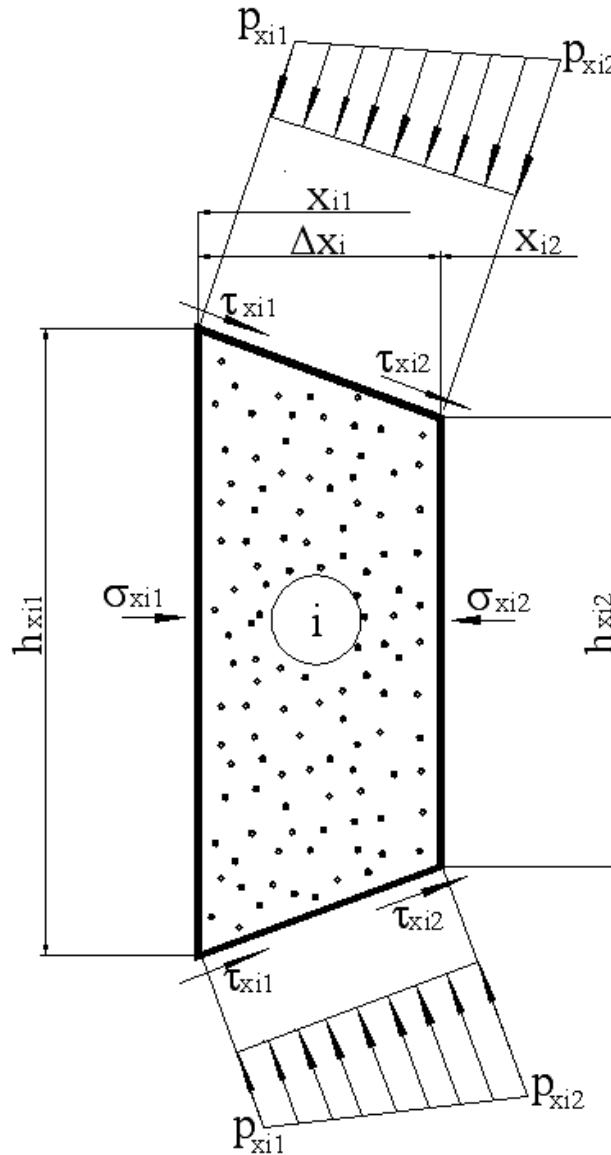


Рисунок 4.32 – Расчетная схема выделенного i -того элементарного объема при реализации процесса прокатки порошковой электродной ленты

В самом общем случае, как это следует из расчетной схемы (рис. 4.31), часть металлической оболочки (участок AB) под действием нормальных контактных напряжений p_x будет плотно прижата к образующей поверхности рабочего вала, в то время как оставшаяся часть (участок BC) не будет контактировать с валком, вследствие определенной жесткости оболочки. Исходя из изложенного выше, расчетную схему оболочки можно представить в виде консольной балки с жестким защемлением в сечении, соответствующем точке отрыва оболочки от рабочего вала B и имеющем геометрическую координату $x_{отр}$ (рис. 4.31). Приняв допущение о кусочно-линейной аппроксимации характера изменения нормальных контактных напряжений p_x на участке BC , являющейся близкой к реальным расчетным и эмпирическим распределениям [244; 245], текущее значение упругого прогиба металлической оболочки на данном участке, согласно рекомендациям работы [228], может быть определено как:

$$W_x = \frac{p_x b (L_{нл} - x_{отр})^5}{120 E_n I} \left[4 - 5 \frac{L_{нл} - x}{L_{нл} - x_{отр}} + \left(\frac{L_{нл} - x}{L_{нл} - x_{отр}} \right)^5 \right], \quad (4.72)$$

где h_n – толщина оболочки на её свободном участке;

E_n – модуль упругости материала металлической оболочки.

I – момент инерции сечения металлической оболочки электродной ленты относительно оси x [228]:

$$I = \frac{(B + 2(b_1 + h))H^3 - b(H - h)^3 - 2(b_1 + h)(H - 2h)^3}{12}, \quad (4.73)$$

где B, H, b, b_1, h, h_1 – геометрические параметры сечения металлической оболочки (рис. 4.33).

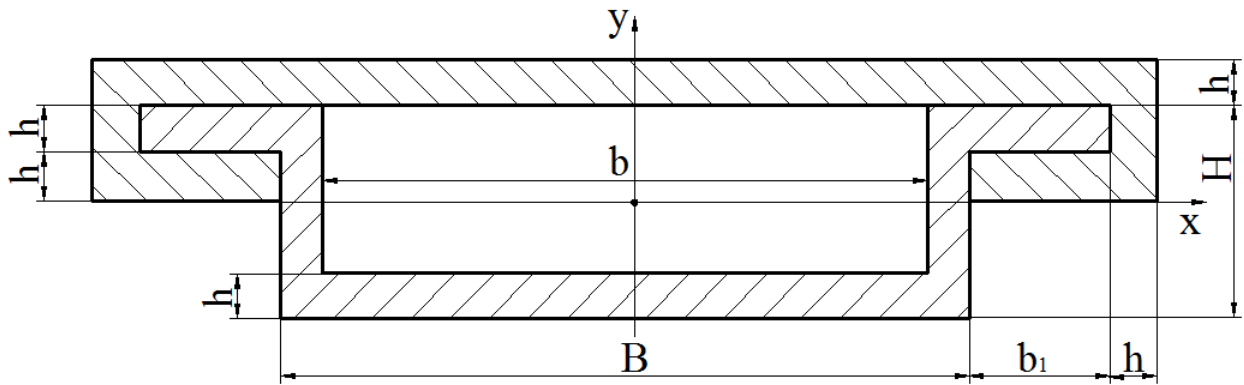


Рисунок 4.33 – Расчетная схема сечения металлической оболочки
электродной ленты

И, наконец, обобщив упруго-деформационное решение (4.73), текущее значение составляющих абсолютного обжатия порошкового сердечника в окончательном виде можно определить как [246]:

$$\Delta h_x = (R_2 + h_{nx}) - \sqrt{(R_2 + h_{nx})^2 - x^2} \quad \text{при } x \leq x_{omp}, \quad (4.74)$$

$$\begin{aligned} \Delta h_x = & (R_2 + h_{nx}) \left[1 - \cos \left(\arcsin \left(\frac{x}{R_2 + h_{nx}} \right) \right) \right] + \\ & + (x - x_{omp}) \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_{omp}}{R_2 + h_{nx}} \right) + \frac{p_x b (L_{нл} - x_{omp})^5}{120 E_n I} \times \\ & \times \left[4 - 5 \frac{L_{нл} - x}{L_{нл} - x_{omp}} + \left(\frac{L_{нл} - x}{L_{нл} - x_{omp}} \right)^5 \right] \quad \text{при } x_{omp} < x \leq L_{нл}, \end{aligned} \quad (4.75)$$

где геометрическая координата точки отрыва x_{omp} (см. рис. 4.31), а вместе с ней и величина нормальных контактных напряжений в данном сечении p_x подлежат дополнительному итерационному определению, исходя из условий

$x_{omp} = x_i$ и $p_x = p_i$ при соответствии чисто геометрического (4.74) и упруго-деформационного (4.75) решений в рамках выделенного элементарного объема, т.е. при:

$$\begin{aligned} \Delta h_{xi} &= R_2 + h_{nxi} - \sqrt{(R_2 + h_{nxi})^2 - x_{(i-1)}^2} = \\ &= [x_{i-1} - x_i] \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_i}{R_2 + h_{nxi}} \right) + \\ &+ \frac{p_{xi} b (L_{nл} - x_i)^5}{10 E_n I} \left[4 - 5 \frac{L_{nл} - x_{i-1}}{L_{nл} - x_i} + \left(\frac{L_{nл} - x_{i-1}}{L_{nл} - x_i} \right)^5 \right], \end{aligned} \quad (4.76)$$

где i – порядковый номер элементарного сечения, получаемый путем разбиения всей зоны уплотнения очага деформации на заданное количество элементарных объемов;

h_{nxi} – текущее значение толщины оболочки, предполагающее возможность её пластического деформирования на участке AB .

Вследствие наличия функциональной взаимосвязи $L_{nл}(h_x)$ и $h_x(L_{nл})$ итерационному определению подлежит и общая протяженность зоны уплотнения $L_{nл}$. Непосредственно численное определение данной геометрической характеристики осуществляли на основе метода дихотомии со следующим аналитическим описанием итерационной процедуры решения:

$$\begin{aligned} L_{nлк} &= (L_{0\min k} + L_{0\max k}) / 2; \\ L_{0\min(k+1)} &= L_{nлк}; L_{0\max(k+1)} = L_{0\max k} && \text{при } \cdot h_{xk} |_{x=L_{nлк}} < h_0; \\ L_{0\min(k+1)} &= L_{0\max k}; L_{0\max(k+1)} = L_{nлк} && \text{при } \cdot h_{xk} |_{x=L_{nлк}} > h_0, \end{aligned} \quad (4.77)$$

при следующих начальных условиях:

$$L_{0\min} |_{k=1} = \sqrt{(R_2 + h_{nxi}) \Delta h - \Delta h^2 / 4}; \quad L_{0\max} |_{k=1} = \infty, \quad (4.78)$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

$h_{xk} |_{x=L_{nlk}}$ – расчетное в данном цикле значение исходной толщины порошковой композиции сердечника, определяемое согласно (4.76) как:

$$\begin{aligned}
 h_{xk} |_{x=L_{nlk}} = & h_1 + (R_2 + h_{nxi}) \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{x_{ik}}{R_1 + h_{nxi}} \right) \right] + (R_2 + h_{nxi}) \times \\
 & \times \left[1 - \cos \left(\arcsin \frac{x_{ik}}{R_1 + h_{nxi}} \right) \right] + (L_{nlk} - x_{ik}) \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_{ik}}{R_2 + h_{nxi}} \right) + \\
 & + (L_{nlk} - x_{ik}) \operatorname{tg} \left(\arcsin \frac{x_{ik}}{R_2 + h_{nxi}} \right) + 2 \frac{4p_{xik} b (L_{nlk} - x_{ik})^5}{120 E_n I}.
 \end{aligned} \quad (4.79)$$

Зависимости (4.73)–(4.79) в сочетании с численным рекуррентным решением (4.66)–(4.71) составили полный алгоритм расчета общей протяженности L_{nl} и текущего по длине очага деформации значения толщины h_x , а также напряженно-деформированного состояния порошкового сердечника при прокатке порошковой ленты в закрытой оболочке.

Конечно-разностный подход был реализован и применительно к анализу напряженно-деформированного состояния монометаллической оболочки порошковой ленты [247; 248]. Соответствующая форма записи условия статического равновесия выделенного i -го элементарного объема (см. рис. 4.32) в этом случае имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{nx2i} h_{nx2i} - \sigma_{nx1i} h_{nx1i} + 0.5(\tau_{nmx1i} + \tau_{nmx2i}) \Delta x - 0.5(\tau_{вnx1i} + \tau_{вnx2i}) \Delta x + \\
 + 0.5(p_{вnx1i} + p_{вnx2i})(h_{nx1i} - h_{nx2i}) = 0,
 \end{aligned} \quad (4.80)$$

где σ_{nx1i} , σ_{nx2i} – нормальные осевые напряжения, действующие, соответственно, в начальном и конечном граничных сечениях толщиной h_{nx1i} и h_{nx2i} (см. рис. 4.32);

$p_{внх1i}, p_{внх2i}, \tau_{внх1i}, \tau_{внх2i}$ – нормальные и касательные контактные напряжения, действующие на оболочку со стороны рабочих валков.

Учитывая используемые аналитические описания условий внешнего трения, а также инженерный вариант условия пластичности для металлических сред $p_x = 2K_x + \sigma_x$, уравнение (4.80) можно трансформировать как:

$$\begin{aligned} & (p_{внх2i} - 2K_{нх2i})h_{нх2i} - \sigma_{нх1i}h_{нх1i} + 0.5(p_{ннх1i}f_{ннх1i} + p_{ннх2i}f_{ннх2i})\Delta x - \\ & - (p_{внх1i}f_{внх1i} + p_{внх2i}f_{внх2i})\Delta x + (p_{внх1i} + p_{внх2i})(h_{нх1i} - h_{нх2i}) = 0, \end{aligned} \quad (4.81)$$

откуда искомая величина нормальных контактных напряжений $p_{внх2i}$ должна соответствовать:

$$\begin{aligned} p_{внх2i} = \{ & 2(2K_{нх2i}h_{нх2i} + \sigma_{нх1i}h_{нх1i}) - (p_{ннх1i}f_{ннх1i} + p_{ннх2i}f_{ннх2i})\Delta x - \\ & - p_{внх1i}(h_{нх1i} - h_{нх2i} - f_{внх1i}\Delta x)\} / [h_{нх1i} + h_{нх2i} - f_{внх2i}\Delta x], \end{aligned} \quad (4.82)$$

где $2K_{нх2i}$ – текущее значение удвоенного сопротивления сдвигу материала прокатываемой оболочки, определяемое в соответствии с рекомендациями [219] на основе алгоритмической последовательности следующего вида:

$$\varepsilon_{нх2i} = (H_{н0} - h_{нх2i}) / H_{н0}; \quad (4.83)$$

$$2K_{нх2i} = 1.155(\sigma_{нс0} + a_1\varepsilon_{нх2i} + a_2\varepsilon_{нх2i}^2 + a_3\varepsilon_{нх2i}^3); \quad (4.84)$$

$H_{н0}$ – толщина оболочки в её исходном, т.е. отожденном состоянии;

$\sigma_{нс0}, a_1, a_2, a_3$ – исходное значение напряжений текучести и коэффициенты регрессии полиномиального описания, характеризующие интенсивность деформационного упрочнения материала оболочки [219];

$\varepsilon_{нх2i}$ – текущее значение относительного обжатия оболочки.

Исходя из условия равновесия в плоскостях, являющихся параллельными плоскости осей вращения рабочих валков, нормальные контактные напряжения, действующие на оболочку со стороны порошковой составляющей p_{nnx2i} и со стороны рабочих валков p_{vnx2i} , должны быть эквивалентны, т.е. $p_{vnx2i} = p_{nnx2i}$. Выполнение данного условия обеспечивали за счет итерационной процедуры по определению конечной толщины оболочки h_{nx2i} в рамках каждого отдельного выделенного i -го элементарного объёма (см. рис. 4.32). С точки зрения физики процесса прокатки, отмеченное соответствует учёту возможности пластической деформации оболочки, при этом в качестве метода решения был использован метод целенаправленного перебора вариантов со следующей алгоритмической схемой:

$$h_{nx2i(t+1)} = h_{nx2it} - A_h \text{sign}(p_{nmx2it} - p_{vnx2it}), \quad (4.85)$$

где t – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

A_h – шаг изменения толщины подложки, принятый равным 10^{-5} мм;

$\text{sign}(p_{nmx2it} - p_{vnx2it})$ – функция знака, соответствующая:

$$\text{sign}(p_{nmx2it} - p_{vnx2it}) = \begin{cases} +1 & \text{при } p_{nmx2it} > p_{vnx2it}; \\ 0 & \text{при } p_{nmx2it} \leq p_{vnx2it}. \end{cases}$$

В первом цикле итерационной процедуры решения ($t = 1$) оболочку принимали пластически недеформируемой, т.е. $h_{nx2it}|_{t=1} = h_{nx1i}$, с учетом чего, исходя из геометрических решений, производили расчет конечной толщины порошковой составляющей $h_{x2it}|_{t=1}$, в соответствии с (4.66) определяли $p_{nmx2it}|_{t=1}$, а в соответствии с (4.82) – $p_{vnx2it}|_{t=1}$. При выполнении условия $p_{nmx2it}|_{t=1} > p_{vnx2it}|_{t=1}$ итерацион-

ную процедуру решения продолжали, уменьшая согласно (4.85) толщину оболочки $h_{nx2i(t+1)}$ на величину A_h и увеличивая конечную толщину порошковой составляющей $h_{nx2i(t+1)}$ на $2A_h$.

В случае же выполнения условия $p_{nmx2it}|_{t=1} \leq p_{\text{enx}2it}|_{t=1}$, т.е. при отсутствии пластической деформации оболочки нормальные контактные напряжения $p_{\text{enx}2it}|_{t=1}$ принимали равными $p_{nmx2it}|_{t=1}$, а нормальные осевые напряжения σ_{nx2i} определяли из условия пластичности:

$$\sigma_{nx2i} = p_{\text{enx}2i} - 2K_{nx2i}, \quad (4.86)$$

а исходя из условия статического равновесия (4.80), решаемого по отношению именно к данным напряжениям:

$$\sigma_{nx2i} = \left\{ \sigma_{nx1i} h_{nx1i} - 0.5(p_{nmx1i} f_{nmx1i} + p_{nmx2i} f_{nmx2i}) \Delta x + \right. \\ \left. + 0.5(p_{\text{enx}1i} f_{\text{enx}1i} + p_{\text{enx}2i} f_{\text{enx}2i}) \Delta x \right\} / h_{nx1i}. \quad (4.87)$$

В качестве векторной направленности применяемой рекуррентной схемы решения использовали направление, соответствующее направлению перемещения прокатываемой композиции (см. рис. 4.31), с учетом чего условия связи при переходе от расчета i -го к расчету $(i+1)$ элементарного объема были приняты в виде:

$$x_{1(i+1)} = x_{2i}; h_{x1(i+1)} = h_{x2i}; h_{nx1(i+1)} = h_{nx2i}; f_{nmx1(i+1)} = f_{nmx2i}; f_{\text{enx}1(i+1)} = f_{\text{enx}2i}; \\ \gamma_{x1(i+1)} = \gamma_{x2i}; p_{nmx1(i+1)} = p_{nmx2i}; p_{\text{enx}1(i+1)} = p_{\text{enx}2i}; \sigma_{x1(i+1)} = \sigma_{x2i}; \sigma_{nx1(i+1)} = \sigma_{nx2i}, \quad (4.88)$$

где начальные условия, т.е. исходные геометрические и силовые характеристики для первого выделенного элементарного объема, соответствовали:

$$\begin{aligned} x_{1|i=1} &= l_{nl}; h_{x1|i=1} = h_0; h_{nx1|i=1} = h_{n0}; \gamma_{x1|i=1} = \rho_{ym} / \rho_0; f_{nmx1|i=1} = f_{nn0}; \\ f_{enx1|i=1} &= f_{en0}; p_{nmx1|i=1} = p_{enmx1|i=1} = 0; \sigma_{x1|i=1} = 0; \sigma_{nx1|i=1} = -\sigma_{n0}, \end{aligned} \quad (4.89)$$

где σ_0 , σ_{n0} – напряжения заднего подпора порошковой среды и заднего натяжения оболочки.

По мере рекуррентного решения всей протяженности зоны уплотнения l_{nl} и в случае наличия пластической деформации оболочки ещё одна дополнительная k -процедура по итерационному определению относительной протяженности зоны опережения на контактной поверхности оболочки и рабочих валков $S_{lon} = l_{on} \text{ в} n / l_{nl}$. В качестве критериальной оценки в этом случае использовали условие равенства расчетных $\sigma_{nx2i} \big|_{i=K_R}$ и заданных σ_{n1} осевых напряжений, прикладываемых к переднему концу прокатываемой композиции.

С учетом метода целенаправленного перебора вариантов аналитическая форма записи данной итерационной процедуры решения имеет вид:

$$S_{lon}^{(k+1)} = S_{lon}^k + A_{S_{lon}} \text{sign} \left\{ \sigma_{nx2i} \big|_{i=K_R} - \sigma_{n1} \right\}, \quad (4.90)$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

$A_{S_{lon}}$ – шаг изменения относительной протяженности зоны опережения, величина которого была принята переменной в зависимости от степени приближения к искомому результату: $A_{S_{lon}} = 10^{-5} - 10^{-3}$;

$\text{sign} \left\{ \sigma_{nx2i} \big|_{i=K_R} - \sigma_{n1} \right\}$ – функция знака, соответствующая:

$$\text{sign} \left\{ \sigma_{nx2i} \big|_{i=K_R} - \sigma_{n1} \right\} = \begin{cases} +1 & \text{при } \sigma_{nx2i} \big|_{i=K_R} > \sigma_{n1}; \\ 0 & \text{при } \sigma_{nx2i} \big|_{i=K_R} \approx \sigma_{n1}; \\ +1 & \text{при } \sigma_{nx2i} \big|_{i=K_R} < \sigma_{n1}. \end{cases}$$

В случае отсутствия пластической деформации оболочки и наличия трения покоя на её контакте с рабочими валками итерационному определению по схеме аналогичной (4.88) подлежит величина коэффициента f_{en0} . И, наконец, по мере завершения итерационной процедуры решения (4.90) путем численного интегрирования производили расчет силы P и момента M_1 прокатки на каждом из рабочих валков:

$$P = \left\{ \sum_{i=1}^{K_R} \frac{P_{enx1i} + P_{enx2i}}{2} \Delta x + \frac{2}{3} P_{enx2i} \Big|_{i=K_R} l_{yn} \right\} b; \quad (4.91)$$

$$M_1 = \left\{ \sum_{i=1}^{K_R} \frac{P_{enx1i} f_{enx1i} + P_{enx2i} f_{enx2i}}{2} \Delta x - \frac{2}{3} P_{enx2i} \Big|_{i=K_R} f_{en0} l_{yn} \right\} bR, \quad (4.92)$$

где l_{yn} – протяженность зоны упругого восстановления прокатанной композиции в сечениях на выходе из очага деформации (см. рис. 4.31);

b – ширина прокатываемой порошковой ленты.

Представленные в рамках данного подраздела зависимости составили полный алгоритм по математическому моделированию напряженно-деформированного состояния при прокатке порошкового сердечника в металлической оболочке закрытого типа. На основе данного алгоритма были разработаны соответствующие программные средства, представленные в приложении Г.

В качестве примера рассчитан процесс прокатки порошковой ленты. Расчет производился при следующих исходных значениях параметров: ширина ленты 18 мм, толщина металлической оболочки 1 мм, исходная толщина порошка 4 мм, диаметр валков 50 мм, скорость прокатки 0,05 м/с.

Как показывает анализ полученных графических зависимостей, представленных на рисунке 4.34, по мере прохождения очага деформации относительная плотность γ_x монотонно возрастает.

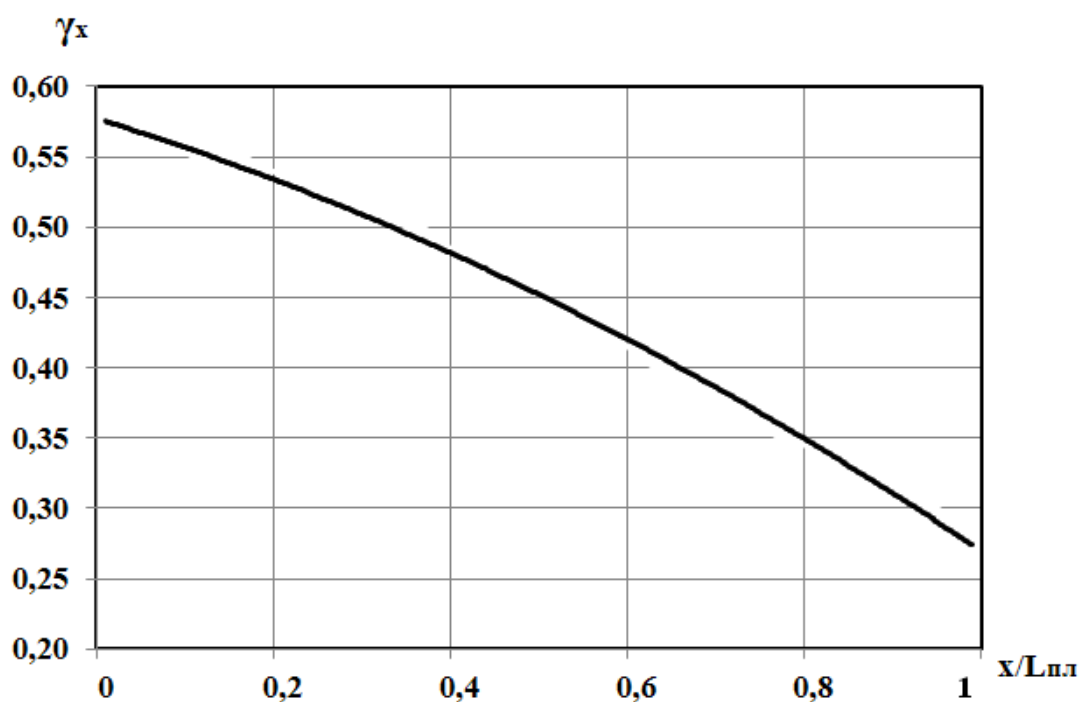


Рисунок 4.34 – Расчетные распределения относительной плотности порошка, по длине очага деформации при прокатке порошковой ленты

Величины нормальных напряжений σ_x и p_x достигают своего максимума на выходе из зоны уплотнения. Необходимо отметить, что характер изменения распределения касательных напряжений по длине очага деформации τ_x носит знакопостоянный характер и имеет максимум в первой половине зоны пластического формоизменения (рисунок 4.35).

4.4 Конечно-элементное математическое моделирование процессов прокатки порошковой ленты в металлической оболочке

Конечно-элементное моделирование процессов прокатки порошковой ленты было выполнено в системе Abaqus CAE. При моделировании использовалась расчетная схема (рисунок 4.36, а), которая представляла собой деформируемую заготовку и два рабочих валка с гладкой бочкой. Заготовка представляла металлическую оболочку со свойствами сплошной среды, заполненную порошковым сердечником из пористого материала (см. рис. 4.36, б).

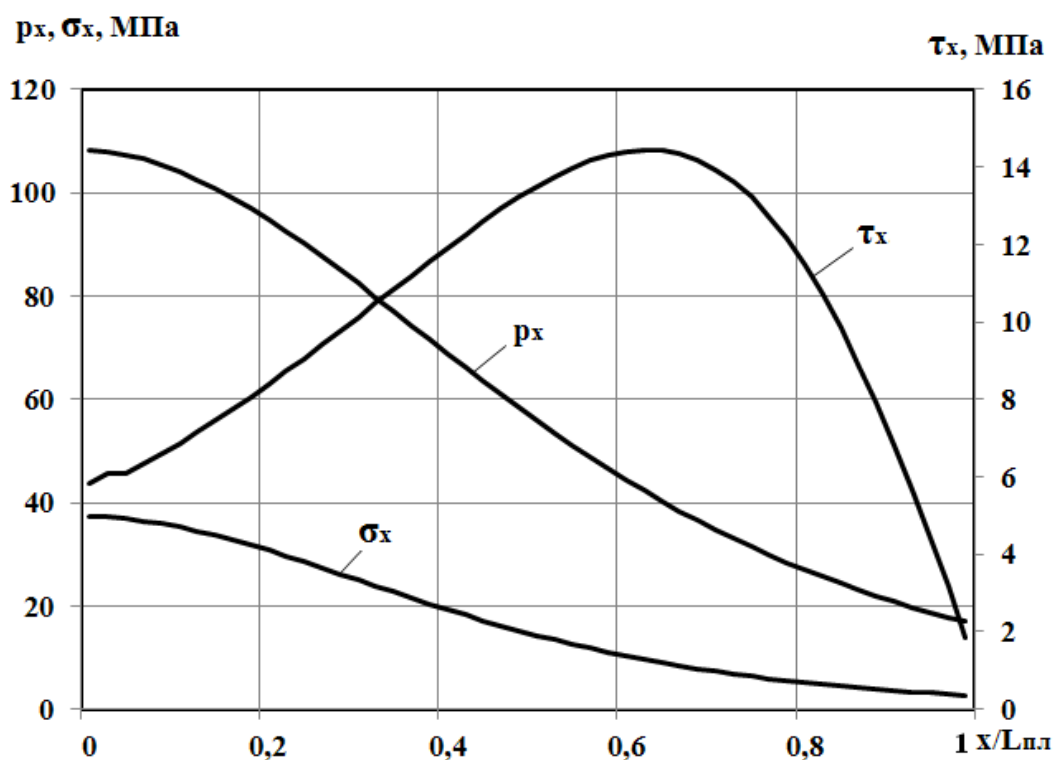
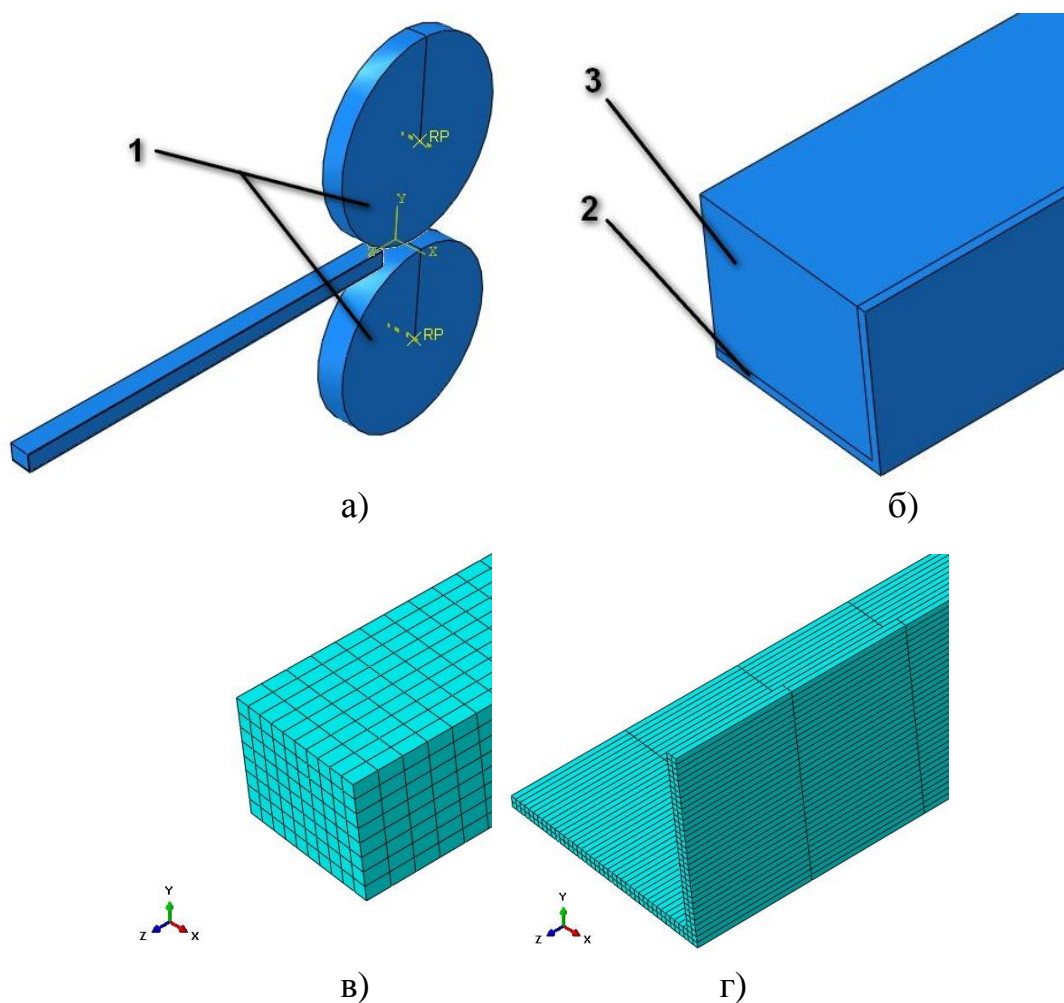


Рисунок 4.35 – Расчетные распределения нормальных, касательных и нормальных контактных напряжений по длине очага деформации при прокатке порошковой электродной ленты

Для заготовки производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки) на элементарные области (конечные элементы). Для моделирования валков были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Для моделирования и порошкового сердечника (см. рис. 4.36, в) и металлической оболочки (см. рис. 4.36, г) были использованы восьмиузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения C3D8R [182].



1 – рабочие валки; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый сердечник

Рисунок 4.36 – Конечно-элементная модель процесса прокатки порошковой ленты:

а – расчетная схема; б – заготовка; в – конечно-элементная сетка порошкового сердечника; г – конечно-элементная сетка металлической оболочки

При моделировании были использованы следующие граничные условия: валки имели одну вращательную степень свободы и угловую скорость вращения равную 1 рад/с. Контакт между заготовкой и валками задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» с коэффициентом трения равным 0,2.

Для оценки полученных результатов выходными параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках валков в глобальной системе координат, а также деформации и напряжения в узлах конечных элементов заготовки, а также распределения пористости порошкового сердечника (рис. 4.37).

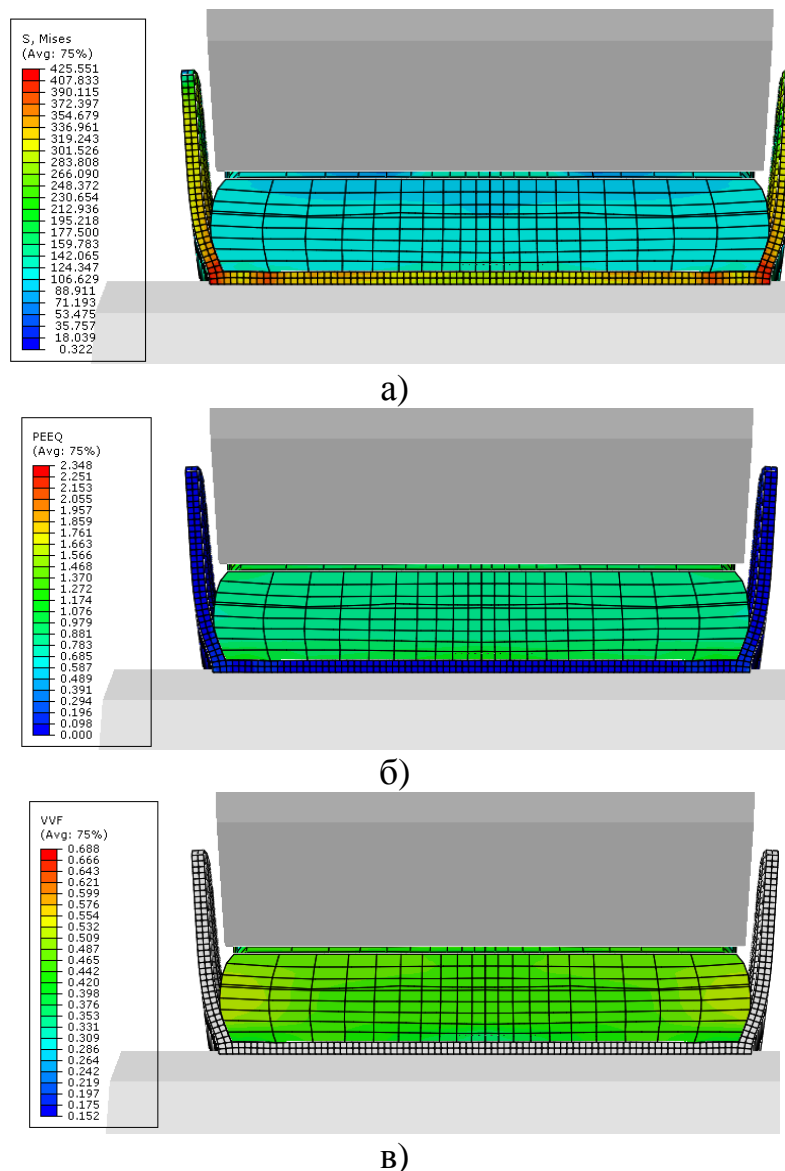
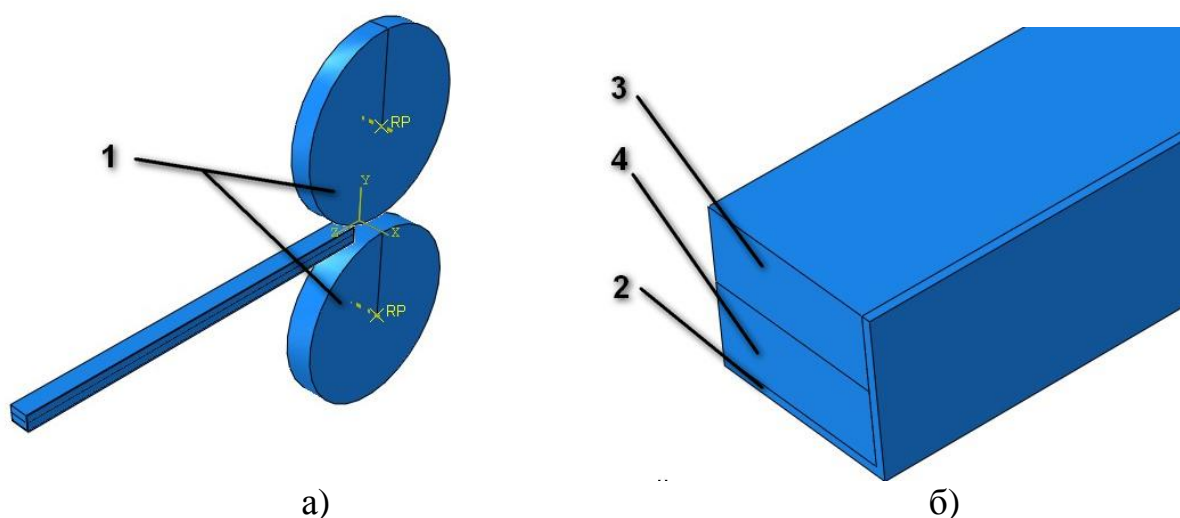


Рисунок 4.37 – Распределение эквивалентных напряжений (а), деформаций (б) и пористости (в) при прокатке однослойной порошковой ленты в металлической оболочке

Анализ расчетных значений напряжений, деформаций и пористости по сечению прокатываемой ленты показал что неравномерность распределения эквивалентных напряжений не превысила 16,6%, эквивалентных деформаций –

10,0%, пористости – 13,1%. Повышение уровня напряжений и деформаций наблюдалось в приконтатных слоях порошкового вердечника. Повышение пористости или уменьшение плотности порошкового материала – в области кромок, причем область неравномерного распределения занимала не более 25% от общей.

Аналогичным образом была разработана конечно-элементная модель прокатки двухслойного порошкового материала в металлической оболочке. Используемая в этом случае расчетная схема представлена на рисунке 4.38 и включала недеформируемые рабочие валки, деформируемую со свойствами сплошной среды металлическую оболочку, деформируемый со свойствами пористой среды насыпной порошковый слой и деформируемый со свойствами пористой среды предварительно уплотненный порошковый слой.



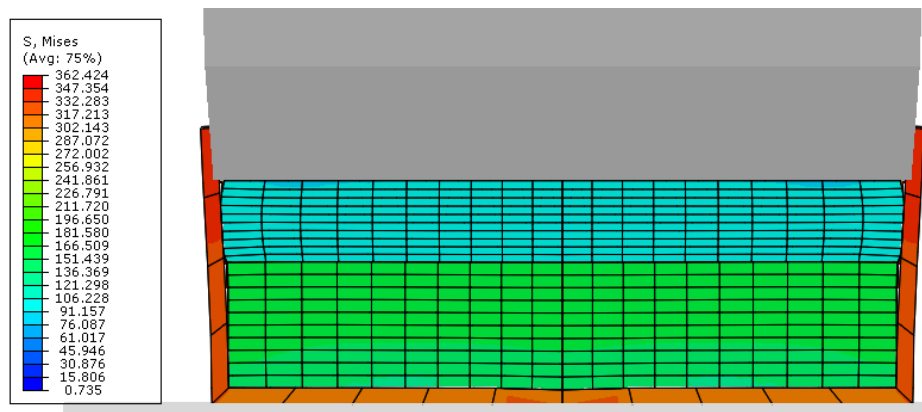
1 – рабочие валки; 2 – металлическая оболочка; 3 – насыпной порошковый слой; 4 – предварительно уплотненный порошковый слой

Рисунок 4.38 – Конечно-элементная модель процесса прокатки двухслойной порошковой ленты:

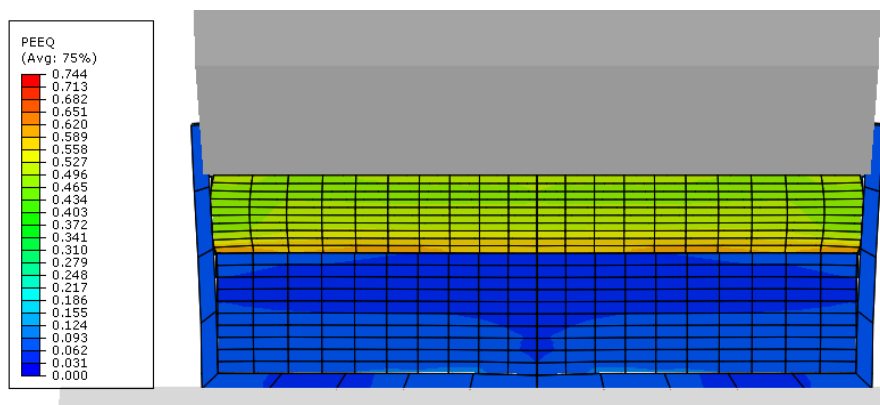
а – расчетная схема; б – заготовка

Анализ расчетных значений напряжений, деформаций и пористости по сечениям слоев прокатываемой ленты (рисунок 4.39) показал что неравномерность распределения эквивалентных напряжений не превысила

17,7%, эквивалентных деформаций – 18,6%, пористости для насыпного слоя – 8,9%, для предварительно уплотненного слоя – 3,7%. Характер изменения уровней напряжений и деформаций аналогичен прокатке однослойной порошковой ленты, то есть повышение значений наблюдалось в приконтактных областях. Меньшая плотность порошкового сердечника также наблюдалась по боковым кромкам.

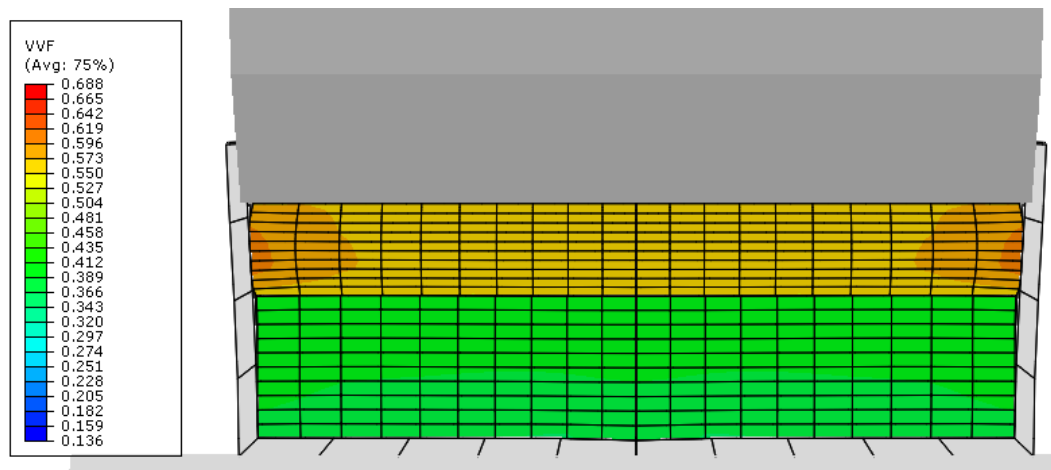


a)



б)

Рисунок 4.39 – Распределение эквивалентных напряжений (а), деформаций (б) и пористости (в) при прокатке двухслойной порошковой ленты в металлической оболочке



в)

Продолжение рис. 4.39

Результаты трехмерного конечно-элементного моделирования исследуемых процессов подтвердили правомерность используемых в аналитических моделях допущений о равномерном распределении параметров по ширине ленте.

Выводы

1 На основе теоретического анализа условий прокатки порошковых материалов в открытых металлических оболочках с использованием метода конечных разностей установлено влияние формы, материала и толщины оболочки на геометрические характеристики очага деформации. Установлено, что с увеличением жесткости оболочки уменьшается деформация порошкового сердечника, с увеличением коэффициента асимметрии процесса до 1,15 уменьшается зона пластического формоизменения на 10% при одновременном повышении плотности порошка на 5%, при прокатке двухслойных порошковых композиций происходит деформация только насыпного слоя порошка, а со увеличением обжатия, в сечениях близких к выходу из очага деформации происходит деформация и предварительно уплотненного слоя.

2 На основе теоретического анализа условий прокатки порошковых материалов в закрытых металлических оболочках замкового типа с использованием метода конечных разностей установлено влияние материала и толщины оболочки на геометрические характеристики очага деформации. Установлено, что повышение степени обжатия до 60% приводит к деформации оболочки и нарушению ее формы.

3 На основе теоретического анализа процессов прокатки порошковых лент в металлической оболочке с использованием трехмерного конечно-элементного моделирования установлено, что неравномерность распределения по поперечному сечению заготовки эквивалентных напряжений не превысила 17,7%, эквивалентных деформаций – 18,6%, пористости порошкового сердечника – 13,1%. При этом повышение уровня напряжений и деформаций наблюдалось в приконтатных слоях порошкового сердечника, а повышение пористости – в области кромок, причем область неравномерного распределения занимала не более 25% от общей, что свидетельствует о правомерности используемых в аналитических моделях допущений о равномерном распределении параметров по ширине ленте.

РАЗДЕЛ 5

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ И ПЛЮЩЕНИИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

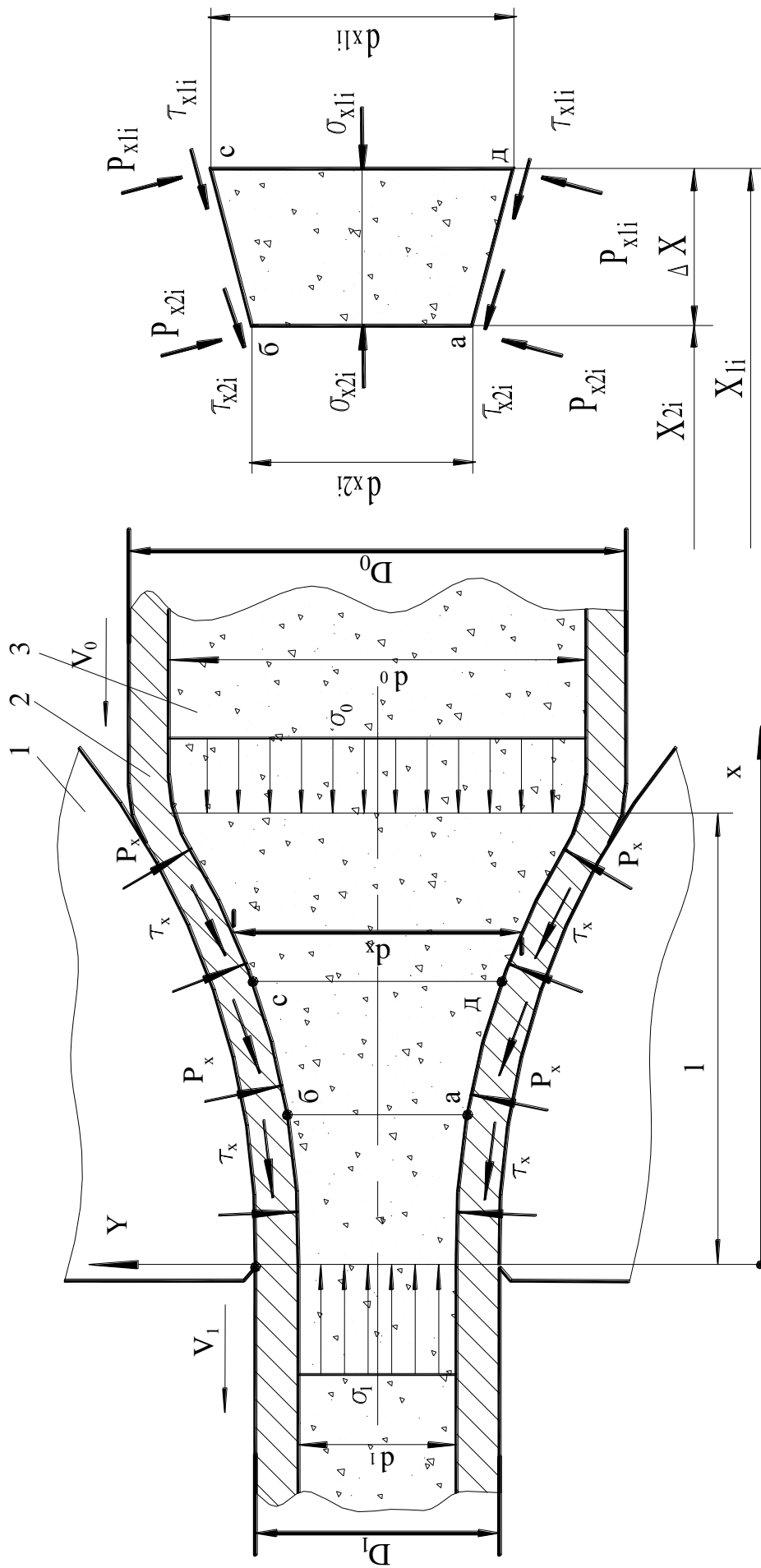
5.1 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении металлопорошковых материалов в оболочке

Порошковая проволока, представляющая собой порошковый сердечник в металлической оболочке может использоваться как конечный продукт при сварке и легировании жидкой стали, так и заготовкой для изготовления порошковых лент [39;40].

Целью математического моделирования напряженно-деформированного состояния при реализации процесса волочения порошковой проволоки в моно-металлической оболочке является определение напряжений и относительной плотности порошка в очаге деформации в зависимости от следующих исходных параметров процесса: исходный и конечный диаметр проволоки; толщина оболочки; физико-механические свойства материала оболочки и сердечника; геометрические характеристики волоки; уровни переднего и заднего натяжений [249].

В соответствии с рекомендациями [249], расчетная схема интегрального очага деформации процесса волочения порошковой проволоки включает в себя фильеру 1, монометаллическую оболочку 2 с наружными и внутренними диаметрами в ее исходном D_0 , d_0 и результирующем D_1 , d_1 состояниях, а также собственно порошковую составляющую 3 (рис. 5.1, а).

Результирующее значение диаметра внутренней поверхности деформированной оболочки d_1 можно считать известным, исходя из чего текущее по длине очага деформации значение диаметра той же поверхности d_x может быть выражено на основе степенной зависимости вида:



а) б)

Рисунок 5.1 – Расчетная схема интегрального очага деформации (а) и выделенного элементарного объема (б) при волочении порошковой проволоки

$$d_x = d_1 + (d_0 - d_1)/(x/l)^{a_d}, \quad (5.1)$$

где x – геометрическая координата, являющаяся параллельной оси волочения и имеющая свое начало на выходе из очага деформации (см. рис. 5.1, а);

l – общая протяженность очага деформации, определяемая на основе известной геометрии волочильного канала фильеры и заданных значений диаметров D_0, D_i ;

a_d – степенной показатель, учитывающий реальную форму поверхности контакта оболочки с порошковым материалом.

Как видно из расчетной схемы, геометрические характеристики интегрального очага деформации определяются однозначно. Для определения реальной картины распределения характеристик напряженно-деформированного состояния в очаге деформации в математической модели осуществляли разбиение его протяженности l на конечное множество n элементарных объемов $a b c d$ (см. рис. 5.1, б) [250...256].

Элементарным объемам присваивали порядковые номера $i=1...n$, а также геометрические координаты начального cd (x_{1i}) и конечного ab (x_{2i}) граничных сечений, соответствующие:

$$x_{1i} = l - \Delta x(i-1); \quad x_{2i} = x_{1i} - \Delta x = l - i\Delta x, \quad (5.2)$$

где $\Delta x = l/n$ – шаг разбиения всей протяженности очага деформации.

Помимо аппроксимации геометрических параметров поверхности контакта порошкового материала и монометаллической оболочки в рамках рассматриваемой математической модели напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки был принят еще ряд допущений, основными из которых являются следующие [257...259]:

– изменяясь по длине очага деформации текущие значения скорости перемещения порошкового материала, показатели его механических свойств и нормальные осевые напряжения σ_x в рамках каждого отдельного поперечного сечения остаются величинами постоянными;

– изменения диаметров $d_{x1i} \dots d_{x2i}$, а также нормальных $p_{xc1i} \dots p_{xc2i}$ и касательных $\tau_{x1i} \dots \tau_{x2i}$ контактных напряжений в рамках каждого отдельного i -го элементарного объема порошкового материала носят линейный характер.

Вследствие равенства скоростей перемещения порошковой и монометаллической составляющих только в сечении на выходе из очага деформации касательные напряжения на поверхности их контакта τ_x направлены по ходу процесса волочения, при этом количественные оценки данных напряжений соответствуют закону Амонтона–Кулона $\tau_x = p_x f_x$, а аналитическое описание текущих значений коэффициентов внешнего трения f_x , по аналогии с (5.1), может быть представлено в виде степенной зависимости вида:

$$f_x = f_1 + (f_0 + f_1)(x/l)^{a_f}, \quad (5.3)$$

где f_0, f_1 – опорные значения коэффициентов внешнего трения в сечениях на входе и выходе из очага деформации;

a_f – степенной показатель, определяющий характер распределения коэффициентов внешнего трения по длине очага деформации.

Выразим компоненты напряженно–деформированного состояния согласно принятым допущениям в конечно-разностном виде (см. рис. 5.1, б). Спроектировав все сил на ось x получим условие статистического равновесия выделенного i -го элементарного объема порошкового материала $abcd$ [260; 261]:

$$\begin{aligned}
\Sigma F_x = & \frac{\pi\sigma_{x2i}d_{x2i}^2}{4} - \frac{\pi\sigma_{x1i}d_{x1i}^2}{4} + \int_{x_{2i}}^{x_{1i}} \left[p_{xc2i} + (p_{xc1i} - p_{xc2i}) \left(\frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right) \right] \times \\
& \times \left[d_{x2i} + (d_{x1i} - d_{x2i}) \left(\frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right) \right] \frac{\sin \alpha_{xi}}{\cos \alpha_{xi}} dx - \int_{x_{2i}}^{x_{1i}} \left[p_{xc2i} f_{x2i} + (p_{xc1i} f_{x1i} - p_{xc2i} f_{x2i}) \times \right. \\
& \left. \times \frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right] \left[d_{x2i} + (d_{x1i} - d_{x2i}) \left(\frac{x - x_{2i}}{\Delta x} \right) \right] dx = 0,
\end{aligned} \tag{5.4}$$

где положительные значения нормальных осевых напряжений σ_x соответствуют напряжениям сжатия, а цифровой индекс 1 свидетельствует о принадлежности данной компоненты правому начальному cd , в то время как цифровой индекс 2 – о принадлежности левому конечному ab граничному сечению выделенного i -го элементарного объема (см. рис. 5.1, б);

α_{xi} – текущее значение угла контакта порошковой и монометаллической составляющих деформируемой композиции.

В полученном уравнении статического равновесия неизвестными являются три напряжения p_{xc2i} , σ_{x2i} и τ_{x2i} (напряжения p_{xc1i} , σ_{x1i} и τ_{x1i} определяются из условия перехода от i -го к $(i+1)$ -му элементарному объёму). Связью между нормальными контактными p_{x2i} и касательными контактными τ_{x2i} напряжениями является принятый в рамках модели закон трения Кулона-Амантона $\tau_{x2i} = p_{xc2i} f_{x2i}$. Связь между нормальными контактными p_{xc2i} и нормальными σ_{x2i} напряжениями можно установить используя условие пластичности для порошковых материалов, рассмотренного в рамках подразд. 3.1 [129]. С учетом принятых условных обозначений условие пластичности (3.18) примет вид:

$$\sigma_{x2i} = \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} p_{xc2i} - \sqrt{p_{xc2i}^2 \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} \left(\frac{1 - 2\alpha_{x2i}}{1 + 4\alpha_{x2i}} - 1 \right) + \frac{1}{1 + \alpha_{x2i}} \beta_x \sigma_{sx2i}^2}. \tag{5.5}$$

Подставив в уравнение статического равновесия (5.4) принятый закон трения и условие пластичности (5.5) и выполнив простые преобразования получим

$$\begin{aligned}
 & 3 \left\{ \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} p_{xc2i} - \sqrt{p_{xc2i}^2 \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} \left[\frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} - 1 \right]} + \frac{1}{1 + \alpha_{x2i}} \beta_{x2i} \sigma_{sx2i}^2 \right\} d_{x2i}^3 - \\
 & - 3\sigma_{x1i} d_{x1i}^2 + p_{xc1i} (2d_{x1i} + d_{x2i})(d_{x1i} - d_{x2i}) + p_{xc2i} (2d_{x1i} + d_{x2i})(d_{x1i} - d_{x2i}) - \\
 & - 2p_{xc1i} f_{x1i} (2d_{x1i} + d_{x2i}) \Delta x - 2p_{xc2i} f_{x2i} (d_{x1i} + 2d_{x2i}) \Delta x = 0.
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

Исходя из анализа структуры уравнения (5.6) можно сделать вывод о том, что при известных согласно используемой рекуррентной схеме решения значениях геометрических и силовых характеристик d_{x1i} , p_{xc1i} , σ_{x1i} и f_{x1i} для правого начального граничного сечения cd , полученных на основе результатов расчёта предыдущего $(i-1)$ элементарного объёма, а также при известных согласно (5.1) - (5.3) значениях диаметра и коэффициента внешнего трения f_{x2i} для левого конечного граничного сечения ab данное уравнение содержит только одну неизвестную величину, а именно, нормальные контактные напряжения p_{xc2i} , по отношению к которым в окончательном виде имеем:

$$p_{xc2i} = \frac{t_{1i} t_{2i} - \sqrt{t_{1i}^2 t_{2i}^2 - (t_{1i}^2 - t_{3i}^2)(t_{2i}^2 - t_{4i}^2)}}{(t_{1i}^2 - t_{3i}^2)}, \tag{5.7}$$

где t_{1i} , t_{2i} , t_{3i} , t_{4i} – вспомогательные параметры, используемые для упрощения записи и соответствующие:

$$t_{1i} = 3 \frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} d_{x2i}^2 + (d_{x1i} + 2d_{x2i})(d_{x1i} - d_{x2i}) - 2(d_{x1i} + 2d_{x2i}) f_{x2i} \Delta x;$$

$$t_{2i} = 3\sigma_{x1i}d_{x1i}^2 - p_{xc1i}(2d_{x1i} + d_{x2i})(d_{x1i} - d_{x2i}) + 2p_{xc1i}f_{x1i}(2d_{x1i} + d_{x2i})\Delta x;$$

$$t_{3i} = \left[\frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} \left(\frac{1 - 4\alpha_{x2i}}{1 + \alpha_{x2i}} - 1 \right) \right] d_{x2i}^4;$$

$$t_{4i} = \frac{1}{1 + \alpha_{2xi}} \beta_{x2i} \sigma_{sx2i}^2 d_{x2i}^4.$$

С учётом известных согласно (5.5) и (5.7) значений нормальных осевых σ_{x2i} и нормальных контактных p_{xc2i} напряжений может быть определено и текущее значение относительной плотности порошкового материала γ_{x2i} :

$$\gamma_{x2i} = \gamma_{x1i} F_{x1i} / \left[F_{x2i} (1 + \varepsilon_{lx2i}) \right], \quad (5.8)$$

где с учетом принятых условных обозначений продольная деформация будет равна

$$\varepsilon_{lx2i} = 2 \frac{\sigma_{x2i}(1 + \alpha_{x2i}) - p_{xc2i}(1 - 2\alpha_{x2i})}{p_{xc2i}(1 + 4\alpha_{x2i}) - \sigma_{x2i}(1 - 2\alpha_{x2i})} \cdot \frac{F_{x1i}}{F_{x1i} - F_{x2i}}. \quad (5.9)$$

Здесь следует указать на то, что при строгой математической постановке совместное решение уравнений (5.7)–(5.8) является весьма громоздким. Поэтому в рамках данной математической модели, основанной на численном рекуррентном подходе, при расчёте коэффициентов α_{x2i} и β_{x2i} использовали значение относительной плотности γ_{x1i} , соответствующее начальному граничному сечению каждого отдельного выделенного элементарного объёма.

При изготовлении порошковой проволоки в монометаллической оболочке зачастую наблюдаются дефекты оболочки. Для прогнозирования возможного

разрушения оболочки при волочении необходимо знать уровень напряжений, возникающих в оболочке, а также степень её деформации. Наиболее простым и точным методом для выполнения указанной выше задачи является метод, основанный на равенстве нормальных контактных напряжений возникающих при деформации в порошковом сердечнике и монометаллической оболочке. Зная нормальные контактные напряжения в оболочке можно сравнительно легко определить остальные действующие напряжения и спрогнозировать возможность её пластической деформации. Степень пластической деформации позволит предсказать возможность разрушения проволоки [262...265].

Для определения напряжённо-деформированного состояния в металле оболочки был использован тот же подход, что и для порошкового сердечника. Было осуществлено аналогичное разбиение очага деформации на конечное множество элементарных объёмов. Для каждого элементарного объёма (рис. 5.2) было составлено уравнение статического равновесия всех действующих сил вдоль оси волочения:

$$\begin{aligned} \Sigma F_{xi} = & \sigma_{xo2i} \frac{\pi}{4} (D_{x2i}^2 - d_{x2i}^2) - \sigma_{xoli} \frac{\pi}{4} (D_{xli}^2 - d_{xli}^2) + \frac{P_{xoli} + P_{xo2i}}{4} (\sin \alpha_u \pi D_{xli} + \\ & + \sin \alpha_u \pi D_{x2i}) \frac{\Delta x}{\cos \alpha_u} - \frac{P_{xoli} + P_{xo2i}}{4} (\sin \alpha_u \pi d_{xli} + \sin \alpha_u \pi d_{x2i}) \frac{\Delta x}{\cos \alpha_u} + \\ & + \frac{\tau_{xuli} + \tau_{xu2i}}{4} (\cos \alpha_u \pi D_{xli} + \cos \alpha_u \pi D_{x2i}) \frac{\Delta x}{\cos \alpha_u} - \\ & - \frac{\tau_{xli} + \tau_{x2i}}{4} (\cos \alpha_{xi} \pi d_{xli} + \cos \alpha_{xi} \pi d_{x2i}) \frac{\Delta x}{\cos \alpha_{xi}} = 0, \end{aligned} \quad (5.10)$$

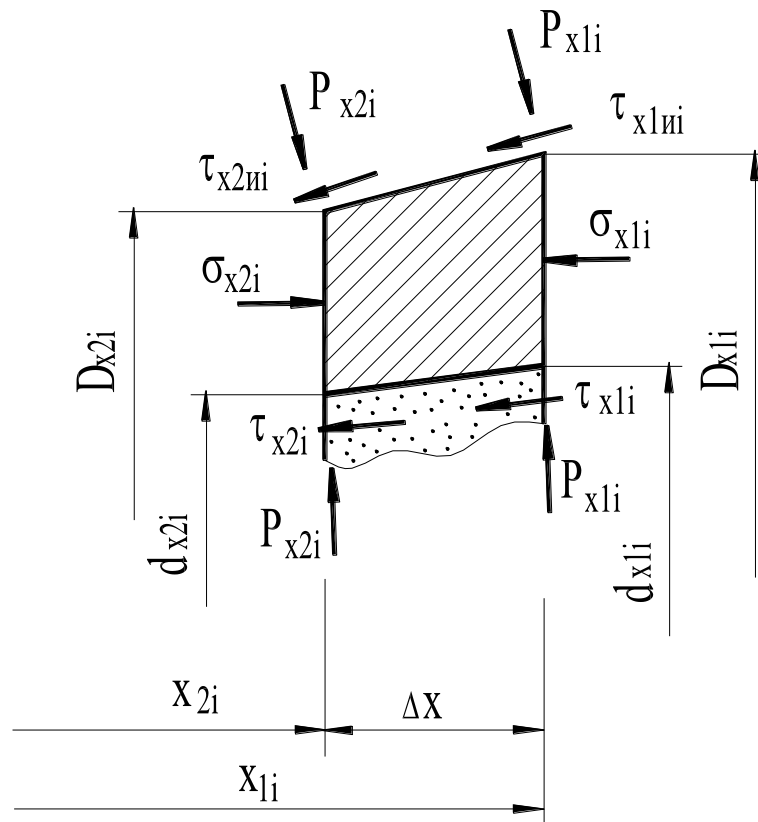


Рисунок 5.2 – Расчетная схема выделенного элементарного объема металла оболочки в очаге деформации при волочении порошковой проволоки

где α_u – угол наклона направляющей волоки, для упрощения задачи принят не изменяющимся; D_{x1i} , D_{x2i} – текущие значения наружного диаметра оболочки в сечении на входе и выходе из элементарного объема очага деформации, соответственно; τ_{x1ui} , τ_{x2ui} – текущие значения касательных контактных напряжений между оболочкой и инструментом в сечении на входе и выходе из элементарного объема очага деформации, соответственно.

В отличие от случая деформации порошкового сердечника здесь нормальные напряжения в металле оболочки σ_{x02} будут подчиняться инженерному варианту условия пластичности для сплошных сред, а именно [219]:

$$\sigma_x = 2K_x - 2p_x, \quad (5.11)$$

где $2K_x$ – коэффициент удвоенного сопротивления деформации сдвига, который можно определить по формуле [219]:

$$2K_x = 1,155(a_0 + a_1\varepsilon_x + a_2\varepsilon_x^2 + a_3\varepsilon_x^3); \quad (5.12)$$

a_0, a_1, a_2, a_3 – коэффициенты регрессии, характеризующие интенсивность деформационного упрочнения материала оболочки;

ε_x – относительная деформация монометаллической оболочки:

$$\varepsilon_x = \frac{F_0 - F_x}{F_0} = \frac{D_0^2 - d_0^2 - D_x^2 + d_x^2}{D_0^2 - d_0^2}, \quad (5.13)$$

F_0, F_x – площадь поперечного сечения оболочки до пластической деформации и на выходе из текущего элементарного объёма соответственно.

Подставив в уравнение (5.10) условие пластичности для сплошных сред (5.11), закон трения Амонтона–Кулона $\tau_x = p_x f_x$, а также выполнив несложные математические преобразования можно определить нормальные контактные напряжения, действующие в монометаллической оболочке на выходе из элементарного объёма очага деформации:

$$\begin{aligned} & p_{xo2}(D_{x2}^2 - d_{x2}^2) - 2K_x(D_{x2}^2 - d_{x2}^2) - \sigma_{x01}(D_{x1}^2 - d_{x1}^2) + p_{xo2}(D_{x1} + D_{x2})\Delta x \operatorname{tg}\alpha_{ux} + \\ & + p_{x01}(D_{x1} + D_{x2})\Delta x \operatorname{tg}\alpha_{ux} - p_{xo2}(d_{x1} + d_{x2})\Delta x \operatorname{tg}\alpha_x + -p_{x01}(d_{x1} + d_{x2})\Delta x \operatorname{tg}\alpha_x + \\ & + p_{x01}f_{xu1}(D_{x1} + D_{x2})\Delta x + p_{xo2}f_{xu2}(D_{x1} + D_{x2})\Delta x - p_{x01}f_{x1}(d_{x1} + d_{x2})\Delta x - \\ & - p_{xo2}f_{x2}(d_{x1} + d_{x2})\Delta x = 0; \end{aligned} \quad (5.14)$$

$$\begin{aligned}
p_{xo2} = & \left\{ 2K_x (D_{x2}^2 - d_{x2}^2) + \sigma_{xol} (D_{x1}^2 - d_{x1}^2) + p_{xol} [(d_{x1} + d_{x2}) \Delta x (\operatorname{tg} \alpha_x - f_{x1}) - \right. \\
& \left. - (D_{x1} + D_{x2}) \Delta x (\operatorname{tg} \alpha_{ux} - f_{xu1})] \right\} / \left\{ (D_{x2}^2 - d_{x2}^2) + \Delta x (D_{x1} + D_{x2}) \times \right. \\
& \left. \times (\operatorname{tg} \alpha_{ux} + f_{xu2}) - (d_{x1} + d_{x2}) \Delta x (\operatorname{tg} \alpha_x + f_{x2}) \right\}.
\end{aligned}
\tag{5.15}$$

Остальные напряжения, а именно – нормальные и касательные контактные напряжения находятся из условия пластичности (5.11) и принятого закона трения.

Согласно используемой рекуррентной форме решения, при которой компоненты σ_{xcli} , σ_{xoli} и p_{xli} являются известными, исходя из результатов расчета предыдущего ($i-1$) элементарного объема. Полный расчет напряженно-деформированного состояния для i -го выделенного элементарного объема сводится к определению нормальных σ_{xc2i} , σ_{xo2i} и нормальных контактных напряжений p_{x2i} на основе целенаправленного перебора величин обжатий порошкового сердечника и металлической оболочки, изменяя при этом диаметр d_{x2i} , исходя из условия равновесия конечного граничного сечения [234; 235; 266]:

$$p_{x2i} = p_{xc2i} = p_{xo2i}. \tag{5.16}$$

По мере определения p_{xc2i} и p_{xo2i} конечный диаметр d_{x2i} определяли итерационно исходя из условия, как это было уже указано ранее, равенства нормальных контактных напряжений $p_{xc2i} \approx p_{xo2i}$ [234]:

$$d_{x2i(k+1)} = d_{x2ik} - A_d \cdot \operatorname{sign}\{p_{x2oik} - p_{x2cik}\}, \tag{5.17}$$

где A_d – шаг изменения толщины слоя, величина которого в зависимости от степени приближения к исходному результату была принята переменной;

$\text{sign}\{p_{xc2i}-p_{xo2i}\}$ – градиентная оценка направления следующего приращения, соответствующая:

$$\text{sign}\{p_{xo2i} - p_{xc2i}\} = \begin{cases} 1 & \text{при } p_{xo2i} > p_{xc2i}; \\ 0 & \text{при } p_{xo2i} \approx p_{xc2i}; \\ -1 & \text{при } p_{xo2i} < p_{xc2i}. \end{cases}$$

В качестве векторной направленности рекуррентного решения использовали направление собственно процесса волочения с учётом чего начальные условия связи при переходе от расчёта i -го к расчёту $(i+1)$ элементарного объёма соответствовали:

$$\begin{aligned} x_{1i}|_{i=1} = l; d_{x1i}|_{i=1} = d_0; D_{x1i}|_{i=1} = D_0; f_{x1i}|_{i=1} = f_0; f_{x1ui}|_{i=1} = f_{0u}; \\ \sigma_{x1oi}|_{i=1} = \sigma_0; \sigma_{x1ci}|_{i=1} = 0; p_{x1i}|_{i=1} = 0; \gamma_{x1i}|_{i=1} = \gamma_0; \end{aligned} \quad (5.18)$$

$$\begin{aligned} x_{1(i+1)} = x_{2i}; d_{x1(i+1)} = d_{x2i}; D_{x1(i+1)} = D_{x2i}; f_{x1(i+1)} = f_{x2i}; f_{x1u(i+1)} = f_{x2ui}; \\ \sigma_{x1c(i+1)} = \sigma_{x2ci}; \sigma_{x1o(i+1)} = \sigma_{x2oi}; p_{x1(i+1)} = p_{x2i}; \gamma_{x1(i+1)} = \gamma_{x2i}, \end{aligned} \quad (5.19)$$

где σ_0 – напряжения заднего подпора;

γ_0 – показатель исходной относительной плотности порошкового сердечника.

Рассмотренные зависимости в данном подразделе зависимости легли в основу математической модели напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки.

На основе полученной математической модели были разработаны программные средства для автоматизированного расчёта и проектирования конкретных технологий, представленные в приложении Д. Укрупненная блок-схема алгоритма расчёта представлена на рисунке 5.3.

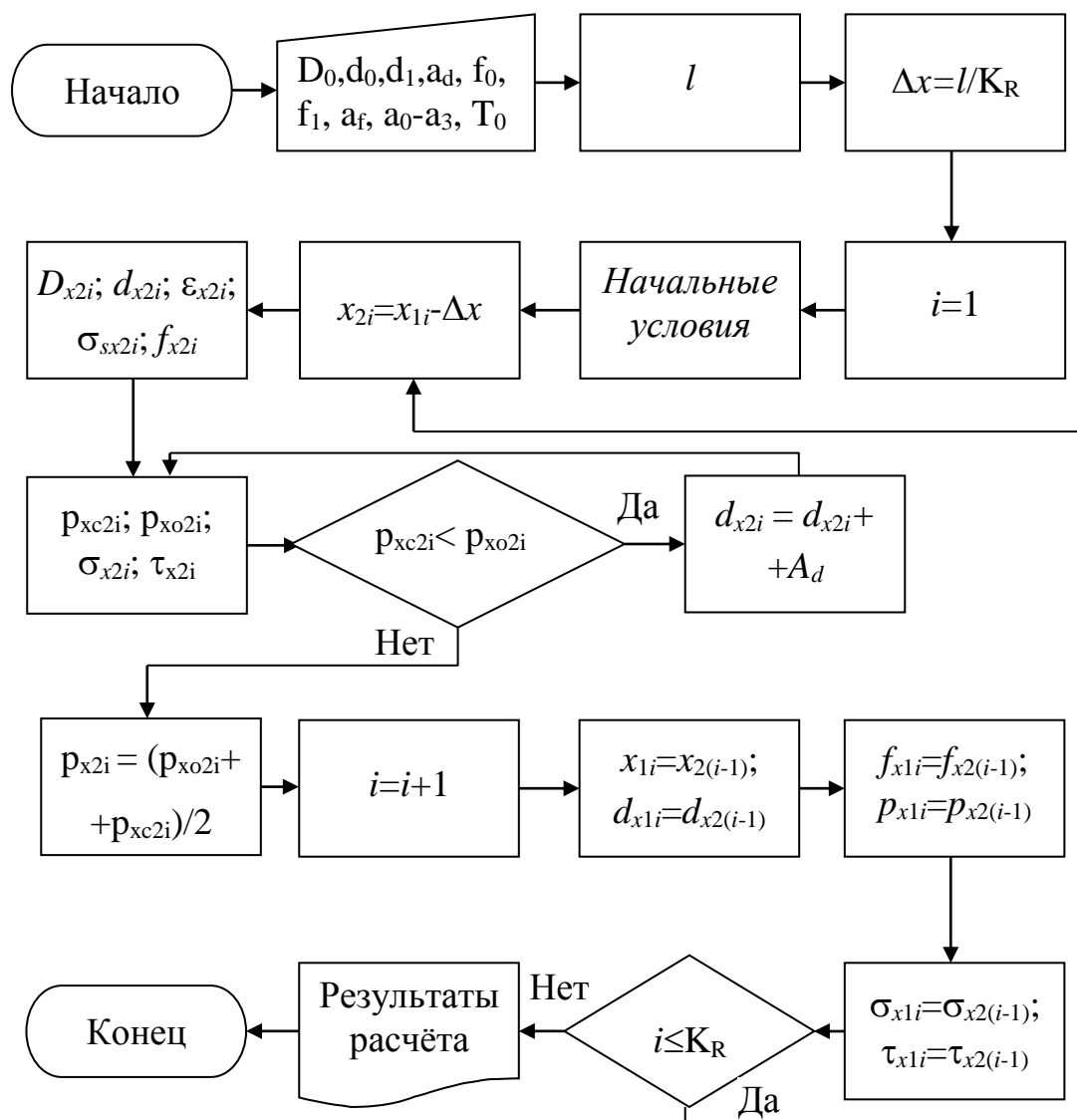


Рисунок 5.3 – Укрупненная блок-схема алгоритма расчёта напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки

В качестве примера результатов численной реализации разработанных программных средств были получены расчетные распределения основных параметров напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки для двух режимов обжатия – при отсутствии утонения оболочки и при его наличии (для случая волочения проволоки из медного порошка марки ПМС-1 в оболочке из меди марки М1).

На рисунке 5.4 представлены расчетные распределения геометрических параметров напряженно-деформированного состояния, а именно наружного и

внутреннего диаметра оболочки, а также толщины стенки по длине очага деформации. Из анализа результатов является очевидным, что при малых обжатиях порошковой проволоки пластическая деформация материала оболочки происходит за счёт вытяжки, а порошкового сердечника – за счёт прессования, при увеличении обжатия наблюдается утонение стенки оболочки, причем порошок в этом случае практически не деформируется (см. рис. 5.4.)

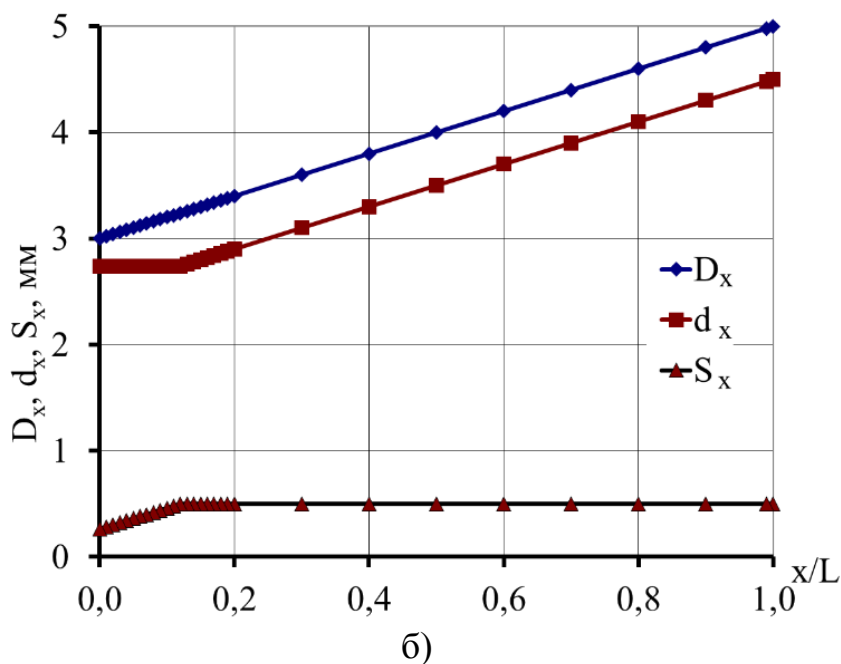
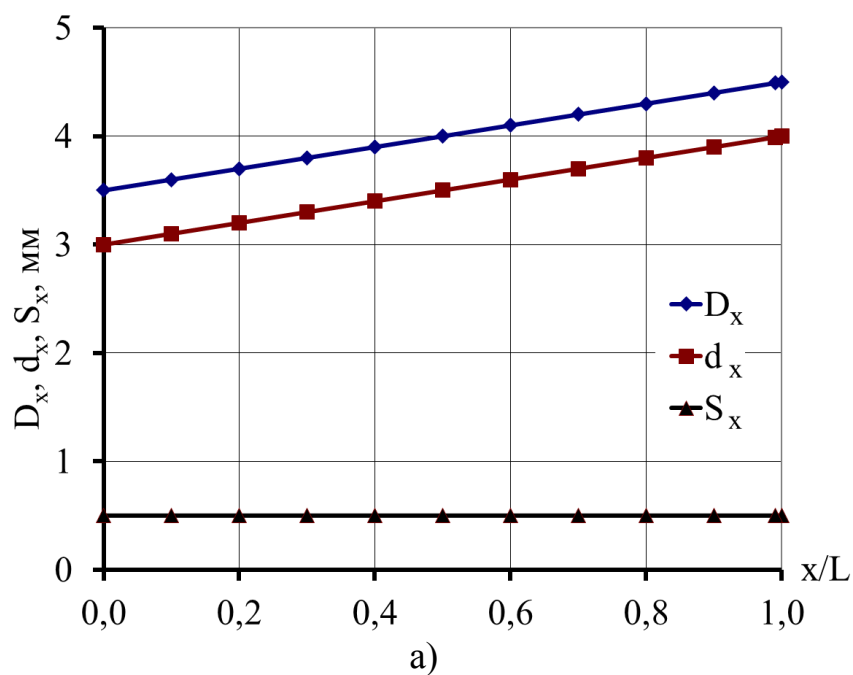
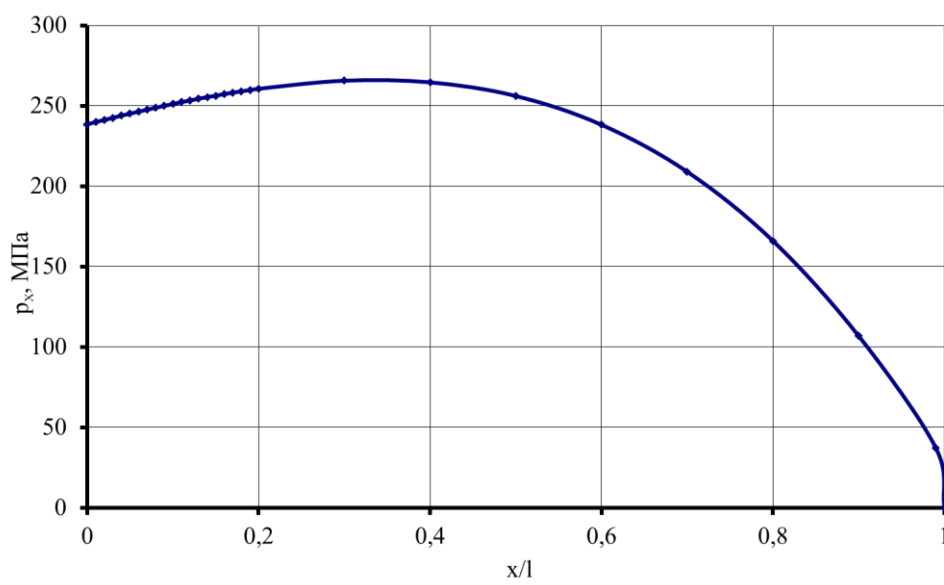
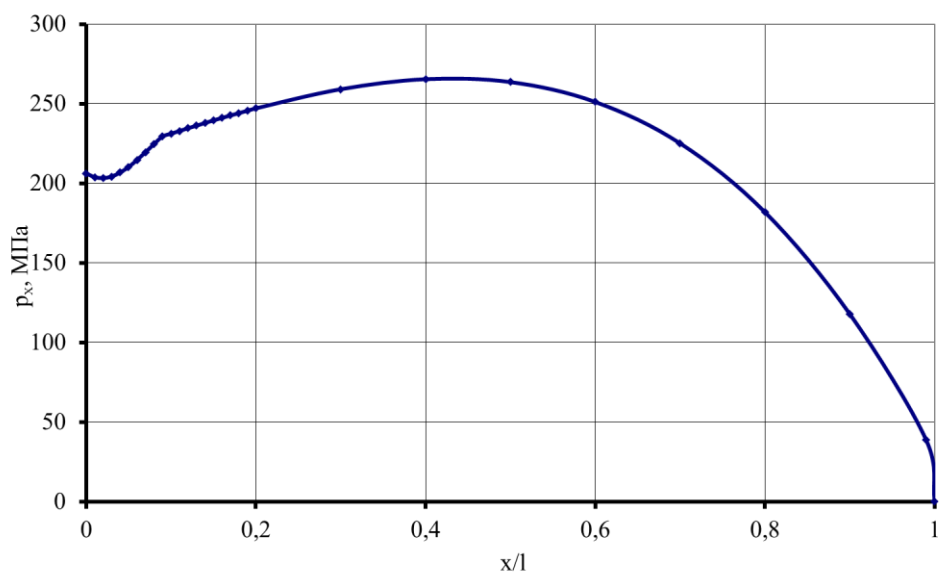


Рисунок 5.4 – Расчётные распределения текущих значений геометрических характеристик порошковой проволоки при волочении с относительным обжатием 30% (а) и 35% (б)

На рисунке 5.5 представлены расчетные зависимости нормальных контактных напряжений по длине очага деформации, из которых можно сделать вывод о том, что при увеличении обжатия порошковой проволоки уровень максимальных контактных напряжений не изменяется, в тоже время имеется перераспределения нормальных контактных напряжений вдоль очага деформации с увеличением площади эюры.



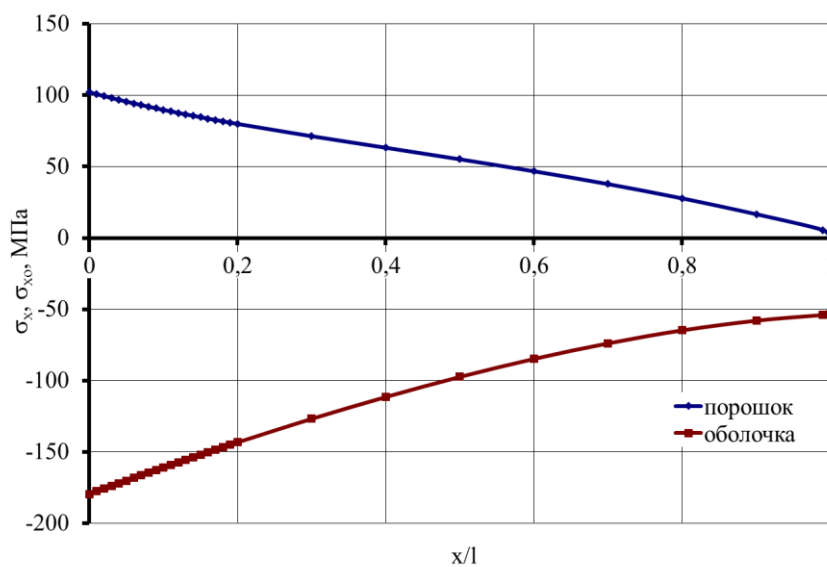
а)



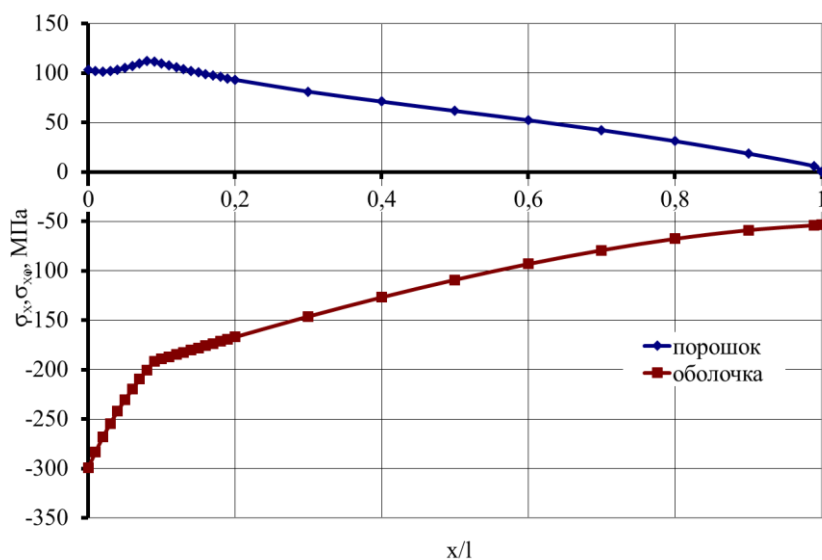
б)

Рисунок 5.5 – Расчётные распределения текущих значений нормальных контактных напряжений в порошковой проволоке при волочении с относительным обжатием 30% (а) и 35% (б)

На рисунке 5.6 представлены расчетные зависимости нормальных напряжений по длине очага деформации, из которых можно сделать вывод о том, что с увеличением обжатия наблюдается рост нормальных напряжений как в материале оболочке, так и в порошковом сердечнике, причём при больших уровнях обжатий, когда происходит утонение оболочки, наблюдается перераспределение эпюры напряжений вдоль очага деформаций.



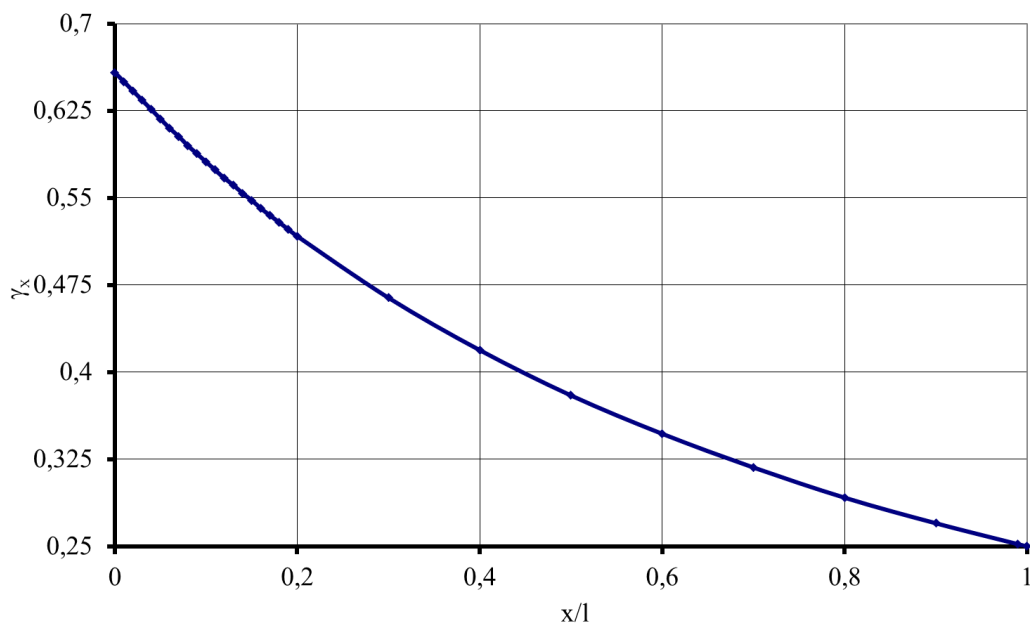
а)



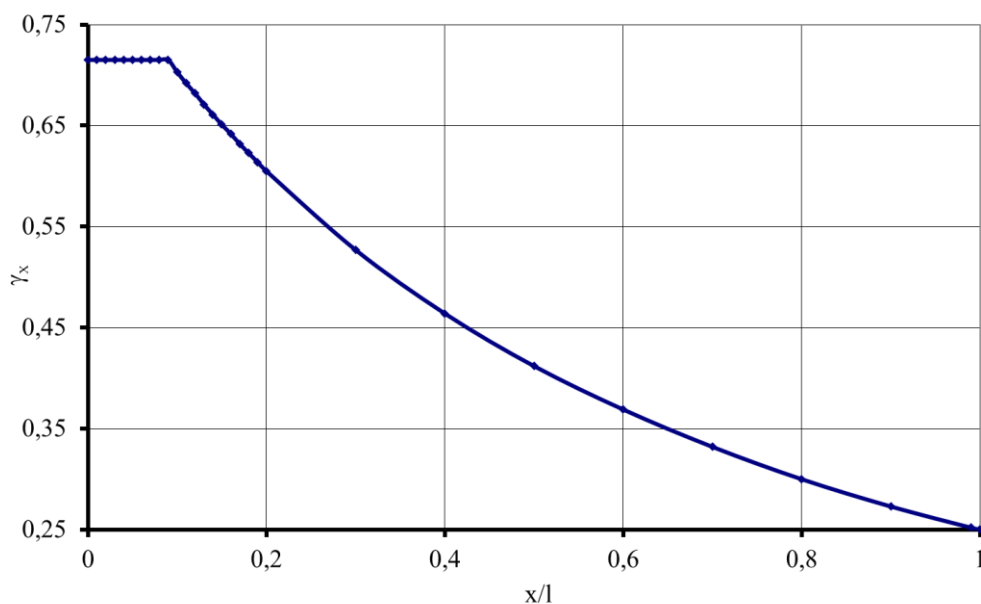
б)

Рисунок 5.6 – Расчётные распределения текущих значений нормальных напряжений в порошковом сердечнике и оболочке при волочении с относительным обжатием 30% (а) и 35% (б)

На рисунке 5.7 представлены расчетные зависимости относительной плотности порошкового сердечника по длине очага деформации, из которых можно сделать вывод о том, что при увеличении обжатий происходит более интенсивное уплотнение порошкового сердечника, а при утонении оболочки порошок практически не уплотняется.



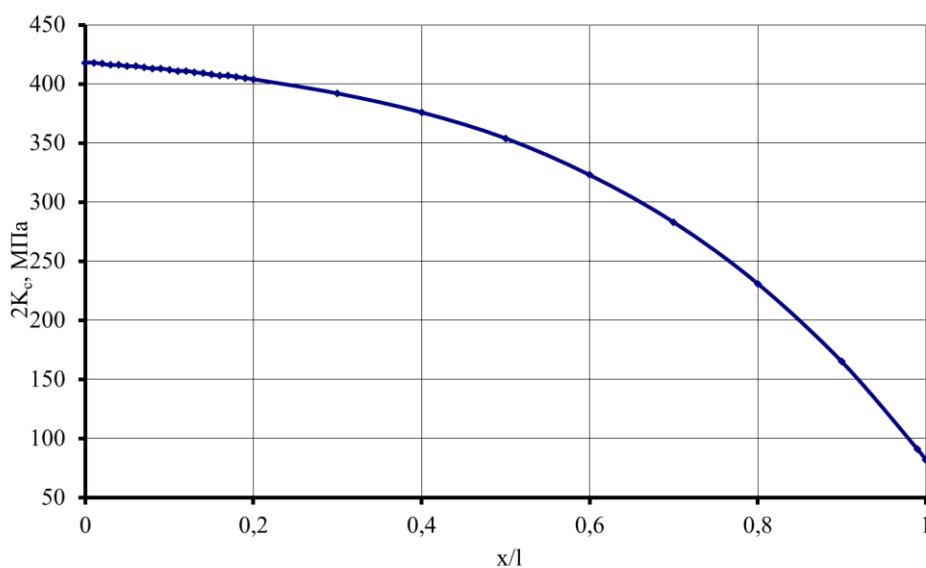
а)



б)

Рисунок 5.7 – Расчётные распределения текущих значений относительной плотности порошкового сердечника при волочении с относительным обжатием 30% (а) и 35% (б)

На рисунке 5.8 представлены расчетные зависимости удвоенного коэффициента сопротивления чистому сдвигу материала оболочки по длине очага деформации, из которых можно сделать вывод о том, что характер изменения механических свойств оболочки вдоль очага деформации носит нелинейный характер: на входе в очаг деформации упрочнение материала оболочки более интенсивное, чем на выходе, кроме случая, когда помимо вытяжки происходит утонение стенки.



а)

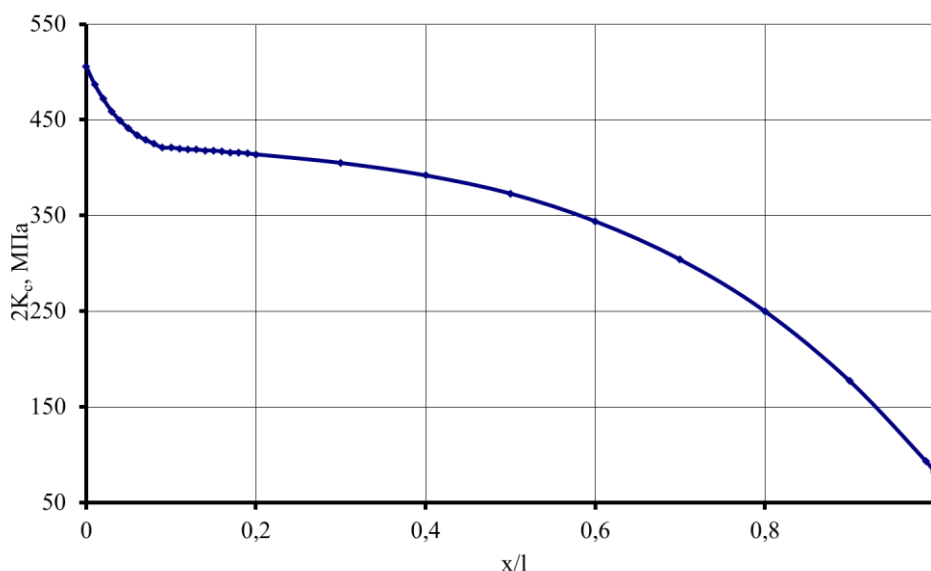


Рисунок 5.8 – Расчётные распределения текущих значений удвоенного коэффициента сопротивления чистому сдвигу материала оболочки при волочении с относительным обжатием 30% (а) и 35% (б)

В целом, распределения нормальных σ_x , и нормальных контактных p_x напряжений, а также относительной плотности сердечника носят довольно сложный характер, определяются целой группой факторов, а это, в свою очередь, подтверждает целесообразность максимально более полного и корректного учета всей совокупности технологических и конструктивных особенностей процесса волочения.

На рисунках 5.9 - 5.12 в качестве примера численной реализации разработанной математической модели представлены расчётные распределения интегральных характеристик процесса в зависимости от относительной деформации порошковой проволоки (сердечник – медный порошок марки ПМС-1; оболочка: медь марки М1).

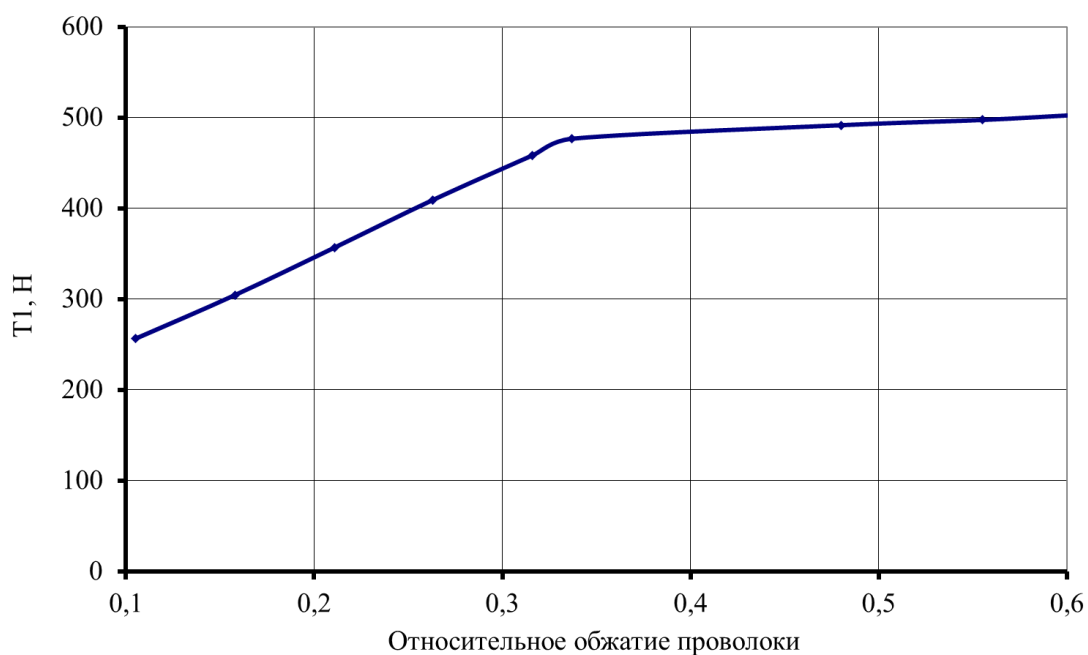


Рисунок 5.9 – Расчётные распределения усилий переднего натяжения в зависимости от относительного обжатия проволоки

Из представленных зависимостей видно, что при увеличении степени деформации порошковой проволоки минимальное значение переднего натяжения возрастает, причём при обжатиях выше 30% уровень этих усилий практически не изменяется (см. рис. 5.9).

При увеличении степени деформации наблюдается снижение коэффициента запаса прочности для материала оболочки. При обжатиях выше 30% коэффициент запаса прочности достигает недопустимых значений $K_3 < 1,2$, что может приводить к разрушению оболочки (см. рис. 5.10).

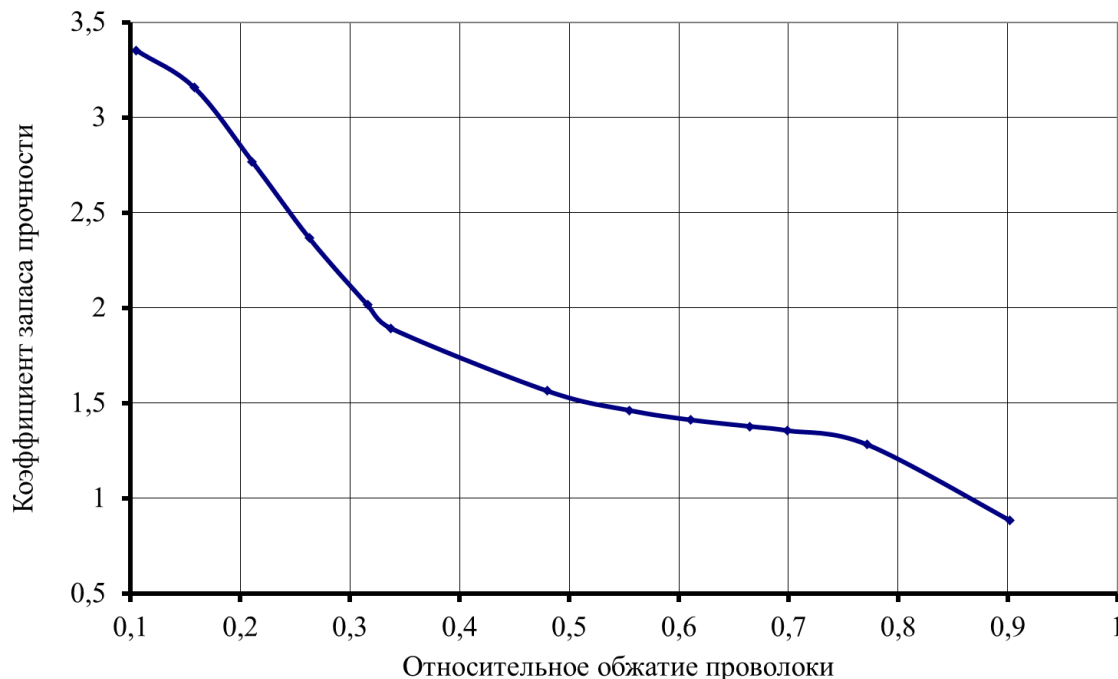


Рисунок 5.10 – Расчётные распределения значений коэффициента запаса прочности в зависимости от относительного обжатия проволоки

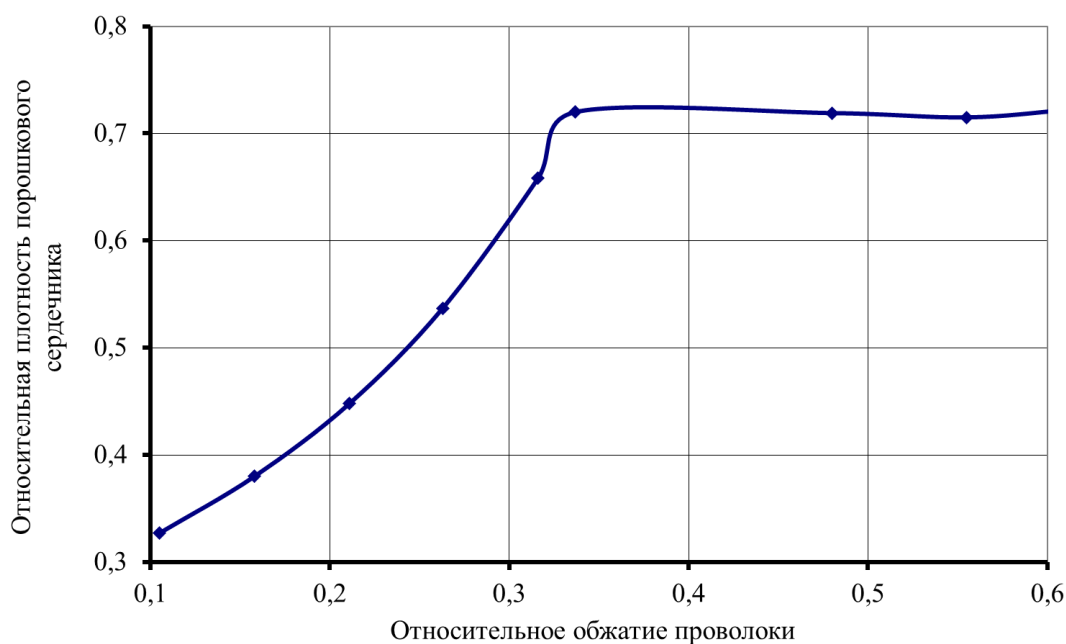


Рисунок 5.11 – Расчётные распределения относительной плотности сердечника в зависимости от относительного обжатия проволоки

Изменение относительной плотности сердечника в зависимости от степени деформации проволоки носит нелинейный характер, при этом интенсивность увеличения плотности при обжатиях больше 30% резко снижается (см. рис. 5.11), что обусловлено снижением деформации именно порошковой составляющей композиции (см. рис. 5.12).

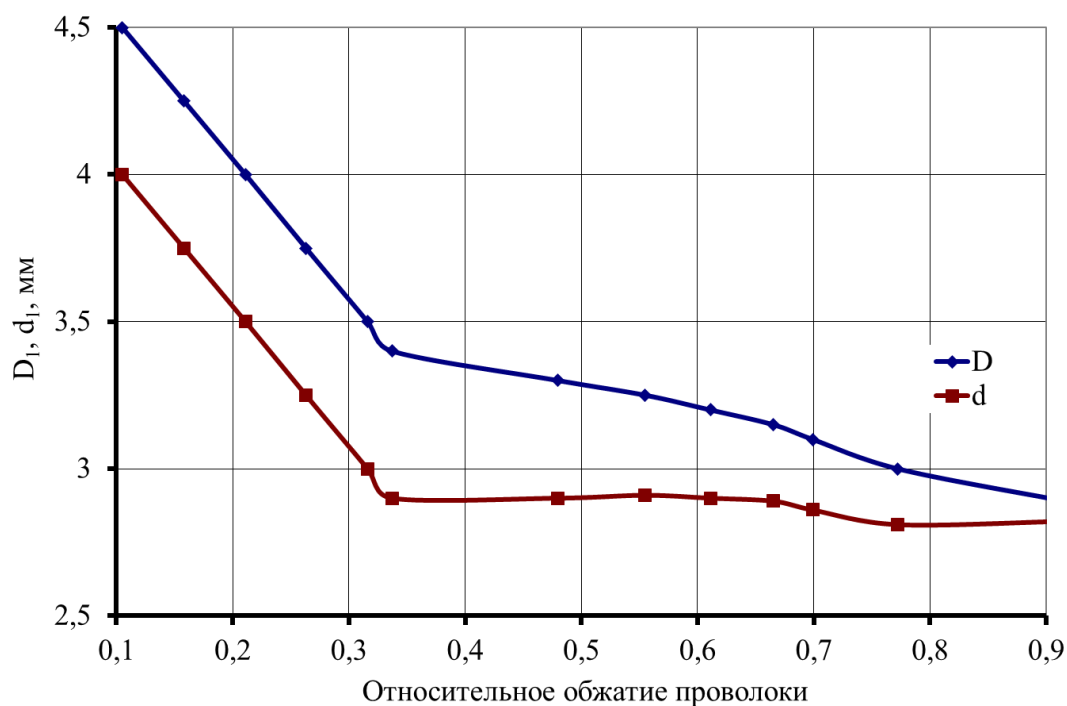


Рисунок 5.12 – Расчётные распределения геометрических характеристик проволоки в зависимости от относительного обжатия проволоки

В целом, результаты реализации программных средств, разработанных на основе математической модели показывают о возможности их использования при решении задач оптимизационного плана по выбору технологических режимов и конструктивных параметров волочильного оборудования при производстве порошковой проволоки.

5.2 Трехмерное конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки в металлической оболочке

Для проверки принятых допущений при разработке численной математической модели волочения порошковой проволоки была разработана конечно-элементная модель данного процесса.

При моделировании использовалась расчетная схема, которая представляла собой деформируемую заготовку и волоку (рис. 5.13). Заготовка представляла металлическую оболочку со свойствами сплошной среды, заполненную порошковым сердечником. Для моделирования проволоки были использованы недеформируемые элементы. Для моделирования и порошкового сердечника и металлической оболочки были использованы четырёхузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения CAХ4R [182, 183].

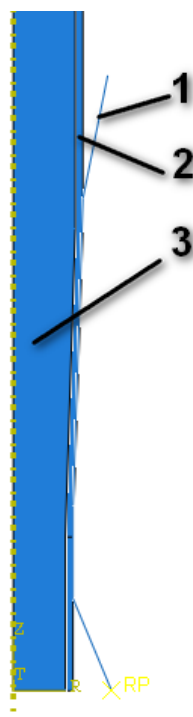


Рисунок 5.13 – Расчетная схема конечно-элементной модели процесса волочения порошковой проволоки в металлической оболочке: 1 – проволока; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый сердечник

На рисунке 5.14 представлены полученные в результате расчета поля распределений эквивалентных напряжений (см. рис. 5.14, а), деформаций в продольном (см. рис. 5.14, б) и радиальном (см. рис. 5.14, в) направлениях, а также поле распределения относительной плотности порошкового сердечника (см. рис. 5.14, г).

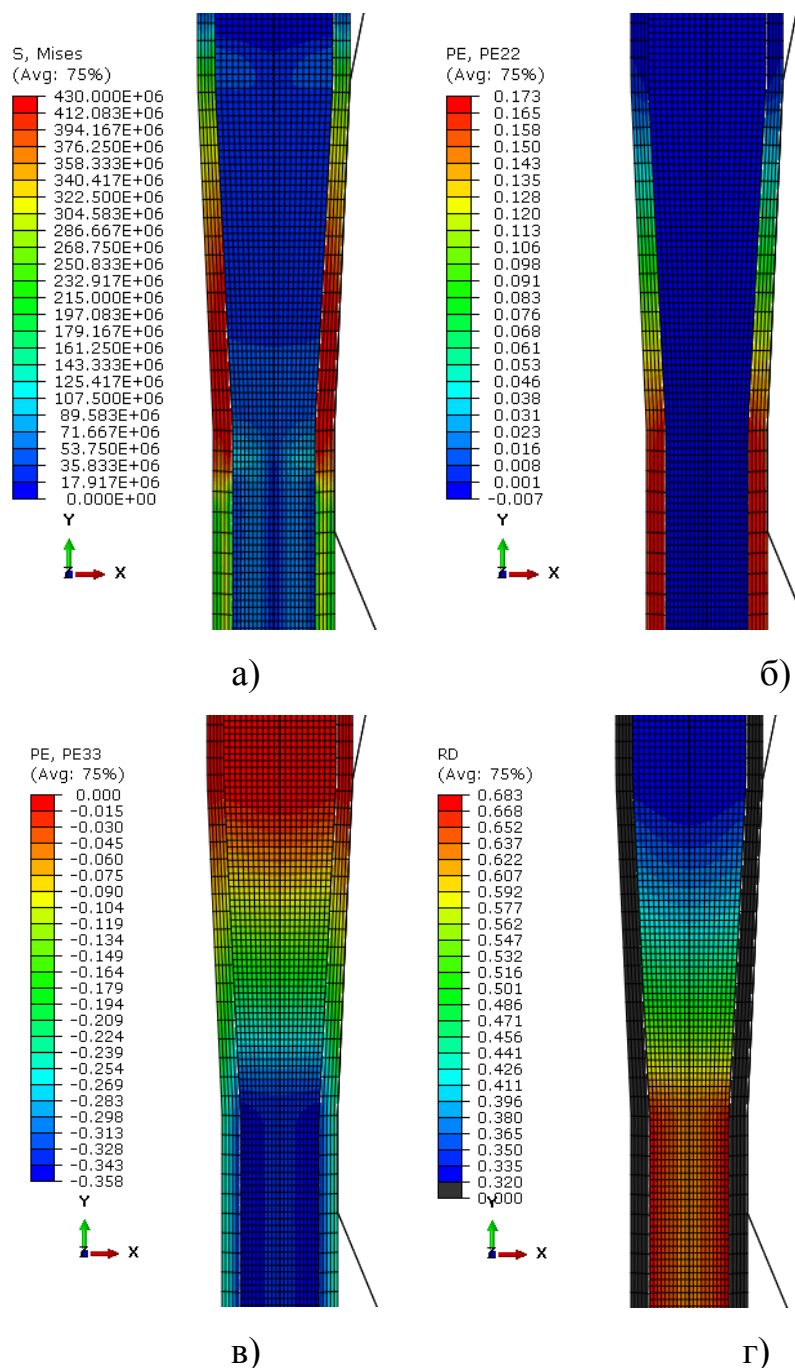


Рисунок 5.14 – Поля распределений эквивалентных напряжений (а), деформаций в продольном (б) и радиальном (в) направлениях, относительной плотности порошкового сердечника (г)

Анализ полученных на основе метода конечных элементов результатов расчета подтвердил правомерность допущений о равномерности деформации и уплотнения, принятых при численном моделировании. При этом, неравномерность распределения деформаций не превысила 4,0%, а относительной плотности – 6,8%.

5.3 Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки

Математическая модель напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при плющении порошковой проволоки была основана на совместном анализе условия пластичности и дифференциального уравнения равновесия выделенного элементарного объёма. В данной модели рассматривается процесс пластической деформации порошкового сердечника и упруго-пластическая деформация металлической оболочки при реализации процессов плющения порошковой проволоки.

Используемая в этом случае расчетная схема представлена на рисунке 5.15. При моделировании очаг деформации разбивался на конечное множество элементарных объемов по оси прокатки (см. рис. 5.15, а) с последующим анализом каждого объема путем разбиения по ширине ленты (см. рис. 5.15, б).

Принимая в качестве исходных данных результаты анализа экспериментальных исследований, введем следующие допущения:

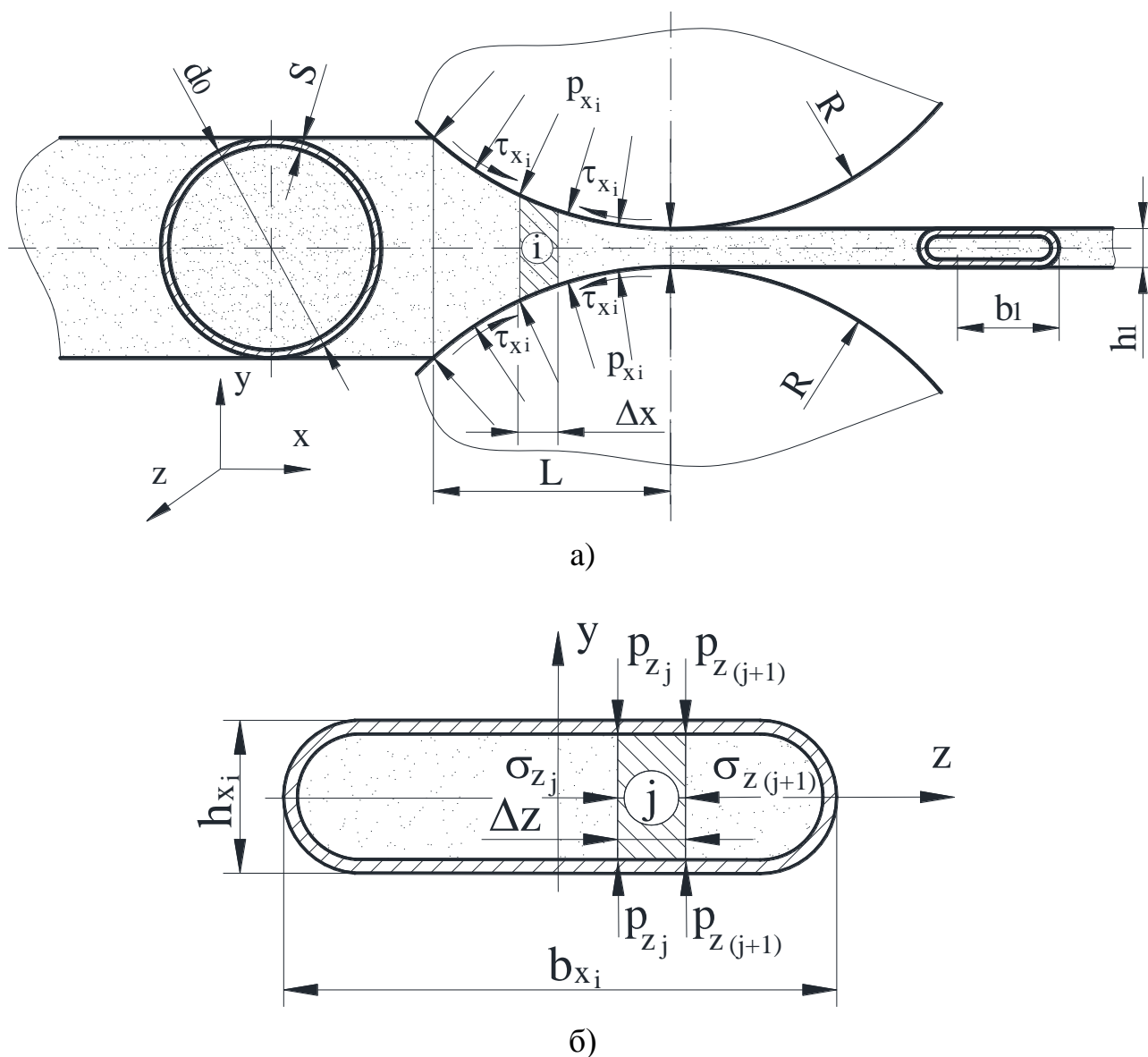
- в качестве закона трения принят закон Кулона-Амонтона

$$\tau_{xzj} = p_{xzj} \cdot f_{xcj}, \quad (5.20)$$

где τ_{xzj} – касательные напряжения на контактной поверхности;

p_{xzj} – нормальные контактные напряжения;

f_{xcj} – коэффициент трения на контактной поверхности;



а – в продольном направлении; б – в поперечном направлении

Рисунок 5.15 – Расчетная схема очага деформации при плющении порошковой проволоки

- металл в процессе плющения течет только в поперечном направлении (допущение, основанное на результатах экспериментальных исследований);
- механические свойства металла по ширине ленты непостоянны, поэтому необходимо определять механические свойства σ_{sji} и относительную деформацию ε_{xji} в каждом элементарном объеме металла.

Схема к расчету ε_{xji} представлена на рисунке 5.16 [267]:

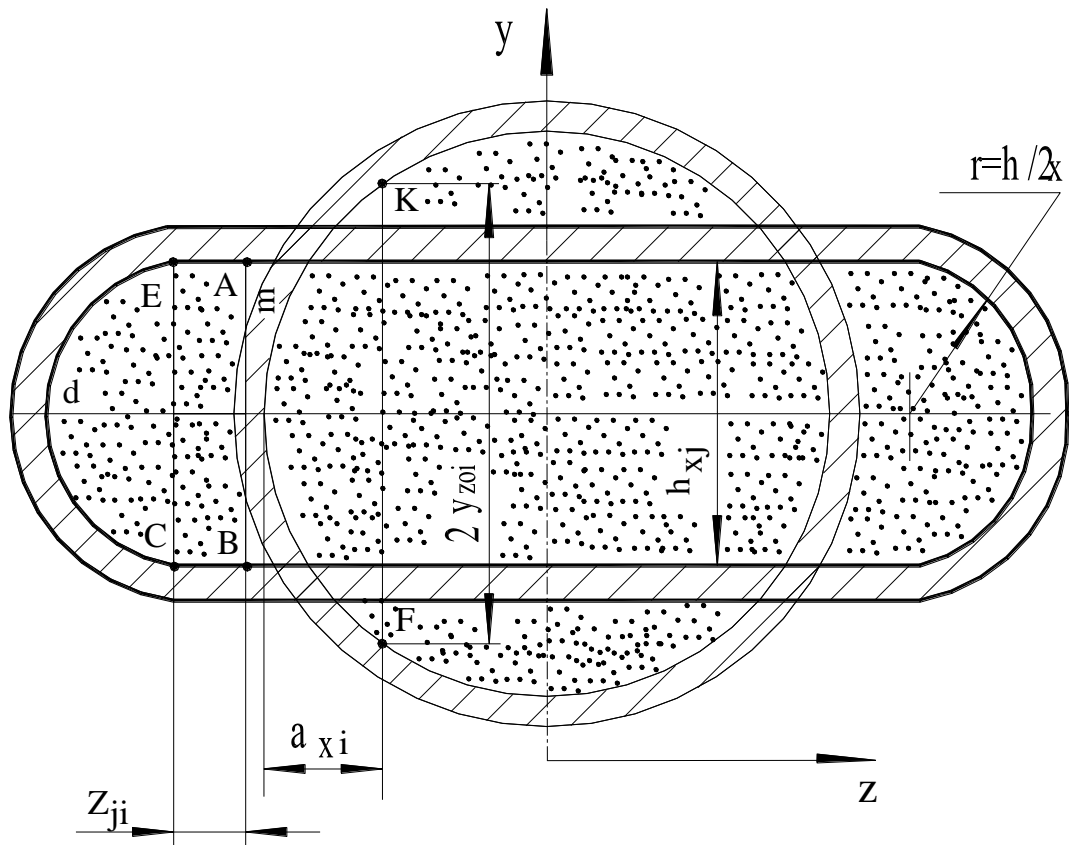


Рисунок 5.16 – Расчетная схема к расчету относительной деформации ε_{xji}

$$\varepsilon_{xji} = (y_{zo} - h_{xj}) / y_{zoi}, \quad (5.21)$$

где y_{zoi} – высота исходной заготовки для данного элементарного объема, находится из условия равенства площади фрагмента плющенной ленты ABCdE и сегмента исходной заготовки FmK, причем:

$$ABCdE = \pi h_{xj}^2 / 8 + h_{xj} z_{ji}; \quad (5.22)$$

$$FmK = 2a_i \cdot y_{zoi} / 3, \quad (5.23)$$

a_i – высота сегмента FmK, которая выражается через y_{zo} , т.к. в уравнении (5.36) два неизвестных:

$$a_i = \frac{d_o}{2} - \sqrt{\left(\frac{d_o}{2}\right)^2 - y_{zoi}^2}. \quad (5.24)$$

Значение a_i находим путем последовательного подбора чисел от 0 до $d_0/2$, причем условием, что число подобрано правильно является равенство расчетных площадей $ABCdE$ и сегмента FmK .

Выразив с учетом принятых допущений геометрические характеристики, а также напряжения τ_{xzji} , p_{xzji} , σ_{xzji} в конечно-разностном виде, рассмотрим двухмерное условие статического равновесия выделенного элементарного объема металла в зоне пластического формоизменения [268, 269]:

$$\sigma_{xzji}h_{xj} - \sigma_{xzj(i+1)}h_{xj} + 2 \frac{(\tau_{xzji} + \tau_{xzj(i+1)})}{2} \Delta Z_{ji} = 0. \quad (5.25)$$

В то же время для порошкового материала нормальные напряжения σ_x можно выразить через нормальные контактные напряжения p_{xzji} преобразовав условие пластичности для сыпучих сред, аналитическое описание которого с учетом допущения о плоскодеформированном состоянии порошковой среды (3.12) и принятых условных обозначений имеет следующий вид [268, 269]:

$$p_{xzji}^2 - 2 \cdot \frac{1 - 2\alpha_{xi}}{1 + 4\alpha_{xi}} p_{xzji} \sigma_{xzji} + \sigma_{xzji}^2 = \frac{4}{3} \cdot \frac{1 + \alpha_{xi}}{1 + 4\alpha_{xi}} \beta_{xi} \sigma_{sxi}^2. \quad (5.26)$$

В общем случае с учетом рекуррентной формы решения, принятого закона трения(5.33), условия пластичности (5.39) и с учетом известных значений σ_{xzji} и p_{xzji} уравнение (5.38) содержит одно неизвестное $p_{xzj(i+1)}$. Решив это выражение [268] относительно $p_{xzj(i+1)}$ можно определить полностью напряженное состояние в очаге деформации:

$$p_{xzj(i+1)}^2(t_1^2 - t_3) + 2p_{xzj(i+1)}t_1t_2 + t_2^2 - t_4 = 0 \quad (5.27)$$

где $t_1 = \frac{1 - 2\alpha_{xzji}}{1 + 4\alpha_{xzji}} h_{x(j+1)} - f_{xz(j+1)} \Delta z_{ji}$; $t_2 = p_{xzji} f_{xzji} \Delta z_{ji} + \sigma_{xzji} h_{xj}$;

$$t_3 = h_{x(j+1)}^2 \left[\left(\frac{1 - 2\alpha_{xzji}}{1 + 4\alpha_{xzji}} \right)^2 - 1 \right]; \quad t_4 = \frac{4}{3} h_{x(j+1)}^2 \frac{1 + \alpha_{xzji}}{1 + 4\alpha_{xzji}} \beta_{xzji} \sigma_{sxji}^2.$$

В качестве начальных условий использовали следующие выражения:

$$p_{xzji} \Big|_{i=1} = \frac{4}{3} \frac{1 + \alpha_{xzji}}{1 + 4\alpha_{xzji}} \beta_{xzji} \sigma_{sxji}^2; \quad \sigma_{xzji} \Big|_{i=1} = 0, \quad (5.28)$$

Значения деформирующих напряжений в зоне пластического формоизменения определяли последовательно для каждого элемента, т.е. решали задачу в рекуррентном виде по ширине ленты с последующим переходом по длине очага деформации. Направление вычислительного процесса принимали от кромок ленты к центру.

Силу плочения, приложенную к j, i -му элементарному объему, определили следующим образом:

$$P_{xz} = 2p_{xzji} \Delta z_{ji} \Delta x. \quad (5.29)$$

Момент, приложенный к j, i -му элементу

$$M_{xz} = 2P_{xzji} \Delta z_{ji} \Delta x x_j. \quad (5.30)$$

Сила и момент приложенные к j -му сечению:

$$P_{xx} = \sum_{i=1}^{n_z/2} P_{xz}, \quad M_x = \sum_{i=1}^{n_z/2} M_{xz}, \quad (5.31)$$

где n_z – задаваемое количество разбиений по ширине каждого отдельного поперечного сечения.

Полные сила и момент плочения:

$$P = \sum_{j=1}^{k_x} P_{xj}, \quad (5.32)$$

$$M = \sum_{j=1}^{k_x} M_{xj}, \quad (5.33)$$

где k_x – задаваемое количество разбиений по длине очага деформации.

Для определения силовых параметров при деформации металлической оболочки была разработана математическая модель напряженно-деформированного состояния металла при изгибе листового металла. Данная модель основана на выделении элементарного поперечного сечения листа и численном решении конечно-разностной формы условия его статического равновесия. В соответствии с этим, расчетная схема, включает в себя исходное состояние заготовки, характеризуемое толщиной S и исходной кривизной χ_0 , нагруженное состояние с текущей кривизной χ_1 и конечное состояние, которое характеризуется требуемой кривизной $\chi_{ост}$. Влиянием деформаций сдвига и связанными с ними касательными компонентами тензора напряжений пренебрегаем, что позволяет использовать гипотезу плоских сечений и существенно упрощает аналитическое описание условия связи деформаций и напряжений [270].

Непосредственно математическое моделирование заключается в разбиении поперечного сечения листа на элементарные поперечные сечения с порядковыми номерами $i=1...n_y$ и последующем определении их геометрических характеристик (рис. 5.16):

$$\Delta S = S / n_y; \quad y_k = S/2 + \Delta S(k - 0.5). \quad (5.34)$$

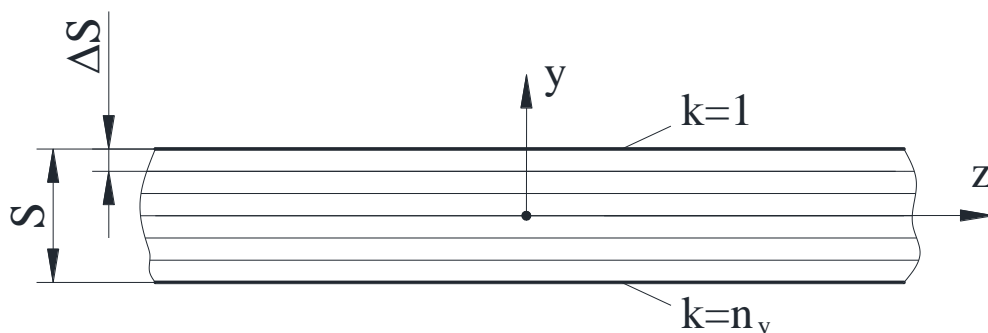


Рисунок 5.17 – Расчетная схема к определению силовых характеристик при деформации оболочки

Количественные оценки относительных деформаций напряжения-сжатия могут быть получены исходя из чисто геометрического решения изогнутого листа, имеющего начальную кривизну χ_0 [271, 272]

$$\varepsilon_{sk} = \frac{(1 + \chi_1 y_k) \varepsilon_{cp} - (\chi_1 - \chi_0) y_k}{1 + \chi_0 y_k}, \quad (5.35)$$

где ε_{cp} – относительная деформация растяжения линии, соответствующей средней линии листового металла.

Для процессов холодной обработки давлением более приемлемым является использование в качестве показателя деформированного состояния не величины относительного обжатия, а интенсивности деформации ε_{s_k} , определяемые как [273]:

$$\varepsilon_{s_k} = \left(\sqrt{2}/3\right) \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}, \quad (5.36)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – главные линейные деформации.

Главные линейные деформации для плоского деформированного состояния связаны между собой следующими соотношениями: $\varepsilon_1 = -\varepsilon_3 = \ln(l_1/l_0) = \ln(1 + \varepsilon_{s_k})$ и $\varepsilon_2 = 0$.

Переходя к аналитическому описанию функциональной связи $\sigma_y(\varepsilon_{s_k})$, введем дополнительное понятие остаточной степени деформации, определяемое с учетом известного значения модуля упругости материала E [274]:

$$\varepsilon_{ост_k} = \varepsilon_{s_k} - \sigma_{y_k} / E, \quad (5.37)$$

а также дополнительные понятия напряжений текучести материала листа:

$$\sigma_{s_k} = a_0 + a_1 \varepsilon_{s_k} + a_2 \varepsilon_{s_k}^2 + a_3 \varepsilon_{s_k}^3, \quad (5.38)$$

где a_0, a_1, a_2, a_3 – значения коэффициентов регрессии аналитического описания интенсивности деформационного упрочнения различных металлов и сплавов.

Полученные с учетом изложенного выше аналитические выражения при одновременном указании диапазонов их возможного использования, определяемых количественно соответствующим показателям интенсивности деформации ε_{s_k} , сведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Зависимости для определения напряжений и деформаций металлической оболочки

Параметр	Характер нагружения металла		
	Упругопластическое растяжение	Упругая деформация	Упругопластическое сжатие
ε_{s_k}	$\varepsilon_{s_k}^{(+)} > \varepsilon_{ocm_k} + \sigma_{s_k} / E$	$\varepsilon_{s_k}^{(+)} \leq \varepsilon_{ocm_k} + \sigma_{s_k} / E$ $\varepsilon_i^{(-)} \leq \varepsilon_{ocm_k} + \sigma_{s_k} / E$	$\varepsilon_{s_k}^{(-)} < \varepsilon_{ocm_k} + \sigma_{s_k} / E$
σ_{y_k}	σ_{s_k}	$E(\varepsilon_{s_k} - \varepsilon_{ocm_k})$	σ_{s_k}
ε_{ocm}	$\varepsilon_{s_k} - \sigma_{y_k} / E$	ε_{ocm_k}	$\varepsilon_{s_k} - \sigma_{y_k} / E$

Представленные зависимости (см. табл. 5.1) в сочетании с организацией численного интегрирования:

$$T_{y_k} = \sum_{k=1}^{n_y} \sigma_k \Delta S ; M_{y_k} = \sum_{k=1}^{n_y} \sigma_k y_k \Delta S \quad (5.39)$$

составили полный алгоритм по расчету напряженно-деформированного состояния изгиба оболочки. Показатели относительной деформации слоя, соответствующего координате центра тяжести рассматриваемого сечения для упругопластической нагрузки ε_{cp_r} и разгрузки $\chi_{ocm(r+1)}; \varepsilon_{ocm(r+1)}$ определяли на основе дополнительной итерационной процедуры, аналитическое описание которой имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{cp_r} = \varepsilon_{cp_r} - T_{y_r} / (E \cdot F_S) ; \varepsilon_{ocm(r+1)} = \varepsilon_{s_k} - \sigma_{y_k} / E ;$$

$$\chi_{осм(r+1)} = \chi_{осмr} - M_{y_r} / (E \cdot J_s), \quad (5.40)$$

где r – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

F_s, J_s – площадь и момент инерции поперечного сечения оболочки.

Для оценки степени сходимости итерационных процедур решения (5.40) использовали следующее условие:

$$\delta_r = |T_{y_r} / h| + |M_{y_r} / S^2| \leq 0,01. \quad (5.41)$$

Нормальные контактные напряжения в свою очередь были определены как

$$P_{Sx_i} = \sum_{i=1}^{n_y} \sigma_{y_k} \Delta y \chi_{res_k}, \quad (5.42)$$

где σ_{y_i} – текущее по длине очага деформации значение нормальных напряжений (табл. 5.1)

Энергосиловые параметры определяли на основе интегрирования показателей напряженного состояния порошкового сердечника и металлической оболочки:

$$P = \sum_{i=1}^{n_x} (P_{x_i} + 2p_{sxi} a_{xi} \Delta x). \quad (5.43)$$

Все представленные выше зависимости легли в основу математической модели процесса плющения порошковой проволоки в монометаллической оболочке. В результате реализации полученной модели были определены геометрические характеристики очага деформации, распределения плотности порошкового сердечника по длине и ширине ленты, локальные и интегральные значения энергосиловых параметров, а именно:

- ширину площади контакта и толщину каждого j -го элемента;
- значения средних нормальных контактных напряжений в каждом j -ом элементе;
- значения интегральной по ширине сечения силы прокатки в каждом j -ом элементе;
- суммарную силу прокатки;
- момент площения.

В качестве примера результатов численной реализации разработанной математической модели на рисунке 5.17 представлены распределения локальных и интегральных характеристик процесса площения. Результаты получены для случая площения проволоки с сердечником из железного порошка диаметром $d_0 = 5,0$ мм относительной плотностью равной 0,35 при радиусе рабочих валков $R_B = 50$ мм и могут быть использованы при назначении технологических режимов площения в зависимости от требуемых показателей геометрии площенной ленты, используя отношение толщины ленты к исходному диаметру проволоки h_1/d_0 , а также требуемой относительной плотности порошкового сердечника γ_1 .

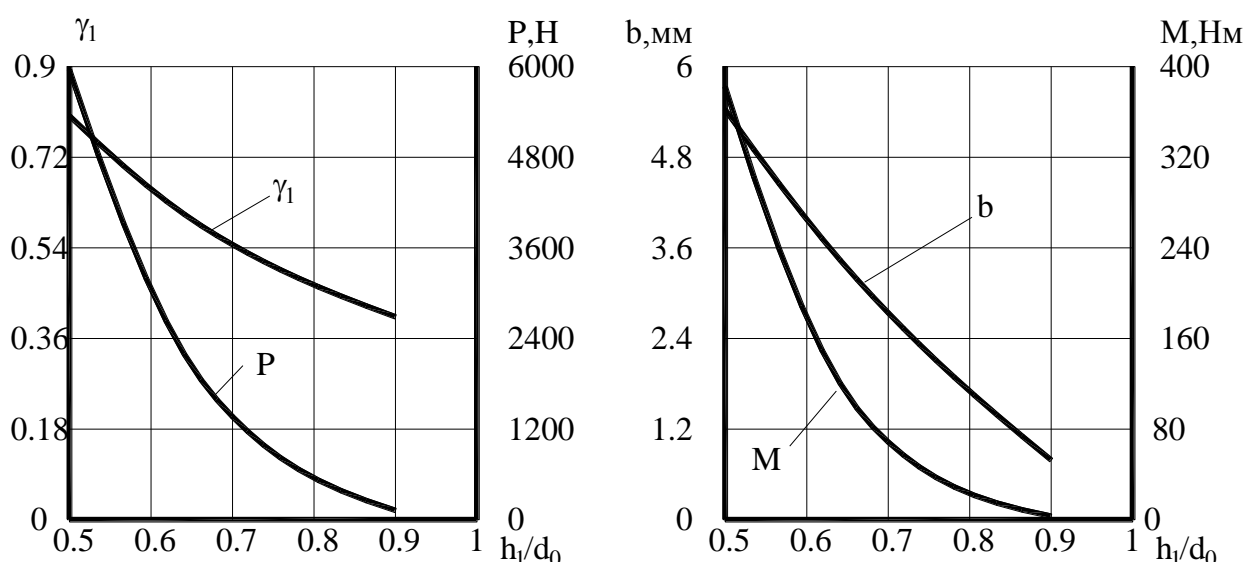


Рисунок 5.17 – Расчетные распределения интегральных характеристик процесса площения порошковой проволоки

На рисунке 5.18 представлены расчетные распределения нормальных контактных напряжений и относительной плотности вдоль очага деформации при различных обжатиях. Из анализа зависимостей видно, что интенсивность роста данных параметров увеличивается в выходу из очага деформации, а уровень возрастает при увеличении обжатия.

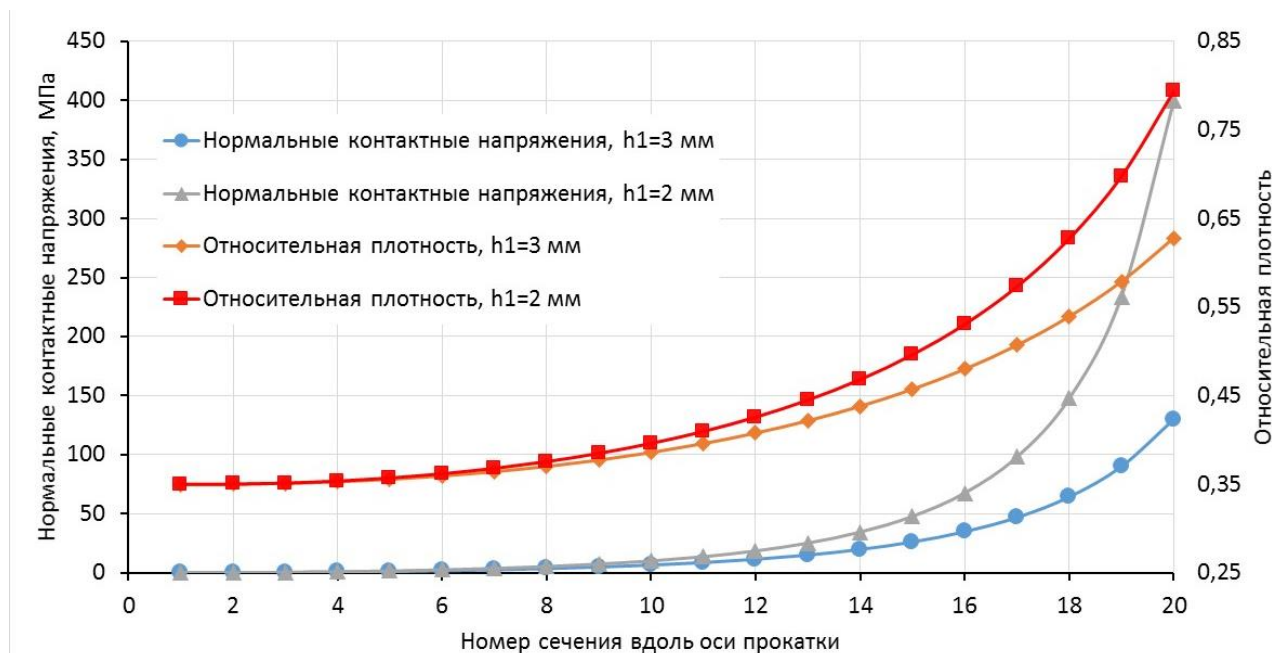


Рисунок 5.18 – Распределение нормальных контактных напряжений и относительной плотности порошкового сердечника по длине очага деформации

На рисунке 5.19 представлена зависимость силы прокатки от толщины оболочки при различных обжатиях порошковой ленты. Из анализа данных распределений видно, что толщина оболочки оказывает влияние на энергосиловые параметры плющения порошковой проволоки. Так например при увеличении толщины оболочки с 0,5 до 2,0 мм сила прокатки увеличивается в 4,54 раза.

На рисунке 5.20 показаны расчетные распределения составляющих сил прокатки при деформации порошкового сердечника и металлической оболочки. При использовании оболочки толщиной 0,1 мм данные составляющие сопоставимы, а при увеличении толщины оболочки до 2,0 мм наблюдается превышение силы деформации оболочки над силой деформации порошка от 3 до 11 раз в зависимости от обжатия.

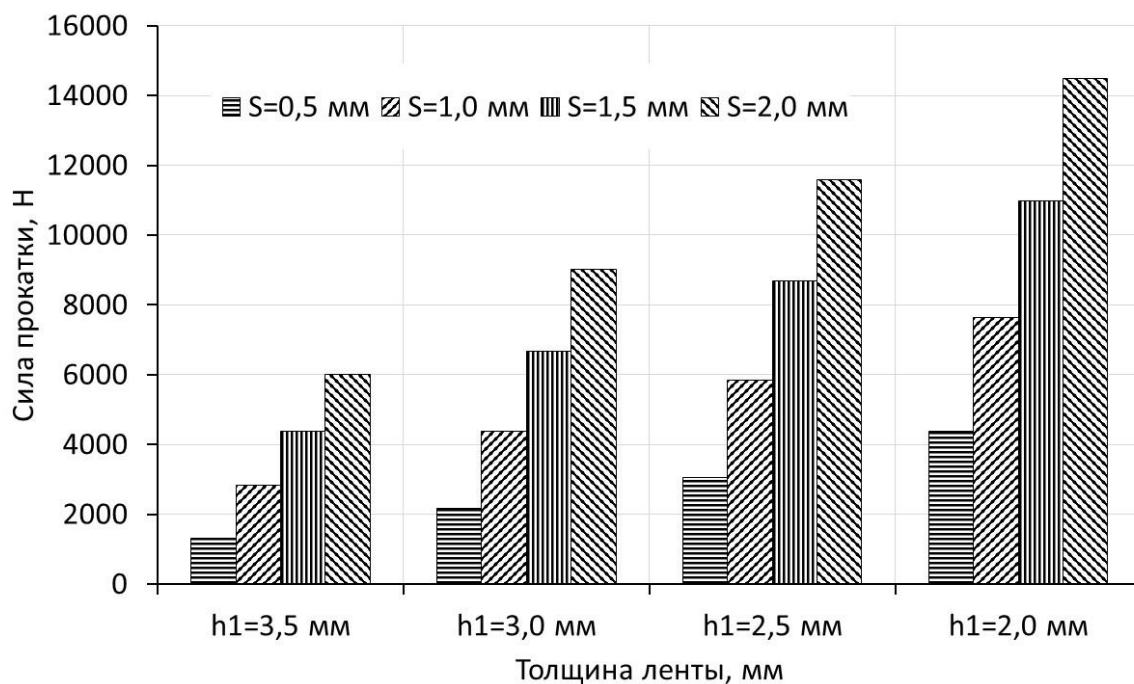


Рисунок 5.19 – Зависимость силы прокатки от толщины оболочки и обжатия

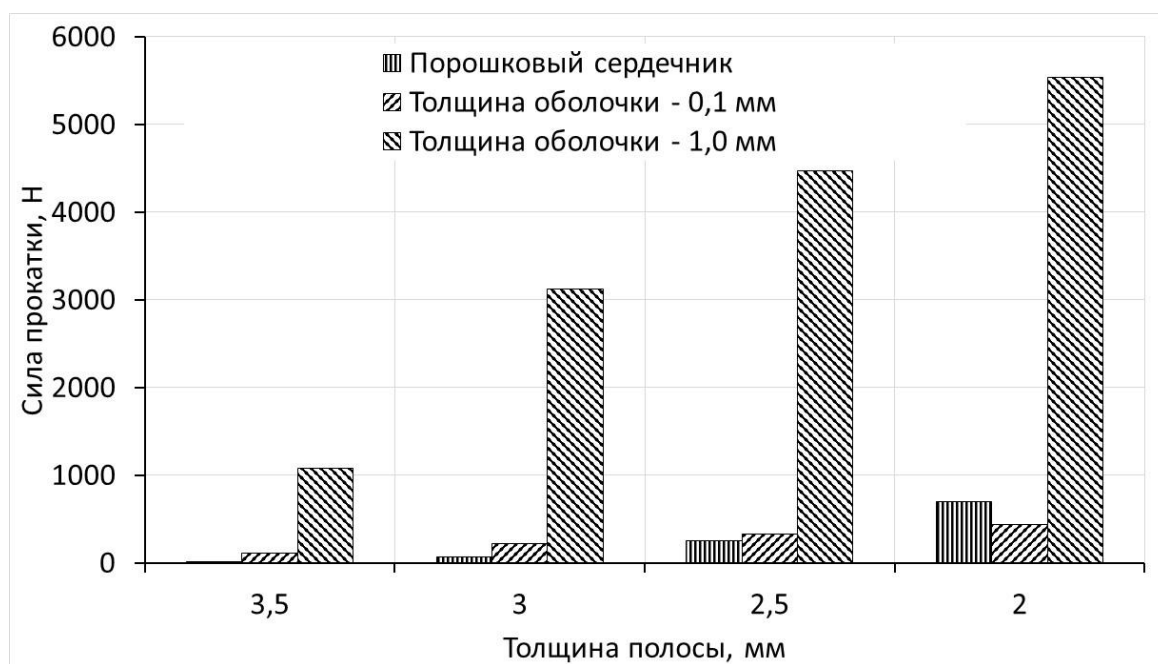


Рисунок 5.20 – Зависимость составляющих силы прокатки от толщины оболочки и обжатия

Проведенные теоретические исследования показывают влияние толщины и материала оболочки порошковой ленты на энергосиловые параметры процесса, при этом составляющая от деформации оболочки может быть сопоставима с силой деформации порошкового сердечника, а также превышать её в несколько раз.

5.4 Трехмерное конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки в металлической оболочке

Конечно-элементное моделирование процесса плющения порошковой проволоки было выполнено в системе Abaqus. При моделировании использовалась расчетная схема (рис. 5.21, а), которая представляла собой деформируемую заготовку и два рабочих вала с гладкой бочкой. Заготовка представляла металлическую оболочку со свойствами сплошной среды, заполненную порошковым сердечником из пористого материала (см. рис. 5.21, б) [275].

Для заготовки производили дискретизацию объема (построение конечно-элементной сетки) на элементарные области (конечные элементы). Для моделирования валков были использованы трехмерные недеформируемые элементы. Для моделирования и порошкового сердечника (см. рис. 5.21, в) и металлической оболочки (см. рис. 5.21, г) были использованы восьмиузловые линейные, твердотельные редуцированные элементы с контролем разрушения C3D8R [182, 183].

При моделировании были использованы следующие граничные условия: валки имели одну вращательную степень свободы и угловую скорость вращения равную 1 рад/с. Контакт между заготовкой и валками задавался при помощи модели контакта «Поверхность к поверхности» с коэффициентом трения равным 0,2.

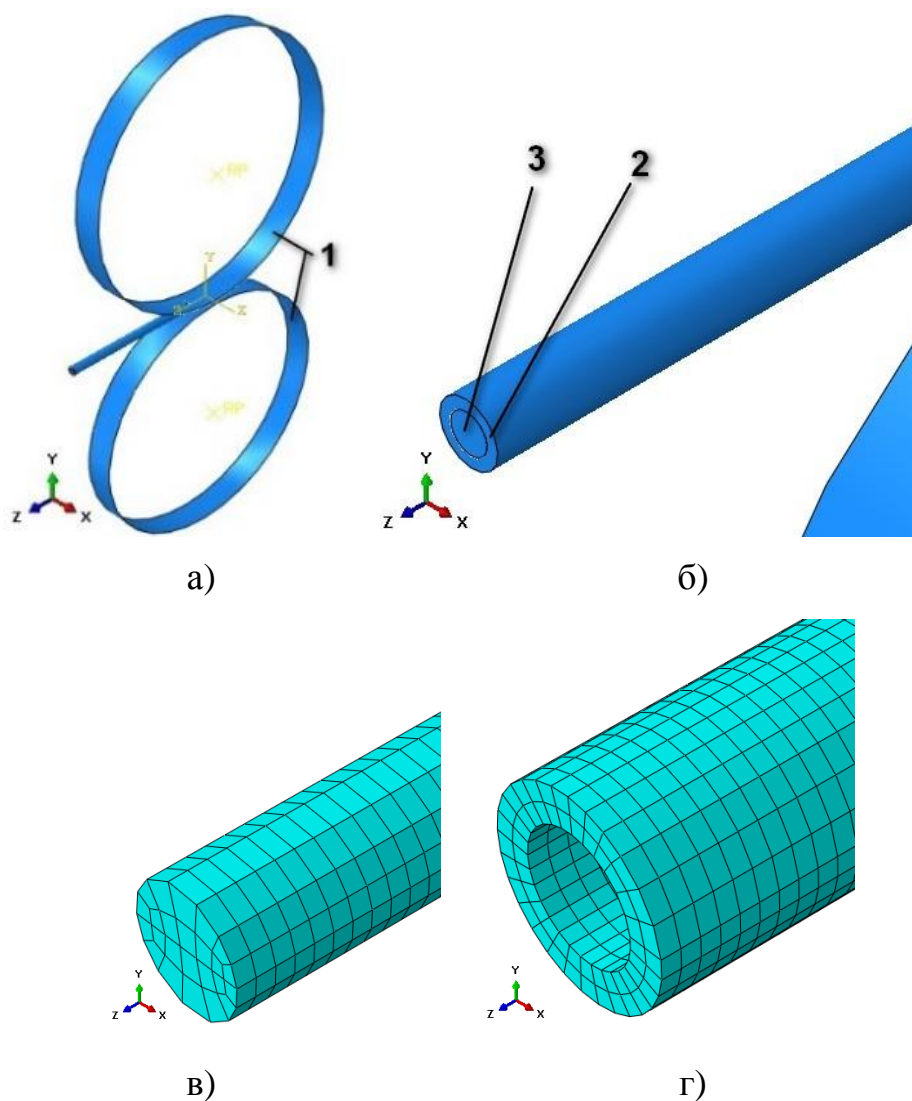


Рисунок 5.21 – Конечно-элементная модель процесса плющения порошковой проволоки (1 – рабочие валки; 2 – металлическая оболочка; 3 – порошковый сердечник):

а – расчетная схема; б – заготовка; в – конечно-элементная сетка порошкового сердечника; г – конечно-элементная сетка металлической оболочки

Моделирование было выполнено для следующих исходных параметров:

- диаметр валков – 100 мм;
- внешний диаметр оболочки – 3,2 мм;
- толщина оболочки – 0,6 мм;
- материал оболочки – сталь 08 кп;
- материал порошкового сердечника – железный порошок марки ПЖ4М2;
- межвалковый зазор – 3,13; 2,83; 2,66; 2,5 мм.

Для оценки полученных результатов выходными параметрами были выбраны проекции реакций в контрольных точках валков в глобальной системе координат, а также деформации и напряжения в узлах конечных элементов плоской заготовки, а также распределения пористости порошкового сердечника (рис. 5.22).

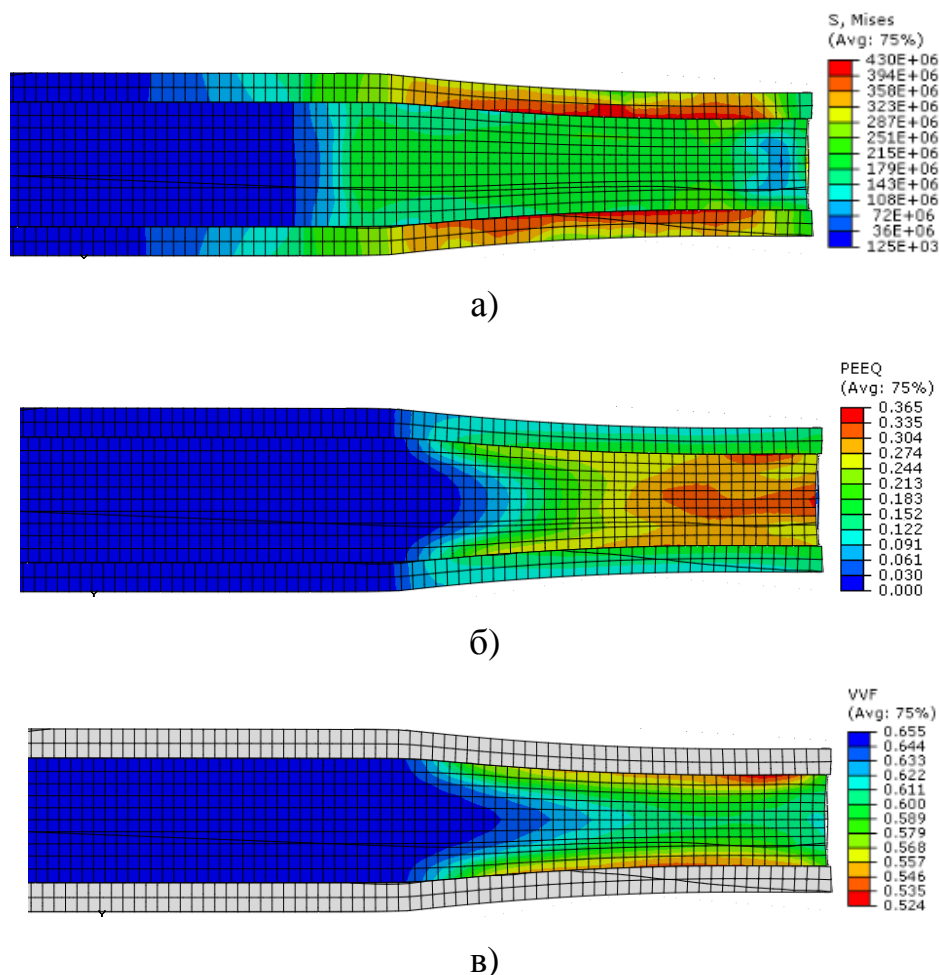


Рисунок 5.22 – Распределение эквивалентных напряжений (а), деформаций (б) и пористости (в) при плющении порошковой проволоки

На рисунке 5.23 представлены поля распределений эквивалентных деформаций по сечению плющенной ленты. Из анализа представленных результатов видно, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях. При малых обжатиях недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства.

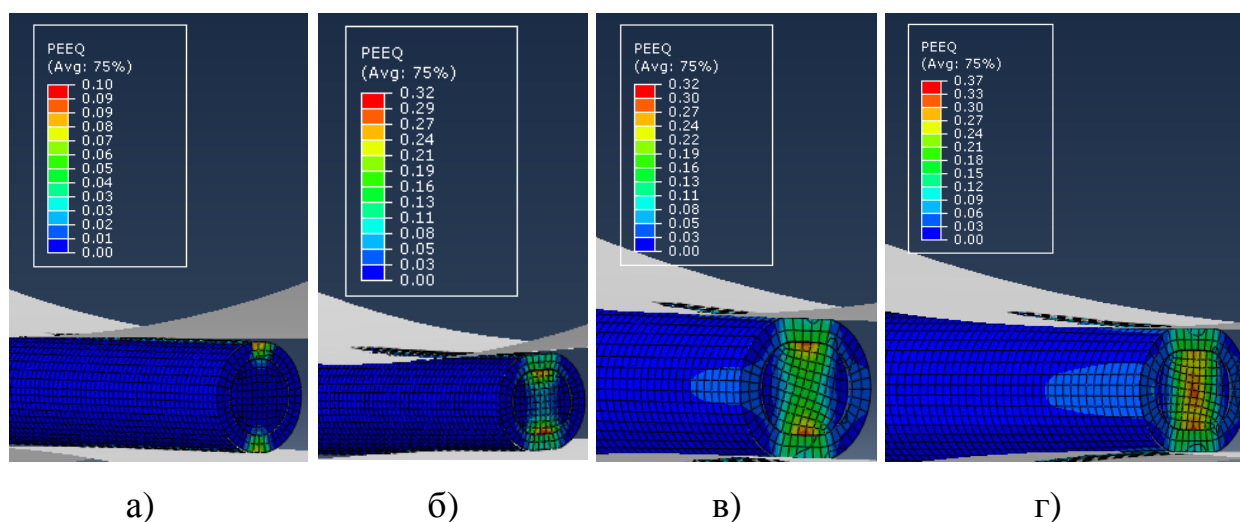


Рисунок 5.23 – Распределение эквивалентных деформаций при плющении порошковой ленты толщиной h :

а – $h=3,13$ мм; б – $h=2,83$ мм; в – $h=2,66$ мм; г – $h=2,5$ мм

На рисунке 5.24 представлены расчетные распределения силы и момента прокатки по времени. Анализ данных зависимостей показывает плавное нарастание энергосиловых параметров по мере заполнения очага деформации, что говорит о стабильности процесса. Максимальные значения силы прокатки представлены в таблице 5.2.

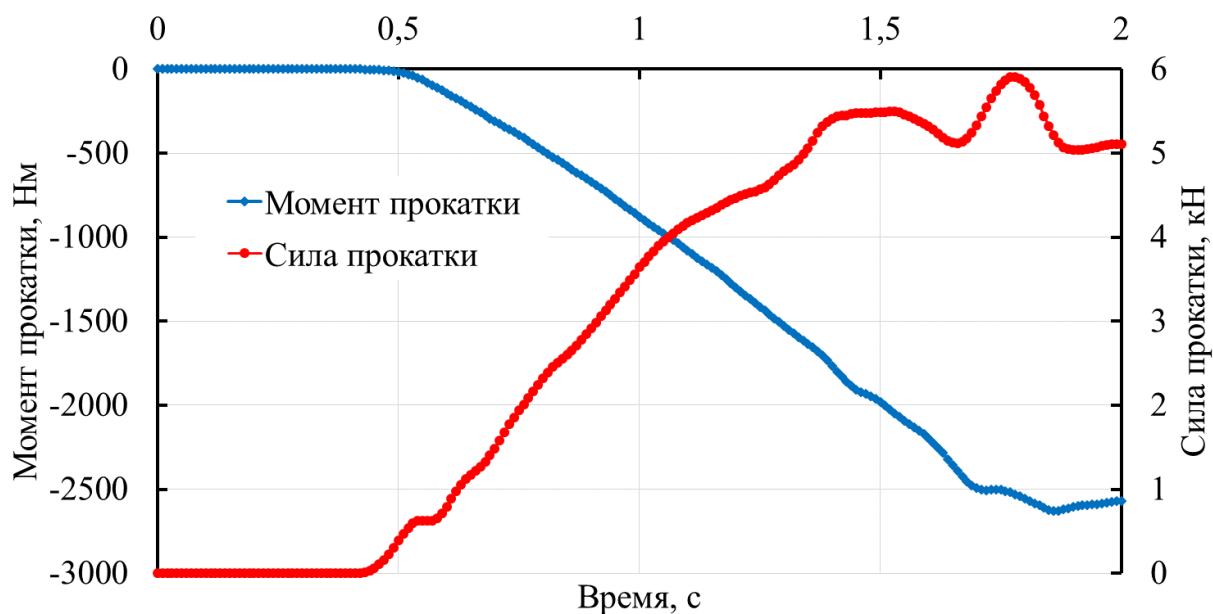


Рисунок 5.24 – Распределение силы и момента прокатки при плющении порошковой проволоки

Таблица 5.2

Сопоставление результатов расчета аналитической и
конечно-элементной моделей

№ опыта	Диаметр проволоки, мм	Толщина ленты, мм	Ширина ленты, мм	Сила прокатки, Н		Погрешность расчета %
				Аналитическая модель	Конечно-элементная модель	
1	3,2	3,13	3,33	560	514	8,95
2	3,2	2,83	3,72	1545	1700	9,12
3	3,2	2,66	3,8	1965	2096	6,25
4	3,2	2,5	4,1	2341	2600	9,96

Для проверки правомерности разработанной конечной элементной модели в таблице 5.2 представлено сравнение результатов расчета с аналитической моделью (подразд. 5.3). Из анализа полученных значений силы прокатки видно, что погрешность расчета не превысила 10%, что говорит о достаточной точности расчета и правомерности принятых допущений.

Теоретические исследования процесса плющения порошковой проволоки на основе разработанной конечно-элементной модели показали равномерность распределения напряжений, деформаций и плотности порошка в объеме очага деформации. Из анализа представленных результатов показано, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях. При малых обжатиях недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства. Адекватность модели проверена на основе сравнения результатов расчета с аналитической моделью, при этом погрешность расчета силы прокатки не превысила 10%, что говорит о достаточной точности расчета и правомерности принятых допущений.

Выводы

1 На основе теоретического анализа условий волочения порошковых материалов в металлической оболочке с использованием методов конечных разностей и конечных элементов установлено влияние величины обжатия и уровня натяжений на утонение оболочки, при увеличении степени деформации порошковой проволоки минимальное значение переднего натяжения возрастает, причем при обжатии выше 30% уровень этих усилий практически не меняется, также при этом наблюдается снижение коэффициента запаса прочности для материала оболочки, что может приводить к ее разрушению. Изменение относительной плотности сердечника в зависимости от степени деформации проволоки носит нелинейный характер, при этом интенсивность увеличения плотности при обжатии более 30% резко снижается, что обусловлено снижением деформации порошковой составляющей композиции.

2 На основе теоретического анализа условий прокатки порошковых материалов в металлической оболочке с использованием методов конечных разностей и конечных элементов установлено влияние толщины и материала оболочки порошковой ленты на энергосиловые параметры процесса. Установлено, что составляющая силы от деформации оболочки может быть сравнима с силой деформации порошкового сердечника, а также превышать ее в несколько раз в зависимости от величины обжатия, материала и толщины оболочки. Установлено, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях, а при меньших 25% – недеформированными остаются боковые зоны заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства.

РАЗДЕЛ 6

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВ В МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

6.1 Экспериментальные исследования прокатки порошковых лент в металлической оболочке

Экспериментальные исследования процесса прокатки порошковых лент проводились на лабораторном мини-стане 100x100 Г кафедры АММ Донбасской государственной машиностроительной академии. Общий вид стана приведен на рисунке 6.1. Конструкция экспериментальной установки и описание ее основных узлов рассмотрена в разделе 2 (рис. 2.3...2.5).



Рисунок 6.1 – Общий вид рабочей клетки лабораторного
мини-стана 100x100 Г ДГМА

Геометрические параметры заготовок представлены на рисунке 6.2; а образцы после проведения экспериментов – на рисунке 6.3.

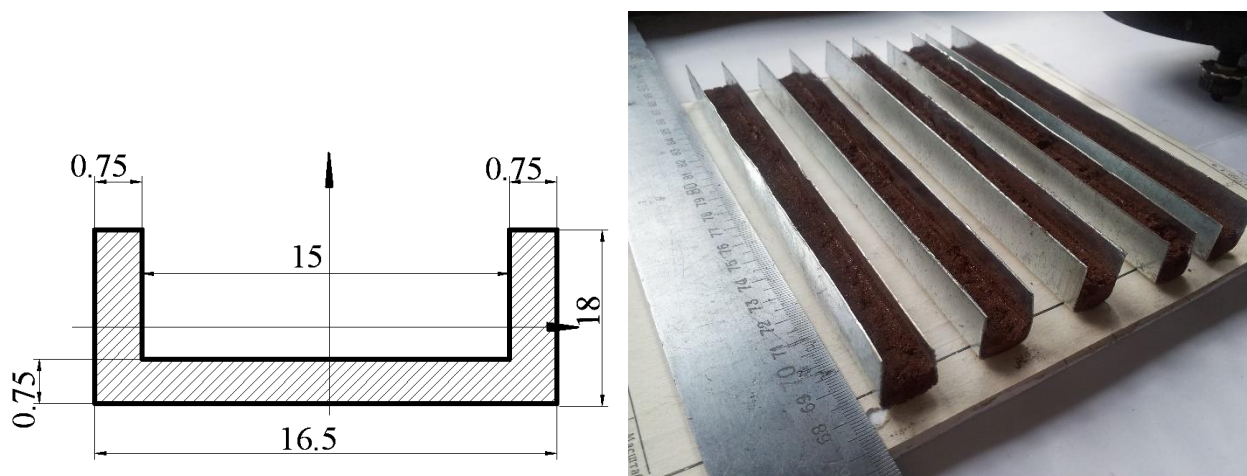


Рисунок 6.2 – Образцы для прокатки порошковой ленты
в металлической оболочке



Рисунок 6.3 – Образцы прокатанного порошкового материала
в металлической оболочке

Исследования были проведены для случая прокатки порошка на основе меди и оболочки из стали 08 кп. Поверхность готовых металлических профилей перед засыпкой порошкового материала обрабатывали керосином, а затем тонким слоем наносили силикатный клей для лучшего сцепления порошкового компонента и оболочки в процессе прокатки. Рабочие валки тщательно очищали и обезжировали перед каждым экспериментом. Скорость прокатки при проведении всех экспериментов составляла 0,05 м/с, радиус верхнего валка – 75 мм, нижнего – 50 мм, ширина прокатываемой композиции для всех случаев – 15 мм. Длина профиля, а, соответственно, и протяженность насыпного слоя порошка, составляла 200 мм, толщина металлической оболочки – 0,75 мм.

Прокатку осуществляли с различными обжатиями в оболочках различной толщины. Исследования включали две серии опытов: прокатка однослойного порошкового материала и прокатка насыпного слоя на предварительно уплотненном в П-образной металлической оболочке.

Результаты исследований влияния толщины оболочки на энергосиловые параметры представлена на рисунке 6.4. Установлено, что сила прокатки для ленты с оболочкой толщиной 1,2 мм меньше в 2,55 раза, чем для ленты с оболочкой толщиной 0,42 мм. Из анализа результатов полученных в ходе экспериментальных исследований можно сделать вывод о влиянии толщины оболочки на протекание процесса прокатки порошковых материалов. При этом, чем больше толщина оболочки, тем выше её жесткость, а, следовательно, меньше упругий прогиб, что уменьшает протяженность очага деформации и как следствие и энергосиловые параметры процесса, и деформацию порошковой составляющей. Это делает актуальным учет данного фактора при математическом моделировании процессов прокатки порошковых лент на металлической подложке и в металлической оболочке.

Результаты исследования влияния режимов обжатий при прокатке одно- и двухслойных порошковых материалов представлены в таблице 6.1.

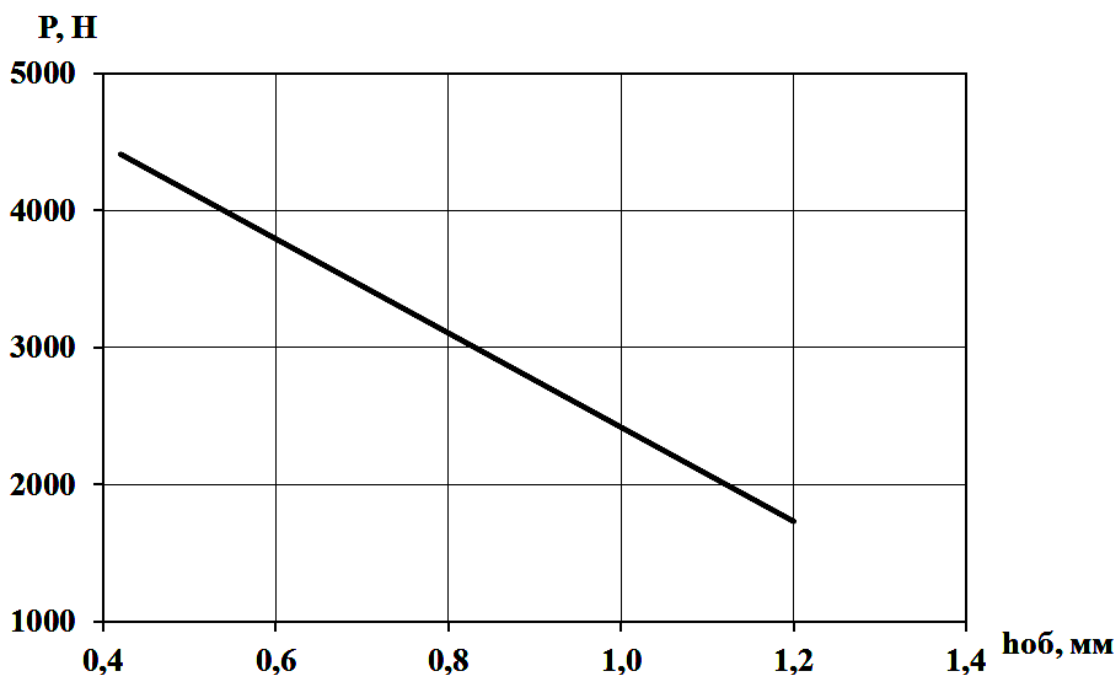


Рисунок 6.4 – Экспериментальная зависимость силы прокатки
от толщины оболочки

Таблица 6.1

Результаты теоретических и экспериментальных исследований
прокатки порошковых лент

№ п/п	h _{п0} , мм	h _{п1} , мм	P _{экспер} , кН	P _{теор} , кН
1 (прокатка за 1 проход)	5	3	3,181	3,254
2 (прокатка за 1 проход)	7,25	6	1,513	1,569
3 (прокатка за 2 прохода)	4,25 → 3	3+2 → 3	14,945	15,452
4 (прокатка за 2 прохода)	4,25 → 3	3+5 → 6	10,604	10,358

По результатам исследований установлено, что значения силы прокатки, полученные в ходе теоретических и экспериментальных исследований, совпадают, погрешность вычислений составила не более 10% со среднеквадратиче-

ским отклонением 2,76%, что говорит о достоверности разработанного математического аппарата по определению параметров напряженно-деформированного состояния порошкового сердечника в очаге деформации при реализации процесса прокатки. Также установлено, что при прокатке по предложенной технологии (за два прохода с последовательной засыпкой компонентов в металлическую оболочку), относительная плотность сердечника повышается при одинаковых режимах прокатки и сохраняется при этом размер фракции порошка, что является необходимым условием для данной технологии производства [276...278].

6.2 Экспериментальное исследование процесса волочения порошковой проволоки

Целью экспериментальных исследований является проверка математической модели позволяющей проектировать рациональные технологические режимы волочения порошковой проволоки с различными составами сердечника и материала оболочки.

При изготовлении порошковых проволок для наплавки и сварки высоколегированных сталей, бронз, меди, в качестве оболочки применяют соответствующую ленту как типичное сплошное тело. Сердечник порошковой проволоки воспринимает только сжимающие усилия. Напряжения волочения определяются совместным сопротивлением деформации оболочки и сердечника.

Выбор состава шихты порошковой проволоки производили с учетом металлургических особенностей свариваемых материалов. В качестве оболочки использовали ленты: медную М1 толщиной 0,5 мм и шириной $B = 15$ мм, стальную 65Г толщиной 0,5 мм, шириной $B = 12$ мм.

Состав сердечника порошковой проволоки для сварки меди (состав 1) состоит из: алюминиевого порошка, титанового порошка, циркония, медного порошка, марганца, кремния, плавикового шпата, кремнефторида натрия, оболочка – медная лента М1. Проволока для наплавки стали (состав 2) состоит из: рутила,

плавикового шпата, ферромарганца, феротитана, железного порошка, порошка алюминия, мрамора, оболочка – сталь 65Г.

Экспериментальное исследование процесса волочения порошковых проволок производили на специальном волочильном однобарабанном стане (рисунок 2.7, а).

Процесс волочения осуществляли следующим образом: холоднокатаную металлическую ленту формировали в U-образный желоб, заполняли шихтой, калибровали в трубчатую заготовку с последующим волочением. Натяжение создавали намоточным барабаном. Силу волочения измеряли при помощи тензодатчиков, наклеенных по мостовой схеме на волочильной плите (рис. 6.5) и подключенных к АЦП [279].

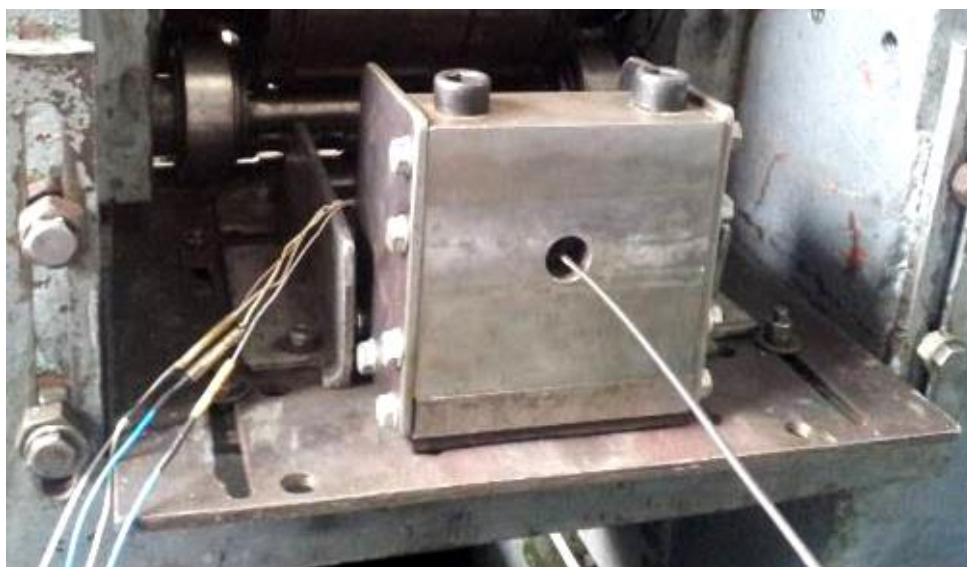


Рисунок 6.5 – Экспериментальная установка для волочения порошковой проволоки

Тарирование тензодатчиков производилось с помощью динамометра ДПУ-05-2 (ГОСТ 13837-68) установленного на волочильной плите с волокодержателем.

Критериями нормального волочения порошковых проволок считалось отсутствие разрывов составляющих сердечника и оболочки, полное закрытие

стыка проволоки, достаточная ее жесткость при выбранных исходных размерах составляющих и заданном диаметре фильеры.

Для нормального изготовления порошковых проволок волочение через первую фильеру производили при вытяжке $\mu = 1,2 \dots 1,3$. При таком коэффициенте вытяжки улучшается условие смазки проволоки в первой волоке, и предотвращается чрезмерное напряжение волочения, определяемое для первой протяжки суммой сил сопротивления протягиванию ленты через холостые формовочные ролики и деформации проволоки в первой волоке. При больших вытяжках возможен разрыв оболочки. Другим важным условием нормального процесса волочения порошковой проволоки через первую фильеру, обеспечивающий заданный ее состав, является выполнение следующего соотношения:

$$S_0 / S_{\phi} < 1 \quad (6.1)$$

где S_0 – площадь поперечного сечения порошковой проволоки, мм²;

S_{ϕ} – площадь поперечного сечения фильеры конической формы 7 с углом рабочего конуса $2\alpha = 12 - 18^\circ$.

Соотношение (6.1), является технологическим показателем волочения порошковой проволоки, позволяющий оценить возможность изготовления проволоки заданного состава. Если это соотношение > 1 , то произойдет кольцевой разрыв оболочки (смятие оболочки проволоки перед входом в первую фильеру). В этом случае следует увеличить диаметр первой фильеры, т.к. не представляется возможным изготовить проволоку требуемого состава.

Во втором и третьем переходе, где сердечник еще недостаточно уплотнен, назначали максимальную деформацию, превышающую величину разового среднего обжатия. Величина разового обжатия для проволоки с оболочкой из меди М1, и мягким сердечником достигала 30 – 35 %, для проволоки 65Г и жестким сердечником составляло 25 – 30%. В последующих переходах деформации плавно уменьшали. При волочении медной проволоки до диаметра 3,5 мм усилия

протяжки практически не меняются и только с уплотнением сердечника возрастает сила трения на границе «сердечник – внутренняя поверхность оболочки» что приводит к интенсификации процесса утонения оболочки. Удлинение возрастает постоянно. В проволоке со стальной оболочкой сердечник более жесткий поэтому темп нарастания деформаций выше. Такой характер пластичности при волочении проволоки определяется соответствующими свойствами порошков и материала оболочки (рис. 6.6).

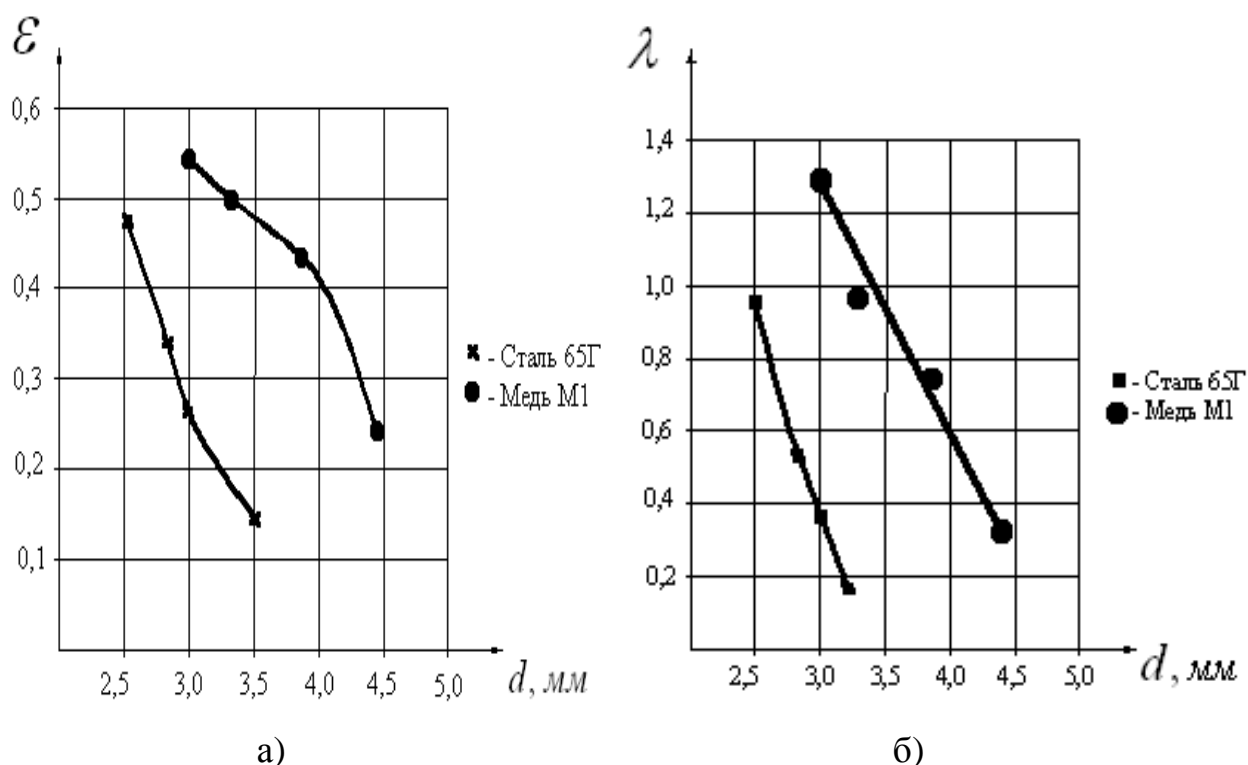


Рисунок 6.6 – Зависимость относительного сужения (а) и относительного удлинения (б) от диаметров порошковых проволок

Общее количество переходов (n) за все волочение порошковой проволоки от диаметра первой фильеры (D_0) до заданного конечного диаметра (D_1) было определено в зависимости от требуемого запаса прочности, обеспечивающего целостность оболочки при деформации.

В дальнейшем по известным усилиям волочения рассчитывались напряжения возникающие в очаге деформации при волочении порошковых проволок по следующей зависимости:

$$\sigma = \frac{P_v}{F_n}; \quad (6.2)$$

где: P_v – усилия волочения при протяжке порошковой проволоки кН.;

F_n – площадь поперечного сечения порошковой проволоки, мм²;

Помимо определения напряжений, возникающих при волочении порошковых проволок, было определено распределения относительной плотности порошкового материала (рис. 6.7). Полученные зависимости могут быть использованы в качестве исходных данных при разработке режимов волочения порошковой проволоки.

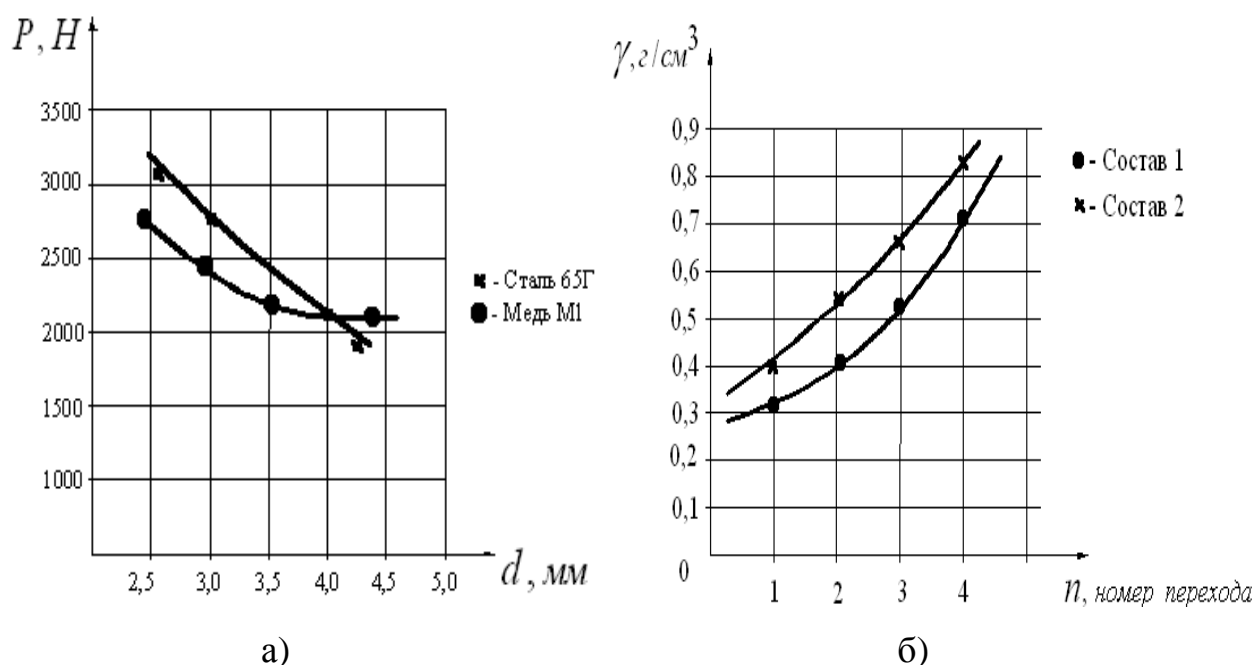


Рисунок 6.7 – Распределения усилий волочения (а) и относительной плотности порошкового сердечника (б) при волочении порошковых проволок

В ходе эксперимента были получены коэффициенты деформации $\varepsilon = 0,143 - 0,157$ для меди, $\varepsilon = 0,085 - 0,149$ для стали, относительная плотность порошка для меди 0,7, для стали 0,8 сила натяжения при волочении порошковой проволоки не превысила 3 кН. Данный уровень натяжения обеспечивает целостность оболочки при деформации. Напряжения, возникающие при волочении проволоки не превысили предел прочности материала оболочки.

6.3 Экспериментальные исследования процесса плющения порошковой проволоки в металлической оболочке

Исследования интегральных энергосиловых параметров и результирующих геометрических характеристик процесса плющения ленты были проведены в лаборатории кафедры «Автоматизированные металлургические машины» ДГМА на базе рабочей клетки 100×100 Г (рис. 2.3...2.5, 6.8). Непосредственно плющению подвергали предварительно сформованную порошковую проволоку из стали 08 кп с порошковым сердечником, основой которого являлся железный порошок. Собственно процесс плющения осуществляли с обжатиями от 20% до 50%. в рабочей клетки без использования технологической смазки.

В рамках проведения экспериментальных исследований измеряли толщину ленты после прокатки в клетки h_1 при помощи микрометра. Силу прокатки P фиксировали при помощи месдоз (см. рис. 6.8) и следующей тензометрической аппаратуры. Запись всех текущих во времени регистрируемых параметров производили при помощи аналого-цифрового преобразователя АЦП Е14-140 с использованием ЭВМ. Источником питания служила аккумуляторная батарея номинальным напряжением 12 В. Применение данного шестнадцатибитного аналого-цифрового преобразователя позволило оцифровывать входной сигнал с частотой 100 кГц на один канал, при необходимости можно было усилить сигнал в диапазоне 1...1000.

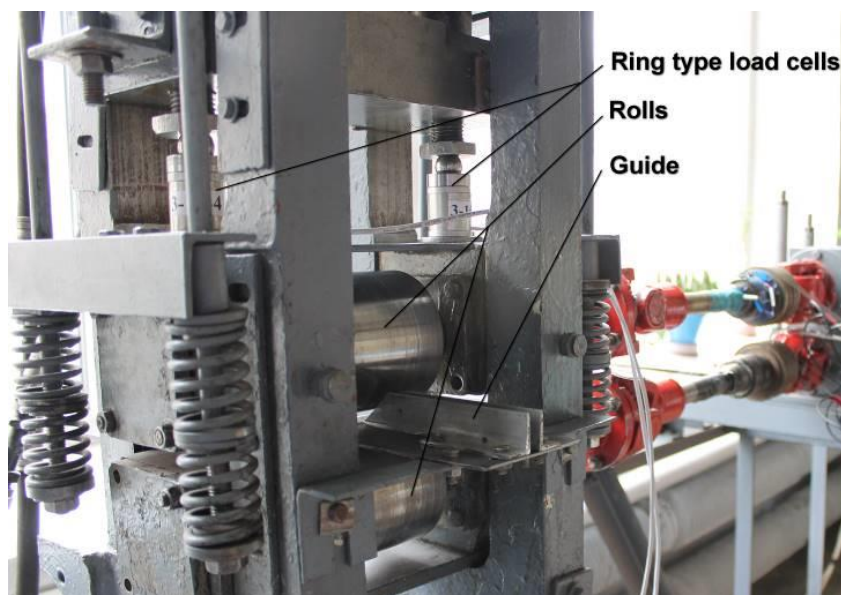


Рисунок 6.8 – Плющение порошковой проволоки в металлической оболочке в рабочей клети стана 100x100 Г

Для расшифровки полученных осциллограмм строили тарировочные графики, определяли тарировочный коэффициент. Фрагмент получаемой в ходе эксперимента осциллограммы представлен в качестве примера на рисунке 6.9.

Для расшифровки осциллограмм была проведена тарировка месдоз, а полученная в этом случае типовая осциллограмма тарировки иллюстрирована рисунком 6.10. Тарировку измерителей сил при реализации процесса плюще-

ния производили следующим образом: месдозы установленные соосно при помощи гидравлического пресса (рис. 6.11) нагружали силой Q_i , величина которой являлась известной исходя из фиксируемого манометром давления рабочей жидкости в системе. Одновременно с этим фиксировали и соответствующее отклонение сигнала l_i . Затем давление рабочей жидкости в системе гидравлического нажимного механизма изменяли на соответствующую величину, переходя к силе $Q_{(i+1)}$, фиксировали отклонение $l_{(i+1)}$ и так далее. По мере окончания тарировки во всем диапазоне предполагаемых условий реализации, учитывая, что сила прокатки $P_i = 2Q_i$, строили графическую интерпретацию $l = F(P)$ и производили аналитическое описание полученной эмпирически функциональной связи. С учетом данных зависимостей, используя вычислительную технику, производили расшифровку данных, полученных непосредственно при реализации процессов плющения.

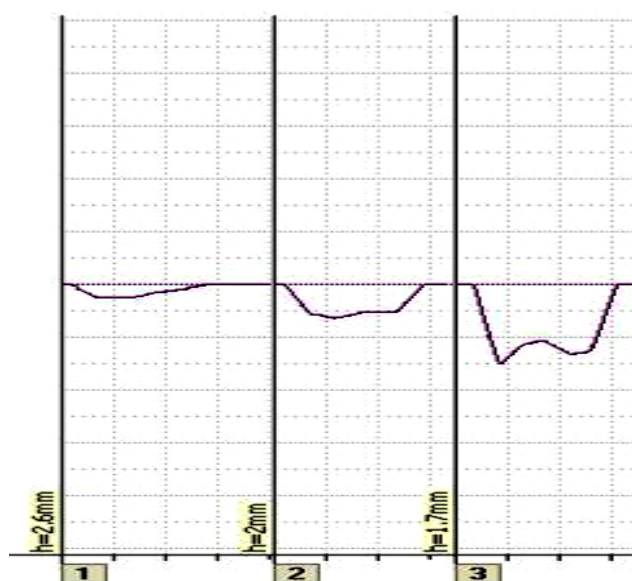


Рисунок 6.9 – Пример осциллограммы измерения силы прокатки

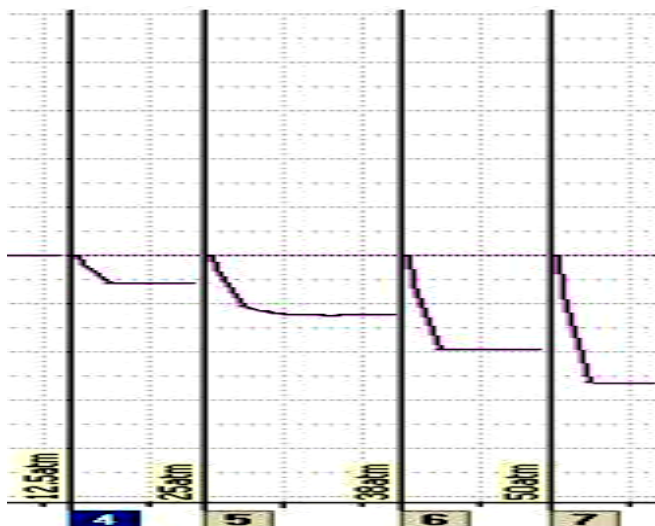


Рисунок 6.10 – Пример осциллограммы тарировки силы прокатки



Рисунок 6.11 – Тарировка кольцевых месдоз на гидравлическом прессе

На рисунке 6.12 представлены образцы порошковых проволок до эксперимента (см. рис. 6.12, а) и образцы плющенных лент после прокатки на стане (см. рис. 6.12, б)

При экспериментальных исследованиях были использованы в качестве исходной заготовки два типа проволок. Состав сердечника порошковой проволоки

в оболочке из меди М1 (состав 1) включал: медный порошок, алюминиевый порошок, титановый порошок, цирконий, марганец, кремний, плавиковый шпат, кремнефторид натрия. Состав сердечника порошковой проволоки в оболочке из стали 65Г (состав 2) включал: железный порошок, алюминиевый порошок, ферромарганец, ферротитан, рутил, плавиковый шпат, мрамор.



а



б

Рисунок 6.12 – Образцы порошковых проволок до эксперимента (а) и образцы плющенных лент после прокатки на стане (б)

Были использованы проволоки различного диаметра – от 2,1 до 6,0 мм, и различной толщиной оболочки – от 0,4 до 0,6 мм. Обжатие h_1/d_0 варьировали от 0,62 до 0,95.

Результаты экспериментальных исследований представлены в таблице 6.2, а сравнение теоретических и опытных данных – на рисунках 6.13-6.14.

Таблица 6.2

Результаты экспериментальных исследований процесса плющения порошковой проволоки

N	Состав сердечника	d_0 , мм	S, мм	h_1 , мм	b_1 , мм	h_1/d_0	P, N (опыт)	P, N (модель)	δP , %
1	Состав 1	2.1	0.4	1.50	2.42	0.71	3879	3842	2.5
2	Состав 1	2.1	0.4	1.30	2.62	0.62	5428	4700	9.0
3	Состав 2	3.3	0.5	3.15	3.51	0.95	797	817	16.3
4	Состав 2	3.3	0.5	2.76	3.69	0.83	1600	1751	8.7
5	Состав 2	3.3	0.5	2.40	4.09	0.72	3462	2898	6.0
6	Состав 2	4	0.6	3.60	4.44	0.90	767	700	4.0
7	Состав 2	4	0.6	3.35	4.60	0.84	828	881	1.0
8	Состав 2	4	0.6	3.12	4.76	0.78	1097	1143	13.4
9	Состав 2	6	0.6	4.50	6.67	0.75	746	867	16.0
10	Состав 2	6	0.6	5.00	6.35	0.83	628	673	8.0

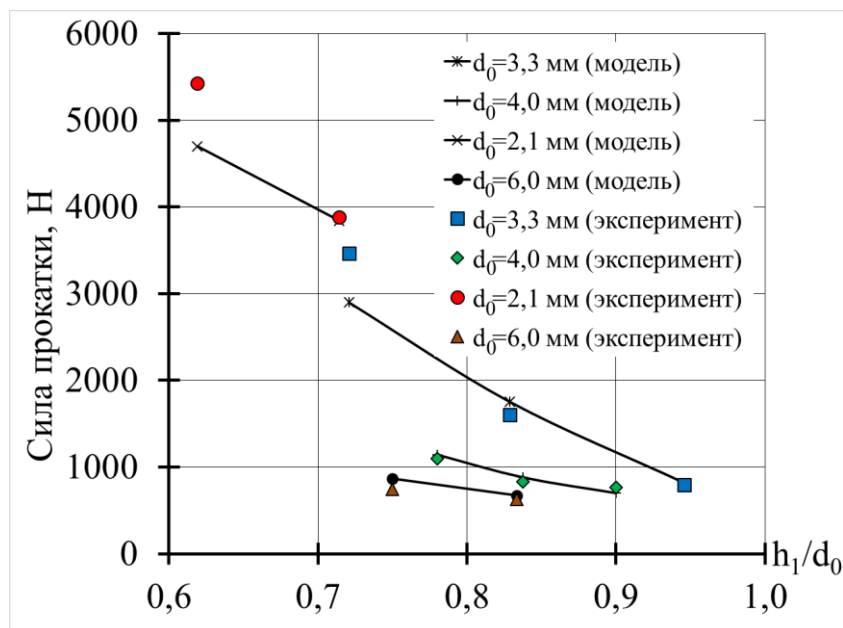


Рисунок 6.13 – Сравнение теоретических и экспериментальных значений силы прокатки при плющении порошковой проволоки

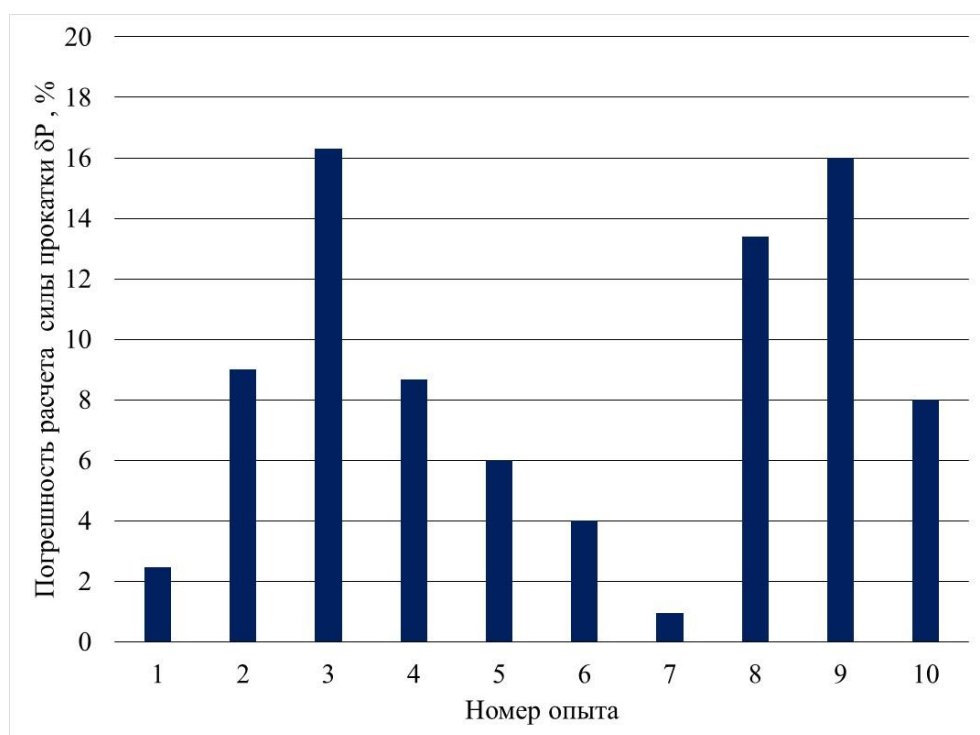


Рисунок 6.14 – Погрешность расчета значений силы прокатки при плющении порошковой проволоки

Погрешность модели по определению силы прокатки составила 1,0...16,3% со среднеквадратичным отклонением 5,39%, что подтверждает её адекватность.

Выводы

1 По результатам экспериментальных исследований процесса прокатки порошкового сердечника в металлической оболочке установлено, что значения сил прокатки, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований, совпадают, погрешность вычислений составила не более 10%. Также установлено, что при прокатке по предложенной технологии (за два прохода с последовательной засыпанием компонентов в металлическую оболочку), относительная плотность сердечника повышается при одинаковых режимах прокатки и при этом сохраняется размер фракции порошка, что является необходимым условием для данной технологии производства.

2 Экспериментальные исследования процесса волочения порошковой проволоки подтвердили достоверность разработанной математической модели, при этом погрешность расчета силы натяжения не превысила 7,8%, что удовлетворяет требованиям к практическим расчетам.

3 Экспериментальные исследования процесса плющения порошковой проволоки подтвердили достоверность разработанной математической модели, при этом погрешность по определению силы прокатки составила 1,0...16,3% со среднеквадратичным отклонением 5,39%, что удовлетворяет требованиям к практическим расчетам.

РАЗДЕЛ 7

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ И КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДЛИННОМЕРНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛОПОРОШКОВ В ОБОЛОЧКЕ

7.1 Автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки порошковой ленты

Для выбора рациональных технологических режимов прокатки порошковых материалов в металлической оболочке необходимо знание влияния исходных технологических режимов на основные показатели процесса.

Основными технологическими параметрами для процесса прокатки двухслойного порошкового материала являются опорные значения коэффициентов трения, исходная толщина композиции, соотношение исходных толщин её обеих составляющих, исходная плотность составляющих и конечная толщина композиции. Основными параметрами процесса в этом случае будут результирующие плотности составляющих композиции, соотношение их конечных толщин, характер распределения локальных характеристик (нормальных, нормальных контактных и касательных контактных напряжений) по длине очага деформации, значение силы и момента прокатки.

Исходя из вышесказанного путем реализации математических моделей, рассмотренных в разделе 4, были получены расчетные распределения локальных и интегральных характеристик процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в зависимости от различных исходных параметров (рис. 7.1...7.3).

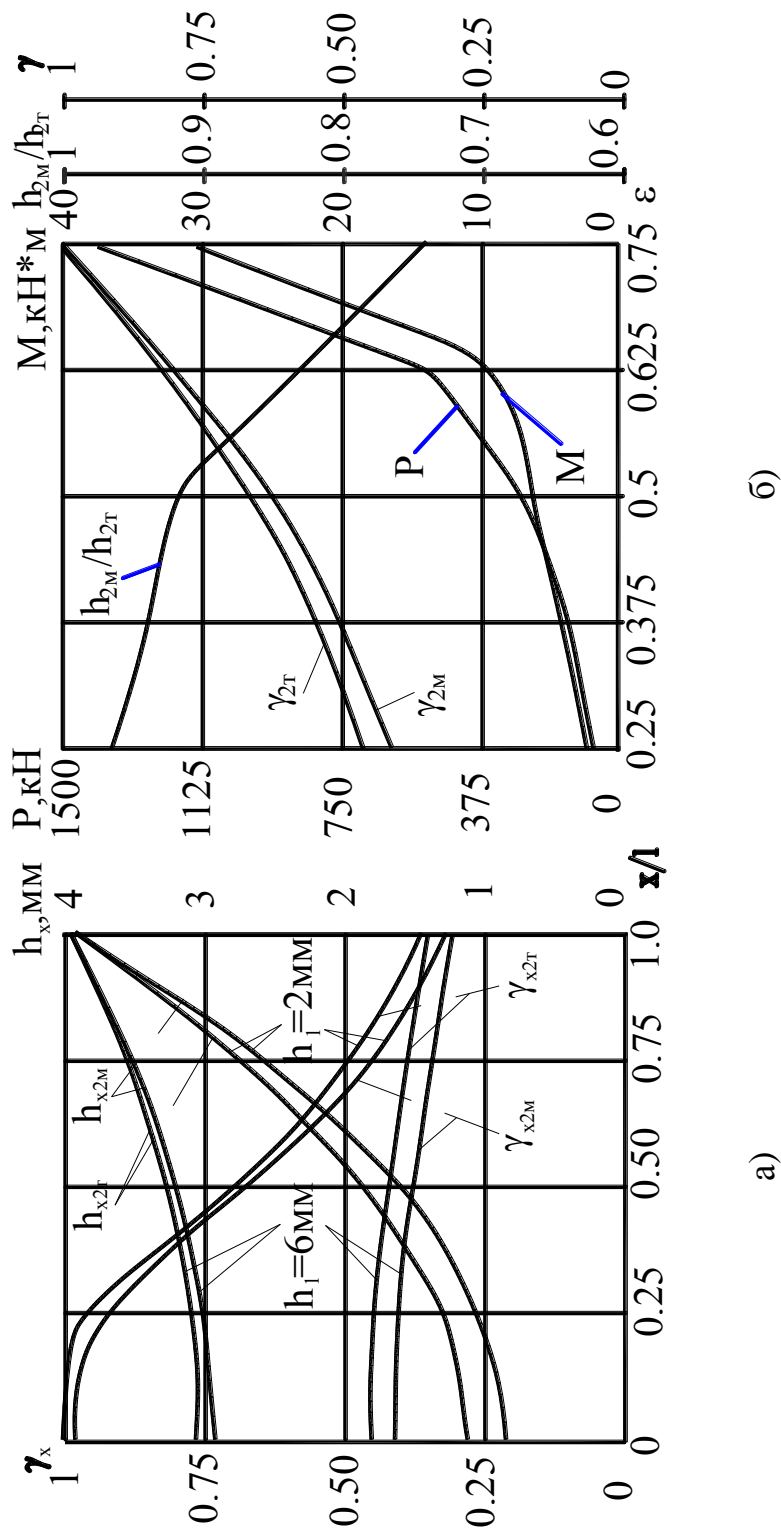
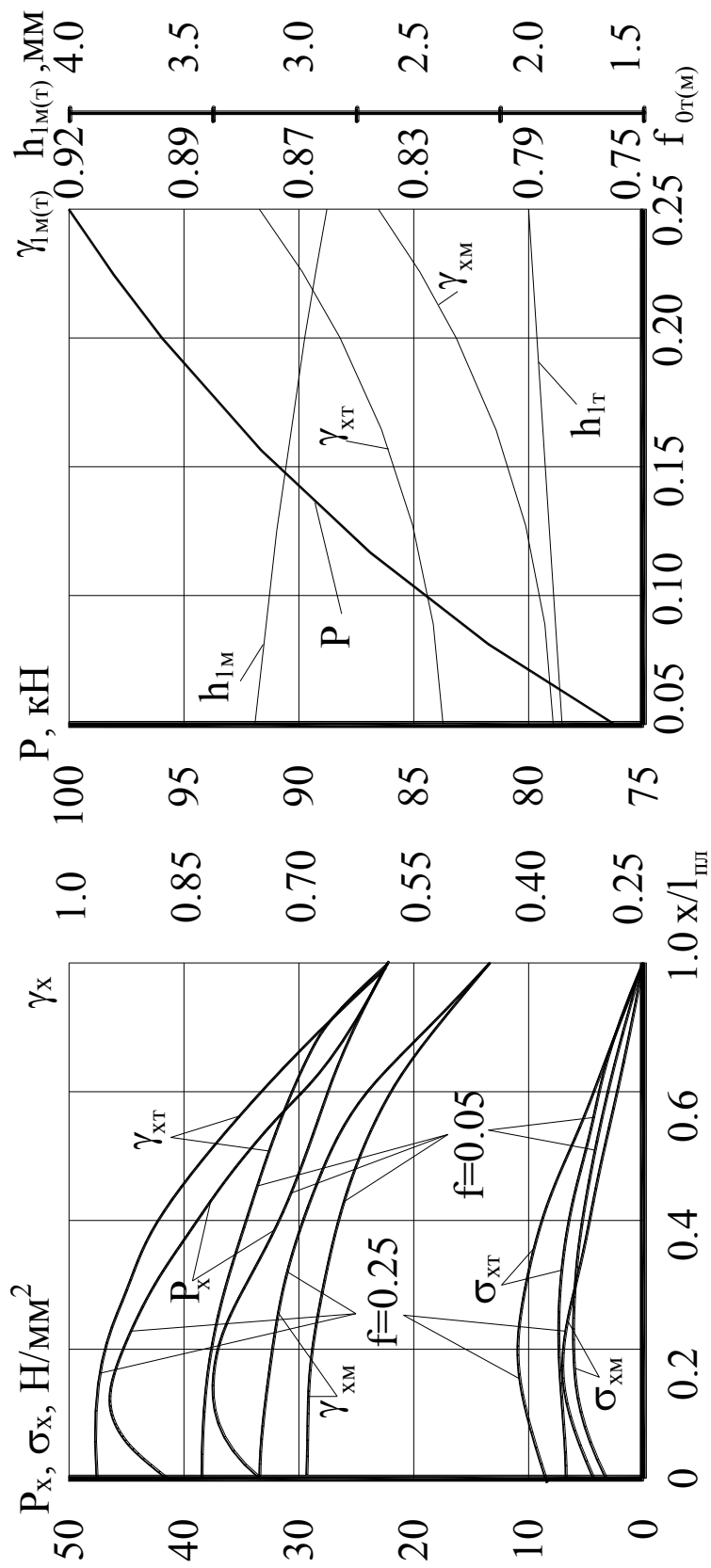


Рисунок 7.1 – Расчетные распределения локальных (а) и интегральных (б) характеристик процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в зависимости от величины обжатия



б)

а)

Рисунок 7.2 – Расчетные распределения локальных (а) и интегральных (б) характеристик процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в зависимости от значения коэффициентов внешнего трения

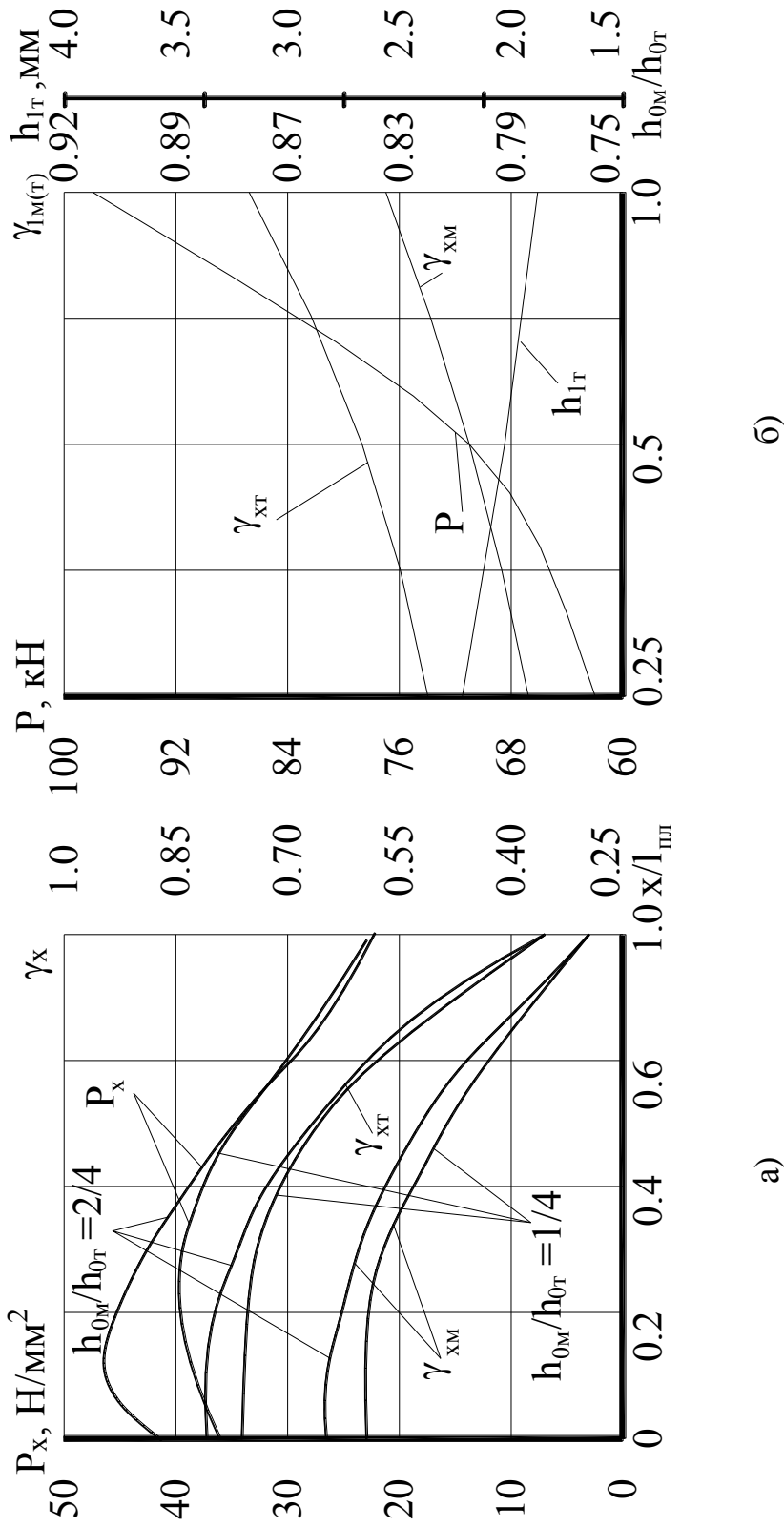


Рисунок 7.3 – Расчетные распределения локальных (а) и интегральных (б) характеристик процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в зависимости от величины соотношения толщин её составляющих

Интегральные характеристики процесса, а именно, расчетные распределения нормальных контактных напряжений, конечной относительной плотности проката и отношения конечных толщин слоев в зависимости от величины обжатия представлены на рисунке 7.1, б. Локальные же характеристики, то есть распределения текущих толщин и относительной плотности каждой композиции, представлены на рисунке 7.1, а. Из анализа представленных расчетных распределений видно, что с увеличением обжатия наблюдается интенсивный рост момента и силы прокатки, а также конечной относительной плотности, которая при обжатиях около 75% практически становится равной единице. При увеличении обжатия наблюдается уменьшение соотношений толщин слоев, причем более интенсивное обжатие наблюдается со стороны наиболее мягкой составляющей.

На рисунке 7.2 представлены расчетные распределения локальных (см. рис. 7.2, а) и интегральных (см. рис. 7.2, б) характеристик процесса в зависимости от значения коэффициента внешнего трения. При его увеличении наблюдается более интенсивная деформация со стороны предварительно уплотненного слоя (индекс m), а также рост нормальных, нормальных контактных напряжений, силы и суммарного момента прокатки.

На рисунке 7.3 представлены распределения локальных (см. рис. 7.3, а) и интегральных (см. рис. 7.3, б) характеристик процесса в зависимости от соотношения толщин уплотненного и насыпного слоев композиции. Из анализа представленных распределений видно, что при уменьшении соотношения толщин насыпного слоя к уплотненному наблюдается перераспределение локальных характеристик по длине очага деформации (см. рис. 7.3, а), что в частности приводит к снижению максимума нормальных контактных напряжений и плотности как насыпного, так и уплотненного слоев. Помимо этого при увеличении отношения толщины насыпного слоя к толщине уплотненного до 0,4 наблюдается резкий рост силы прокатки (см. рис. 7.3, б). При увеличении данного соотношения конечная толщина уплотненного слоя уменьшается, причем практически линейно. Увеличение соотношения также приводит к монотонно возрастающему увеличению плотности составляющих.

Представленные зависимости основных параметров позволяют выбрать оптимальные исходные технологические режимы процесса прокатки двухслойной порошковой ленты в металлической оболочке.

Для выбора рациональных технологических режимов прокатки помимо всего прочего требуется решение задач оптимизационного характера. Применительно к прокатке композиций на основе порошковых материалов конечной целью процесса будет являться получение проката с заданной плотностью порошковых составляющих и обеспечение требуемых толщин, как всей композиции, так и её компонентов [280...282].

В соответствии вышеизложенным, для определения необходимых показателей качества готовой металлопродукции было выполнено автоматизированное проектирование технологических параметров прокатки порошковой ленты в металлической оболочке. В качестве критериев проектирования при этом были выбраны необходимые значения $[h_{1T}]$, $[h_{1M}]$, $[\gamma_{1M}]$. В качестве параметров проектирования – h_0 , h_{0M}/h_{0T} . В качестве целевых функций – рассмотренные ранее численные математические модели (раздел 4). Собственно решение включало внутренний цикл на основе итерационной процедуры по определению h_{0M} и h_{0T} , обеспечивающих требуемые результирующие значения h_{1T}/h_{1M} [283]:

$$(h_{0M}/h_{0m})_{(k+1)} = (h_{0M}/h_{0m})_k + A_{h_{0M}/h_{0m}} \operatorname{sign}\{[h_{0M}/h_{0m}] - h_{0M}/h_{0m}\}_k,$$

$$\text{где } \operatorname{sign}\{[h_{0M}/h_{0m}] - h_{0M}/h_{0m}\}_k = \begin{cases} +1 \text{ при } ([h_{0M}/h_{0m}] - h_{0M}/h_{0m}) > 0; \\ 0 \text{ при } ([h_{0M}/h_{0m}] - h_{0M}/h_{0m}) \approx 0; \\ -1 \text{ при } ([h_{0M}/h_{0m}] - h_{0M}/h_{0m}) < 0, \end{cases} \quad (7.1)$$

а также внешний цикл, основанный на итерационном определении h_0 , обеспечивающий требуемое значение γ_{1M} :

$$h_{0(t+1)} = h_{0t} + A_{h_0} \text{sign} \{ [\gamma_{1M}] - \gamma_{1t} \}_t, \quad (7.2)$$

$$\text{где } \text{sign} \{ [\gamma_{1M}] - \gamma_{1t} \}_t = \begin{cases} +1 \text{ при } ([\gamma_{1M}] - \gamma_{1t}) > 0; \\ 0 \text{ при } ([\gamma_{1M}] - \gamma_{1t}) = 0; \\ -1 \text{ при } ([\gamma_{1M}] - \gamma_{1t}) < 0. \end{cases}$$

При определении оптимальных исходных параметров был использован метод целенаправленного перебора. В качестве примера на рисунке 7.4 представлены расчетные зависимости, позволяющие определять необходимые значения исходных толщин композиции при заданных относительной плотности порошка и соотношения результирующих толщин слоев композиции.

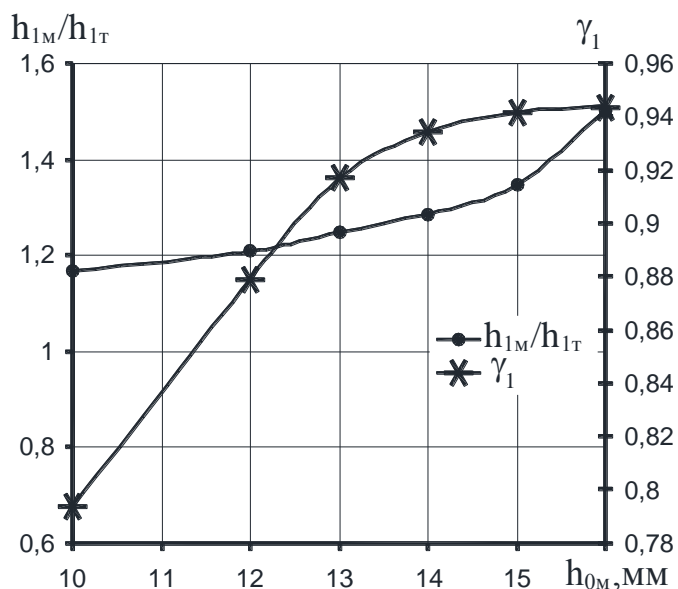


Рисунок 7.4 – Расчетные зависимости соотношения конечных толщин составляющих композиции и конечной относительной плотности порошковой составляющей от исходной толщины порошкового слоя

По предложенной технологии прокатка порошковых материалов осуществляется в три этапа: первичная прокатка однослойной, вторичная – двухслойной порошковой ленты и калибрующая – в закрытой металлической оболочке. Такая технологическая схема позволяет снизить энергосиловые пара-

метры процесса при одновременном обеспечении требуемой равномерной по сечению плотности порошка, что позволяет повысить качество и эксплуатационные характеристики продукции.

При этом следует отметить, что на качество продукции существенно будут влиять силы прокатки в первом и втором проходах, так как при их неравенстве возникают различные упругие деформации валковых узлов, что приводит к неравномерности распределения давления в проходах и появлению нежелательных краевых эффектов у боковых кромок листа. С другой стороны, обеспечение этого равенства сил в первом и во втором проходах требует решения задач оптимизационного плана.

Данная задача была решена при условии, что межвалковый зазор при втором проходе фиксирован, и перераспределение сил прокатки может быть достигнуто изменением величины межвалкового зазора в первом проходе. Таким образом путем оптимизации находится значение величины межвалкового зазора после первого прохода, при котором выполняется условие $P_I = P_{II}$. Помимо обеспечения равенства сил прокатки проблема также заключается в обеспечении заданной плотности порошковой составляющей. Решение этой задачи может быть осуществлено путем поиска необходимого значения исходной толщины порошкового слоя.

В соответствии с вышеизложенным автоматизированное проектирование может быть сведено к решению двухпараметрической задачи, в которой в качестве параметров оптимизации служит исходная толщина одной из составляющих композиции и её толщина после первичной прокатки. В качестве критериев оптимизации – конечная толщина и плотность порошкового сердечника.

Схема решения в данном случае состоит из двух циклов:

- внутренний цикл по определению толщины композиции после первого прохода:

$$h_{1I(t+1)} = h_{1It} + A_h \text{sign}\{P_I - P_{II}\}; \quad (7.3)$$

– внешний цикл по определению исходной толщины одной из составляющих композиции:

$$h_{0,m(m)(k+1)} = h_{0,m(m)k} + A_{h0} \operatorname{sign}\{\gamma_{1m(m)} - [\gamma_{1m(m)}]\}, \quad (7.4)$$

где t, k – номер итерационной процедуры;

h_{1I} – толщина композиции после первого прохода;

A_h, A_{h0} – шаги приращения.

В качестве целевой функции при автоматизированном проектировании были использованы разработанные ранее математические модели прокатки порошковой ленты в металлической оболочке (раздел 4).

Практически разработанная оптимизационная модель может быть использована при проектировании рабочих клеток специализированных прокатных станов и при выборе технологических режимов.

В качестве примера её численной реализации на рисунке 7.5 представлены расчетные распределения исходных технологических параметров прокатки в зависимости от требуемых результирующих значений толщины композиции h_1 и плотности порошкового слоя $[\gamma_{1m}]$.

Заключительным технологическим этапом производства порошковой ленты является калибрующая прокатка порошкового сердечника в металлической оболочке закрытого типа. Конечной целью данного процесса является обеспечение заданной плотности порошкового сердечника и обеспечение требуемой толщины как сердечника, так и оболочки. Для определения указанных показателей качества порошковой ленты было выполнено автоматизированное проектирование технологических параметров прокатки. В качестве критериев проектирования при этом были выбраны необходимые значения $[h_1]$, $[\gamma_1]$. В качестве параметров проектирования – $h_{0\Sigma}$. В качестве целевых функций – полученные ранее регрессионные описания.

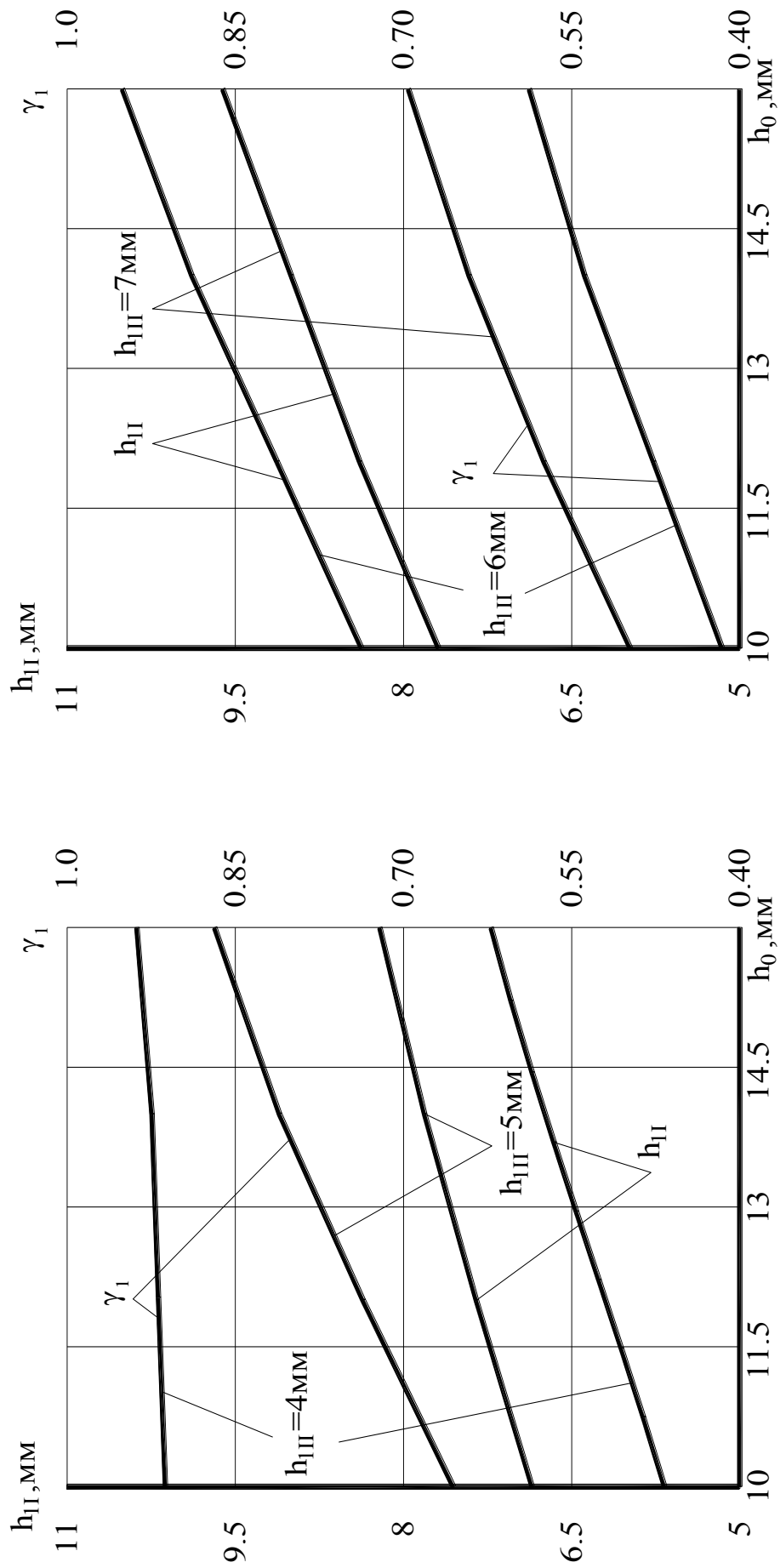


Рисунок 7.5 – Расчетные зависимости результирующей толщины композиции после первичной прокатки и конечной относительной плотности порошковой составляющей от исходной и конечной толщины композиции до и после прокатки

Собственно решение включало внутренний цикл на основе итерационной процедуры по определению h_0 , обеспечивающего требуемые результирующие значения h_1 [284; 285]:

$$h_{0\Sigma(k+1)} = h_{0\Sigma k} + A_{h_0} \text{sign}\{[h_1] - h_1\}_k, \quad (7.5)$$

а также внешний цикл, основанный на итерационном определении h_0 , обеспечивающий требуемое значение γ_1 :

$$h_{0(t+1)} = h_{0t} + A_{h_0} \text{sign}\{[\gamma_1] - \gamma_1\}_t. \quad (7.6)$$

При определении оптимальных исходных параметров был использован метод целенаправленного перебора. Расчетная схема для автоматизированного проектирования технологических режимов представлена на рисунке 7.6.

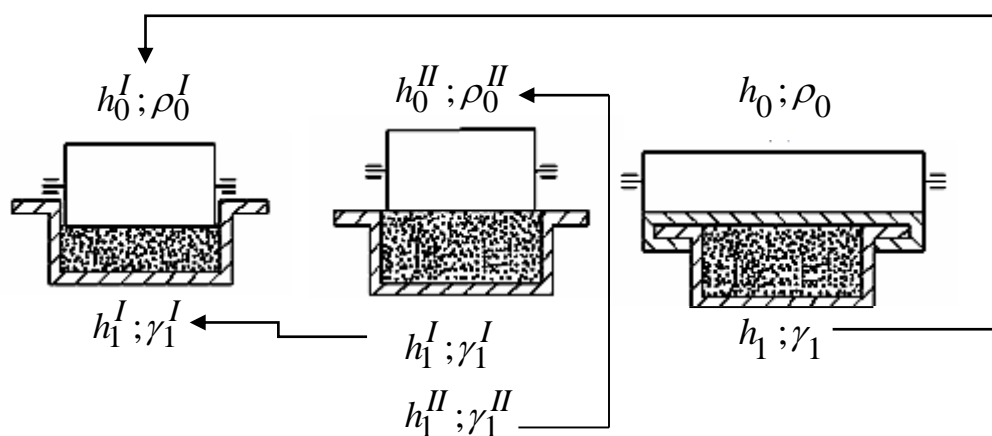


Рисунок 7.6 – Расчетная схема по автоматизированному проектированию технологических режимов процессов прокатки порошковой ленты в металлической оболочке

В качестве примера на рис. 7.7 и 7.8 представлены расчетные зависимости, позволяющие определять необходимую исходную толщину порошкового сердечника при заданных конечной относительной плотности порошка, результиру-

ющих толщин порошковой ленты и исходной толщины материала оболочки. Такие же зависимости можно получить для различных материалов оболочки и порошкового сердечника, а также для различных исходных значений плотности порошка.

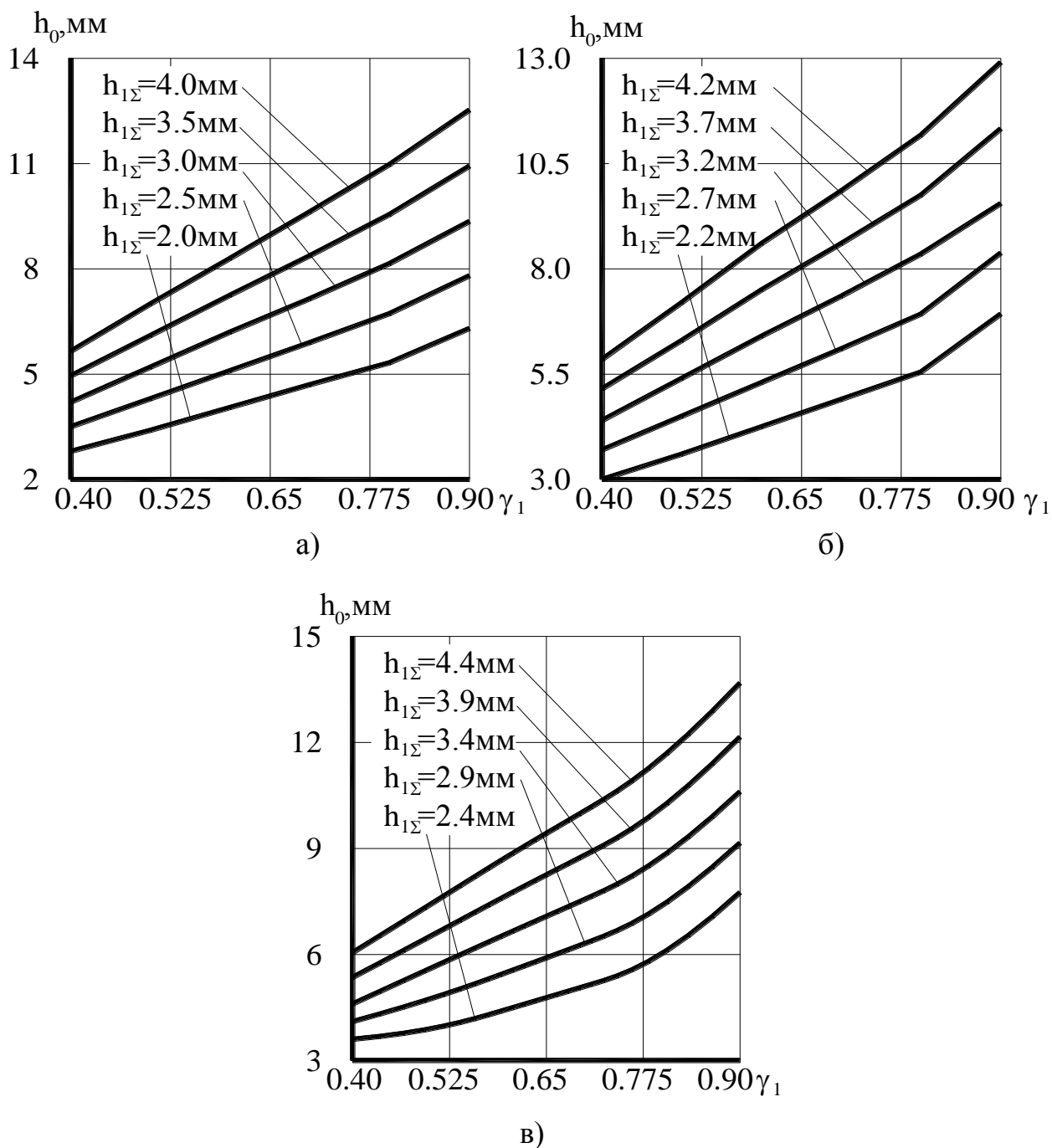


Рисунок 7.7 – Результаты автоматизированного проектирования технологических режимов процесса прокатки порошковой ленты в оболочке толщиной 0,1 мм (а), 0,2 мм (б) и 0,3 мм (в)

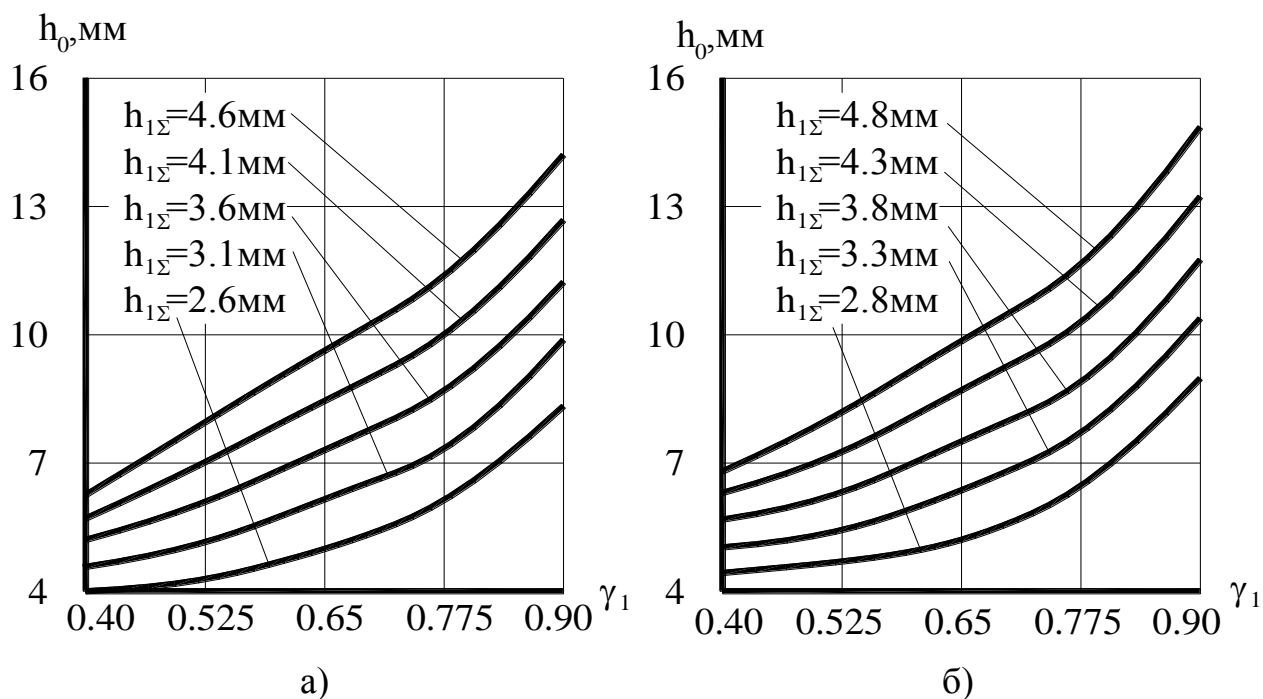


Рисунок 7.8 – Результаты автоматизированного проектирования технологических режимов процесса прокатки порошковой ленты в оболочке толщиной 0,4 мм (а) и 0,5 мм (б)

С практической точки зрения результаты автоматизированного проектирования технологических режимов прокатки позволяют без использования разработанного математического аппарата определить все исходные параметры процесса для получения заданного типоразмера порошковой ленты.

7.2 Автоматизированное проектирование технологических режимов волочения порошковой проволоки

При производстве порошковой проволоки влияние ряда факторов на протекание практически невозможно учесть при расчётах, а именно несовпадение осей заготовки и волокна на входе или выходе из очага деформации, неоднородность материала сердечника и оболочки по длине заготовки, поверхностные и внутренние дефекты заготовки, влияние окружающей среды на

физико-механические свойства порошка, износ волочильного оборудования и т.п.

Все эти факторы заметно изменяют силы и натяжения при волочении и отклоняют их от расчетных. Поэтому для нормального течения процесса необходимо, чтобы металл после выхода из волоки имел некоторый запас прочности, т.е. чтобы напряжение волочения не превышало некоторой доли сопротивления растяжению.

Одним из основных технологических показателей, характеризующих качественное протекание процесса волочения, является коэффициент запаса прочности K_3 , который определяется как:

$$K_3 = \sigma_{s1} / \sigma_{x2oi} |_{i=K_R}, \quad (7.7)$$

где σ_{s1} – предел текучести материала оболочки в сечении на выходе из очага деформации;

$\sigma_{x2oi} |_{i=K_R}$ – текущее значение нормальных напряжений в материале оболочки на выходе из очага деформации.

При малых коэффициентах запаса в протягиваемом металле наблюдаются местные утонения (перетяжки), а иногда внутренние и даже полные разрывы, большие коэффициенты запаса связаны с высокой дробностью деформации (большое число переходов) от которой снижается производительность и увеличивается расход энергии. Следовательно, лучше вести процесс при оптимальных условиях, т. е. с минимальным числом переходов, при которых обеспечиваются надежные коэффициенты запаса.

Изучение действующих процессов волочения показало, что при хорошо выполненных захватах (отсутствие надрывов и больших местных утонений металла), а также при плавном достижении рабочих скоростей волочения процесс идет надежно, если средние значения коэффициента запаса K_3 не ниже

1,2, при этом больший коэффициент запаса прочности соответствует заготовкам меньшего поперечного сечения.

Автоматизированное проектирование процесса волочения по требуемому коэффициенту запаса позволяет, с одной стороны, обеспечить требуемую степень надежности протекания технологического процесса и, с другой стороны, добиться максимально возможной загрузки оборудования, т.е. сократить время технологического передела и тем самым снизить себестоимость выпускаемой металлопродукции [286].

Помимо этого, методика автоматизированного проектирования технологических режимов учитывает необходимое значение относительной плотности порошкового сердечника, что было выражено следующим равенством [287...289]:

$$\gamma_{x2i}|_{i=K_R} = [\gamma_1]. \quad (7.8)$$

где $[\gamma]$ – требуемое значение относительной плотности сердечника.

Таким образом, при решении рассматриваемой задачи достигается вариант технологических режимов процесса волочения порошковой проволоки, удовлетворяющий обоим условиям (7.7) и (7.8). В основу указанного решения задачи автоматизированного проектирования технологических режимов был положен численный метод целенаправленного перебора вариантов. Аналитическое описание используемого метода может быть выражено следующей зависимостью при заранее заданном минимальном значении исходного диаметра заготовки [287]:

$$d_{0(k+1)} = d_{0k} + A, \quad (7.9)$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры расчета;

A – задаваемый шаг изменения диаметра заготовки;

[x], x_k – предварительно заданное и расчетное значение параметра, обусловленные системой принятых ограничений выраженных условиями (7.7) и (7.8).

На рисунке 7.9 представлены результаты автоматизированного проектирования волочения медной порошковой проволоки в медной оболочке из условия обеспечения требуемого конечного диаметра проволоки и плотности порошкового сердечника. Представленные распределения доказывают, что разработанные программные средства могут быть использованы при выборе диаметра заготовки в зависимости от требуемых параметров готовой проволоки.

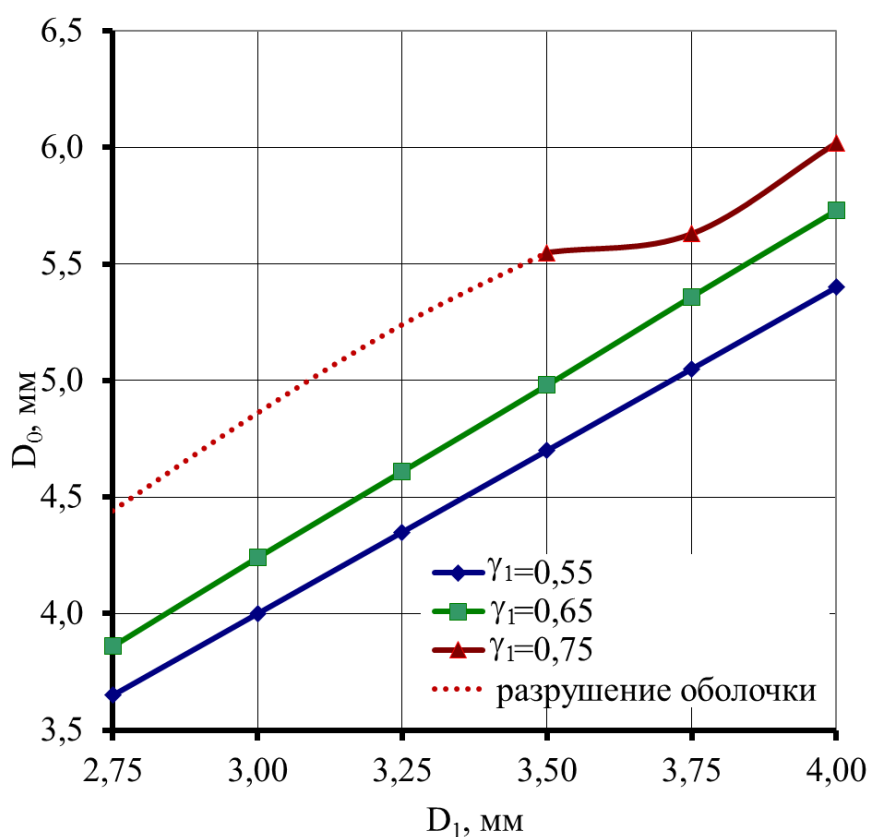


Рисунок 7.9 – Результаты автоматизированного проектирования волочения порошковой проволоки

Данные результаты рационально использовать при обжатии проволоки до требуемого диаметра за один проход. В случае обжатия за несколько проходов, целесообразно использовать величину обжатия за проход, найденную

оптимизацию по критерию обеспечения заданного коэффициента запаса прочности, а величину исходного диаметра заготовки из условия обеспечения требуемой плотности порошкового сердечника. Пример реализации такой схемы оптимизации представлен в табл. 7.1. В данном случае рассчитана технология производства проволоки с оболочкой из меди марки М1 и медного сердечника диаметром $D_0=3,0$ мм и относительной плотностью порошкового сердечника $\gamma_1=0,75$ при исходной $\gamma_0=0,25$.

Таблица 7.1

Результаты автоматизированного проектирования волочения
порошковой проволоки

Номер прохода	D_0 , мм	d_0 , мм	D_1 , мм	d_1 , мм	ε	γ_1	K_3	T_1 , Н
1	4,5	4	3,86	3,36	0,151	0,373	3,0	284,1
2	3,86	3,36	3,5	3	0,101	0,492	3,0	270
3	3,5	3	3,23	2,73	0,082	0,621	3,0	256,8
4	3,23	2,73	3,0	2,5	0,07	0,750	3,0	244,1

7.3 Автоматизированное проектирование процессов изготовления порошковой плющенной ленты в металлической оболочке

Разработанные математические модели процессов волочения и плющения порошковой проволоки позволяют решать ряд задач оптимизационного плана, а именно: определять режимы обжатий по проходам, определять исходный диаметр проволоки и исходную плотность сердечника в зависимости от требуемых показателей готовых электродов.

Были разработаны программные средства для автоматизированного расчета и проектирования технологии изготовления порошковой плющенной ленты в металлической оболочке. Укрупненная блок-схема алгоритма представлена на рисунке 7.10.

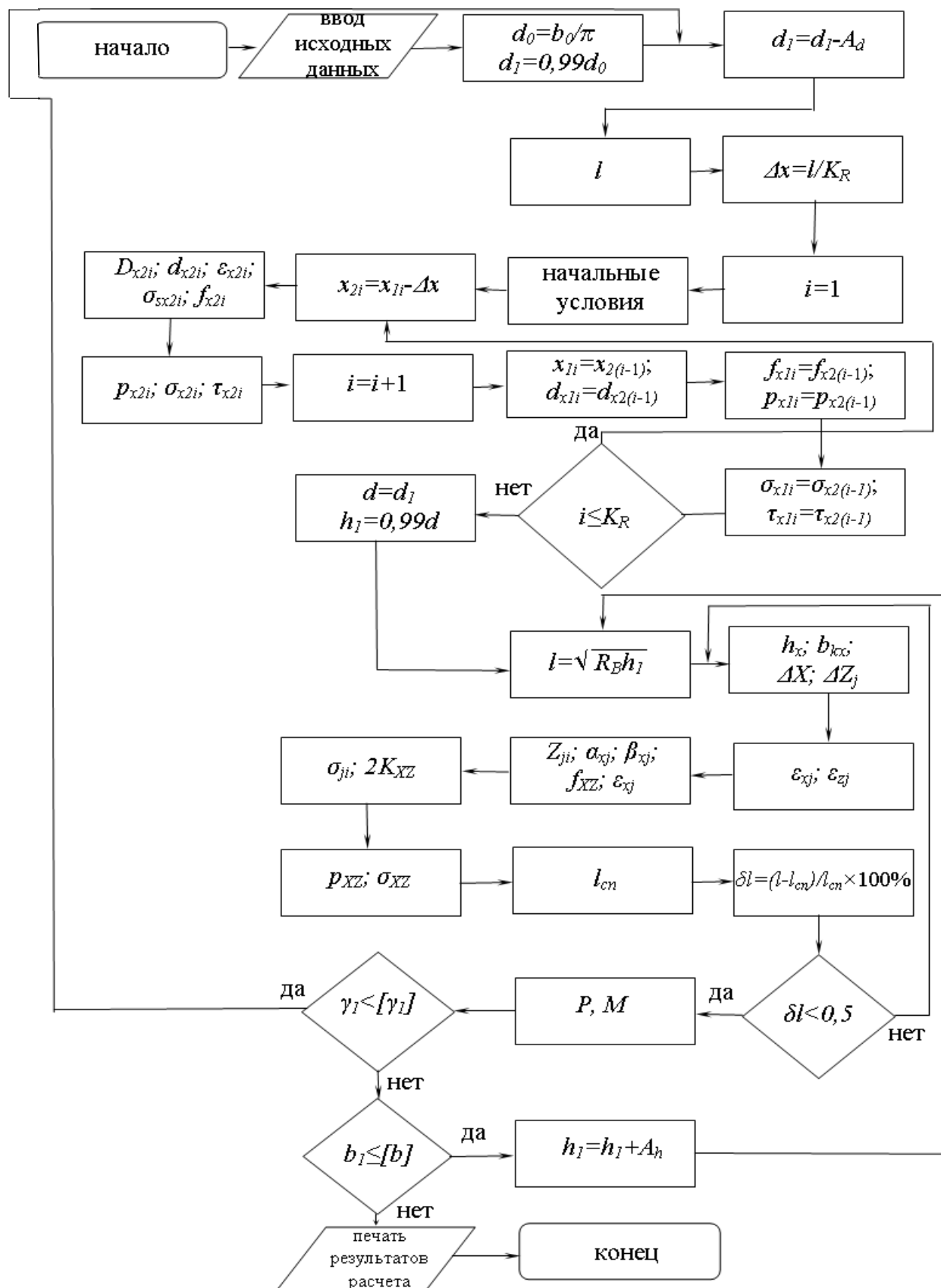


Рисунок 7.10 – Укрупненная блок-схема алгоритма автоматизированного расчета изготовления порошковой плющенко

Для определения указанных показателей качества готовой металлопродукции было выполнено автоматизированное проектирование технологических параметров волочения и плющения. В качестве критериев проектирования при этом были выбраны необходимые значения $[h_1]$, $[b_1]$, $[\gamma_1]$. В качестве параметров проектирования – диаметр исходной порошковой проволоки с неуплотненным сердечником d_0 и диаметр порошковой проволоки после волочения d_1 . В качестве целевой функции – разработанные математические модели. Собственно решение включало два цикла, основанных на итерационном определении d_0 и d_1 [290].

Первый, внутренний, цикл обеспечивает получение требуемой ширины плющенной порошковой ленты:

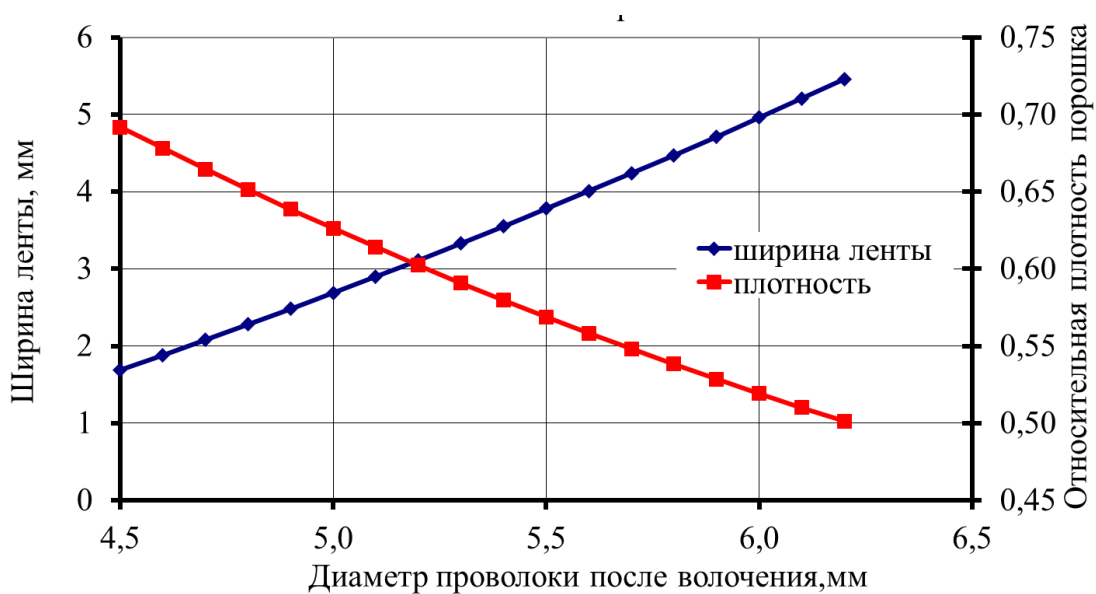
$$d_{1(t+1)} = d_{1t} + A_{d_1} \text{sign} \{ [b_1] - b_{1t} \} . \quad (7.10)$$

Второй, внешний, цикл обеспечивает получение требуемой плотности плющенной порошковой ленты:

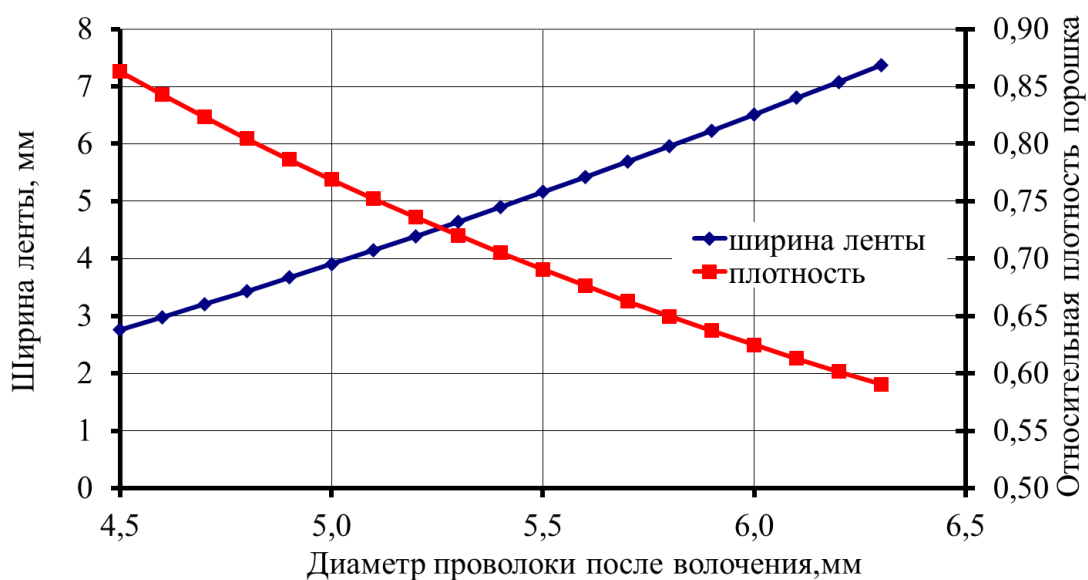
$$d_{0(t+1)} = d_{0t} + A_{d_0} \text{sign} \{ [\gamma_1] - \gamma_{1t} \} . \quad (7.11)$$

При определении оптимальных исходных параметров был использован метод целенаправленного перебора.

В качестве примера на рисунке 7.11 представлены расчетные распределения, позволяющие определять необходимый диаметр порошковой проволоки после волочения в зависимости от конечной относительной плотности сердечника и ширины плющенки при фиксированных значениях ширины стальной ленты из которой формируется порошковая проволока и толщины готовой плющенки.

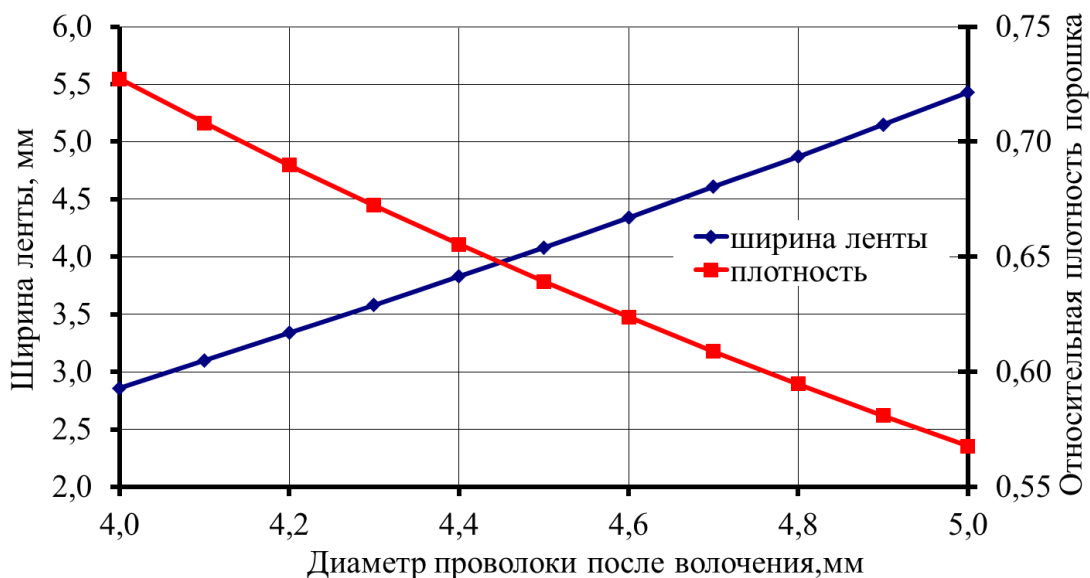


а)

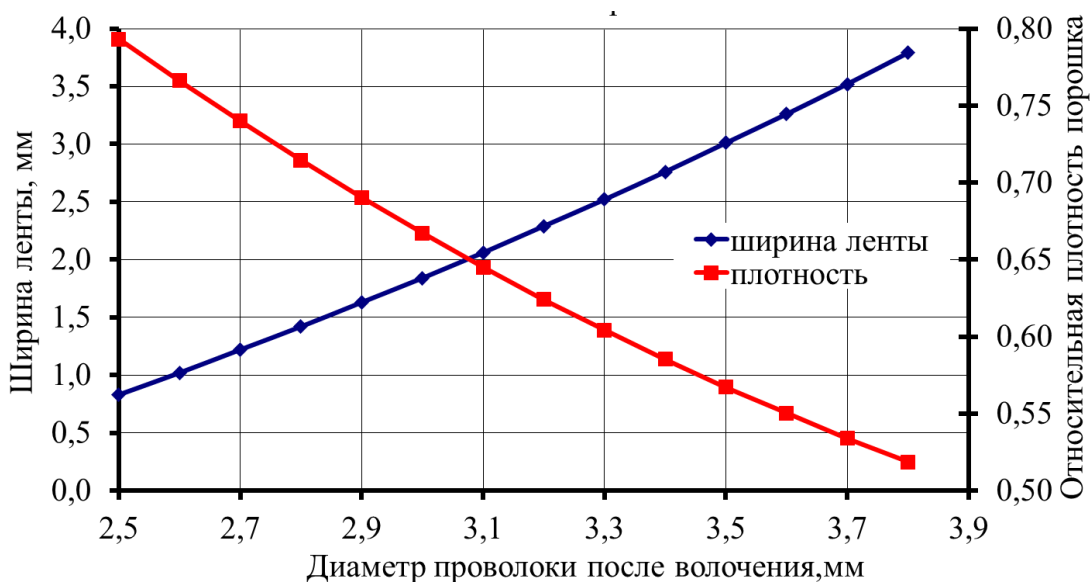


б)

Рисунок 7.11 – Результаты автоматизированного проектирования процессов изготовления порошковой плющеной ленты толщиной 3,5 мм (а), 3,0 мм (б), 2,5 мм(в) и 2,0 мм (г) из исходной перед волочением стальной оболочки шириной 20 мм (а, б), 15 мм (в) и 12 мм (г)



в)



г)

Продолжение рис. 7.11

На рисунке 7.12 представлены аналогичные распределения, только при фиксированном значении ширины плющенки и определяемом значении ее толщины. С практической точки зрения результаты автоматизированного проектирования технологических режимов волочения и плющения позволяют без использования разработанного математического аппарата определить все исходные параметры процесса для получения заданного типоразмера порошковой плющенной ленты в металлической оболочке.

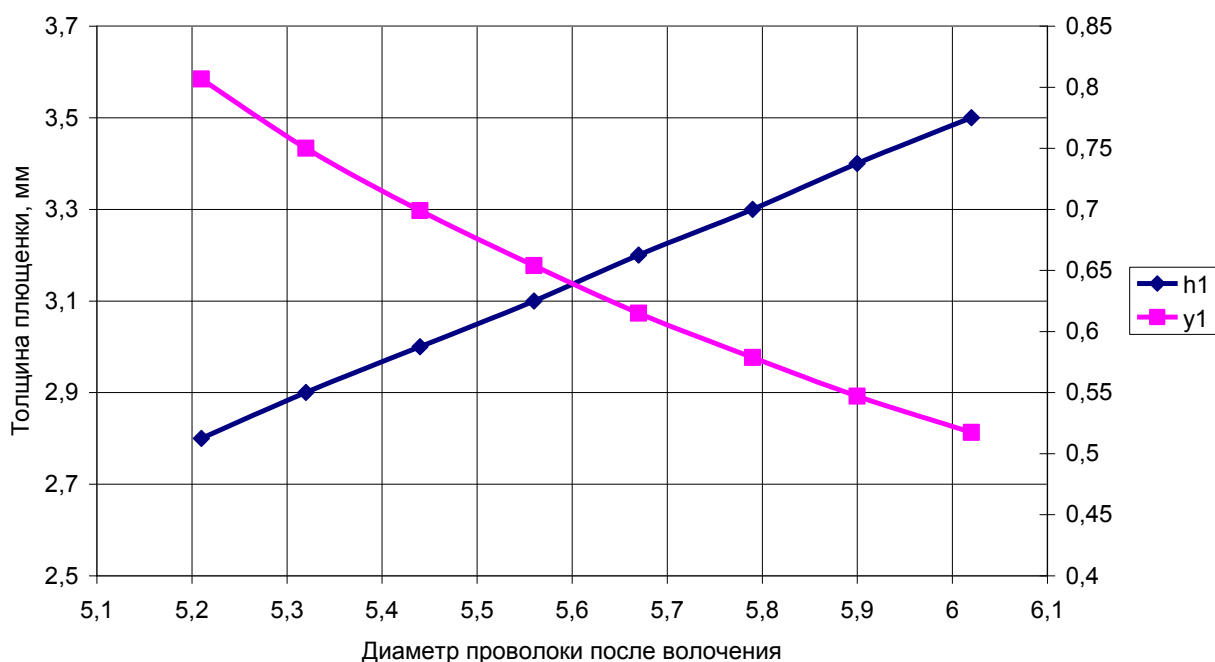


Рисунок 7.12 – Результаты автоматизированного проектирования процессов изготовления порошковой плющеной ленты толщиной 5 мм

7.4 Прогнозирование отсутствия проколов оболочки при использовании различных частиц порошкового сердечника

Вероятность нарушения целостности оболочки при совместной деформации составляющих порошковой ленты при прокатке в двухвалковой клети прогнозировали на основе анализа внедрения твердой частицы сердечника, представленной в виде правильного многогранника (например, клина), в горизонтальную плоскость пластичного материала оболочки. В качестве энергосиловых параметров использовали силу внедрения частицы в оболочку в нейтральном сечении или в области чистого уплотнения сердечника. При этом максимальное значение силы внедрения частицы в оболочку возможно при действии максимальных нормальных контактных напряжений в очаге деформации [291; 292].

Построение поля характеристик может быть осуществлено путем численного определения геометрических координат всей совокупности особых точек по отношению к осям Z и Y , имеющим свое начало на острие клина (рис. 7.13).

Выразим глубину внедрения твердой частицы сердечника в оболочку через H и рассмотрим только правую половину клина.

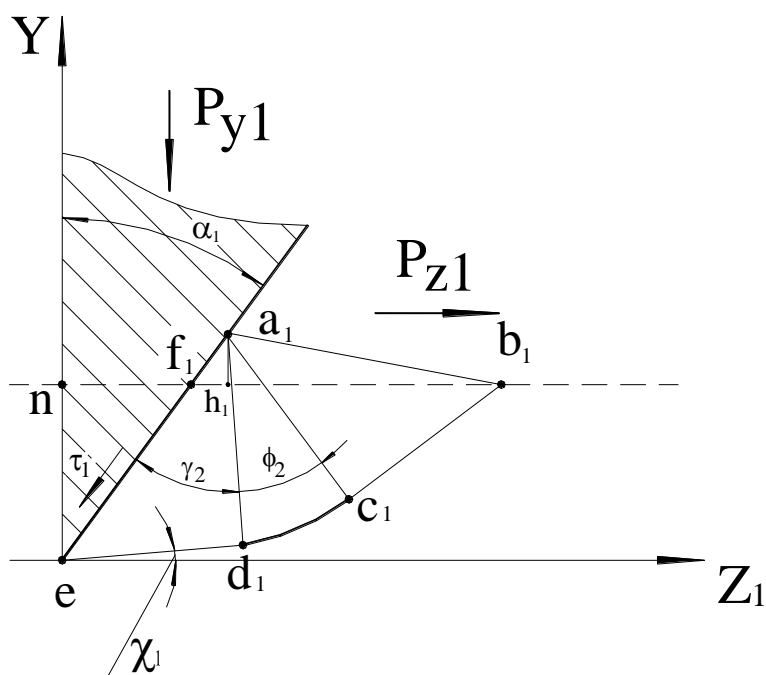


Рисунок 7.13 – Расчетная схема к определению глубины внедрения частиц порошкового сердечника в металлическую оболочку

Геометрические координаты точки f_1 , могут быть определены как:

$$Z_{f_1} = H \cdot \operatorname{tg} \alpha_1; Y_{f_1} = H; F_{\Delta e f_1} = H \cdot \frac{Z_{f_1}}{2}, \quad (7.12)$$

где α_1 – угол наклона правой боковой поверхности клина.

Задавшись первоначально заведомо малой протяженностью отрезка $L_{f_1 a_1}$, определим геометрические координаты особой точки a_1 :

$$Z_{a_1} = Z_{f_1} + L_{f_1 a_1} \cdot \sin \alpha_1; Y_{a_1} = Y_{f_1} + L_{f_1 a_1} \cdot \cos \alpha_1. \quad (7.13)$$

Приняв поверхность выдавленного (дефектного участка) металла оболочки a_1b_1 прямолинейной, и учитывая, что угловая характеристика $\angle b_1f_1a_1$ равна $\pi/2 - \alpha_1$ определим высоту треугольника $\Delta b_1f_1a_1$:

$$L_{h_1a_1} = L_{f_1a_1} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} - \alpha_1\right), \quad (7.14)$$

откуда из условия равенства площадей треугольников $\Delta b_1f_1a_1$ и Δenf_1 протяженность отрезка b_1f_1 , а вместе с ней и геометрические координаты особой точки b_1 могут быть определены как:

$$L_{f_1b_1} = \frac{2 \cdot F_{\Delta enf_1}}{L_{h_1a_1}}; \quad Z_{b_1} = Z_{f_1} + L_{f_1b_1}; \quad Y_{b_1} = Y_{f_1}. \quad (7.15)$$

Учитывая свойства линий скольжения [273], угловые характеристики треугольника $\Delta b_1c_1a_1$ равны $\angle b_1c_1a_1 = \pi/2$; $\angle c_1a_1b_1 = \angle a_1b_1c_1 = \pi/4$, а протяженность гипотенузы a_1b_1 равна:

$$L_{a_1b_1} = \sqrt{(Z_{b_1} - Z_{a_1})^2 + (Y_{a_1} - Y_{b_1})^2}. \quad (7.16)$$

Количественные оценки катетов c_1a_1 , c_1b_1 могут быть представлены:

$$L_{c_1a_1} = L_{c_1b_1} = L_{a_1b_1} / \sqrt{2}. \quad (7.17)$$

Принимая во внимание, что угол подхода гипотенузы a_1b_1 к горизонтали равен $\arctg\left[\frac{(Y_{a_1} - Y_{b_1})}{(Z_{b_1} - Z_{a_1})}\right]$, геометрические координаты особой точки c_1 составят:

$$Z_{c_1} = Z_{b_1} - L_{c_1 b_1} \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{4} - \arctg \left[(Y_{a_1} - Y_{b_1}) / (Z_{b_1} - Z_{a_1}) \right] \right\},$$

$$Y_{c_1} = Y_{b_1} - L_{c_1 b_1} \cdot \sin \left\{ \frac{\pi}{4} - \arctg \left[(Y_{a_1} - Y_{b_1}) / (Z_{b_1} - Z_{a_1}) \right] \right\}. \quad (7.18)$$

Поле характеристик в физической плоскости при внедрении жесткой частицы сердечника представляет собой решение четвертой краевой задачи статически определимого плоского течения металла [273], характеризуемой наличием особой точки a_1 , в которой линии характеристик $c_1 a_1$ и $d_1 a_1$ образуют центрированный веер с углом φ_1 , количественная оценка которого подлежит определению.

Учитывая, что $L_{d_1 a_1} = L_{c_1 a_1}$, а угол наклона характеристики $d_1 a_1$ по отношению к вертикали равен $(\gamma_1 - \alpha_1)$, где $\gamma_1 = 0,5 \arccos(\tau_1 / K_C)$ – угол подхода характеристики $d_1 a_1$ к контактной поверхности клина, определяемый условиями внешнего трения, т.е. соотношением касательных контактных напряжений τ_1 и сопротивлением деформируемого металла сдвигу K_C , геометрические координаты особой точки d_1 составят:

$$Z_{d_1} = Z_{a_1} + L_{d_1 a_1} \sin(\gamma_1 - \alpha_1); \quad Y_{d_1} = Y_{a_1} - L_{d_1 a_1} \cos(\gamma_1 - \alpha_1). \quad (7.19)$$

И, наконец, выразив из прямоугольного треугольника $\Delta d_1 a_1 e$ $L_{ed_1} = L_{d_1 a_1} \cdot \operatorname{tg} \gamma_1$ и определив угол подхода данного отрезка к горизонтали $\chi_1 = \pi/2 - \alpha_1 - (\pi/2 - \gamma_1) = \gamma_1 - \alpha_1$, расчетные значения геометрических координат особой точки e , т.е. расчетные значения $Z_{e \text{ расч}}$ и $Y_{e \text{ расч}}$ при данном значении протяженности отрезка $f_1 a_1$, могут быть представлены:

$$Z_{e \text{ расч}} = X_{d_1} - L_{ed_1} \cdot \cos(\gamma_1 - \alpha_1); \quad Y_{e \text{ расч}} = Y_{d_1} - L_{ed_1} \cdot \sin(\gamma_1 - \alpha_1), \quad (7.20)$$

где расчетные значения $Z_{e\text{ расч}}$ и $Y_{e\text{ расч}}$, согласно принятой расчетной схеме (см. рис. 7.13), должны соответствовать началу координат, т.е. должны быть равны нулю. Выполнение данного условия может быть обеспечено на основе организации дополнительной итерационной процедуры определения требуемой протяженности отрезка f_1a_1 с использованием, например, метода целенаправленного перебора вариантов:

$$L_{f_1a_1}(k+1) = L_{f_1a_1}(k) - A_L \cdot \text{sign } Y_{e\text{ расч}}(k), \quad (7.21)$$

где k – порядковый номер очередного цикла итерационной процедуры решения;

A_L – шаг изменения протяженности отрезка f_1a_1 ;

$\text{sign } Y_e$ – функция знака, соответствующая знаку расчетной геометрической координаты точки e .

При выполнении условия $Y_{e\text{ расч}} \approx 0$ искомая угловая характеристика φ_1 может быть определена как:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{Z_{c_1} - Z_{a_1}}{Y_{a_1} - Y_{c_1}} - \arctg \frac{Z_{d_1} - Z_{a_1}}{Y_{a_1} - Y_{d_1}}. \quad (7.22)$$

Тогда среднее напряжение σ_z в особой точке e , а вместе с этим и нормальное напряжение σ_{ye1} , и приведенное к единице ширины значение силы P_{y1} , согласно свойствам линий скольжения [273], составят соответственно:

$$\sigma_{ze1} = K_c + 2K_c \cdot \varphi_1 = K_c(1 + 2\varphi_1); \quad (7.23)$$

$$\sigma_{ye1} = \sigma_{ze1} + K_c \cdot \sin 2\varphi_1; \quad (7.24)$$

$$P_{y1} = \sigma_{ye1} \cdot Z_{a_1} + \tau_1 \cdot Y_{a_1}, \quad (7.25)$$

где количественная оценка касательных контактных напряжений τ_1 может быть задана при помощи коэффициента пластического трения $\mu = \tau/2K_c$.

В целом, зависимости (7.12)...(7.25) составили полный алгоритм автоматизированного построения и последующего расчета полей характеристик применительно к правой части зоны внедрения идеализированной твердой частицы сердечника в виде клина. Так как по условиям задачи рассматривали внедрение симметричного клина, то решение для левой части будет аналогичным.

Непосредственно, сила внедрения частицы в виде симметричного клина в горизонтальную плоскость металлической оболочки порошковой ленты составит:

$$P = 2p_{y1} \cdot b, \quad (7.26)$$

где b – ширина клина.

При определении общей силы прокатки порошковой ленты расчет $2K_c$ производился с допущением, что при внедрении твердой частицы металл оболочки не обжимается, а, следовательно, отсутствует деформационное упрочнение. В данной задаче неизвестным является глубина внедрения частицы, а сила внедрения – известна. Поэтому для нахождения величины H была введена дополнительная итерационная процедура, которую можно описать следующим выражением:

$$H_{(m+1)} = H_m + A_H \text{sign}\{P_m - [P]\}, \quad (7.27)$$

где m – номер итерационной процедуры;

$[P]$ – заданное значение усилия внедрения твердой частицы сердечника в пластичный материал металлической оболочки.

Аналогично определяли вероятность нарушения целостности металлической оболочки для случая внедрения идеализированных частиц сердечника в форме конуса (рис. 7.14), пирамиды (рис. 7.15), шара.

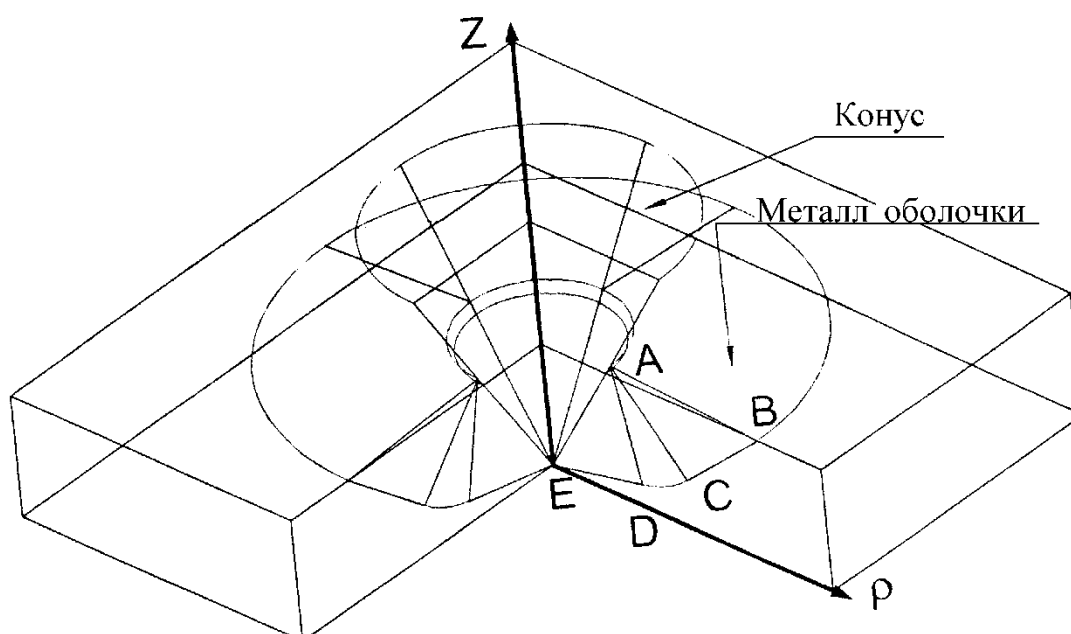


Рисунок 7.14 – Схема внедрения в металл оболочки частицы сердечника в виде конуса

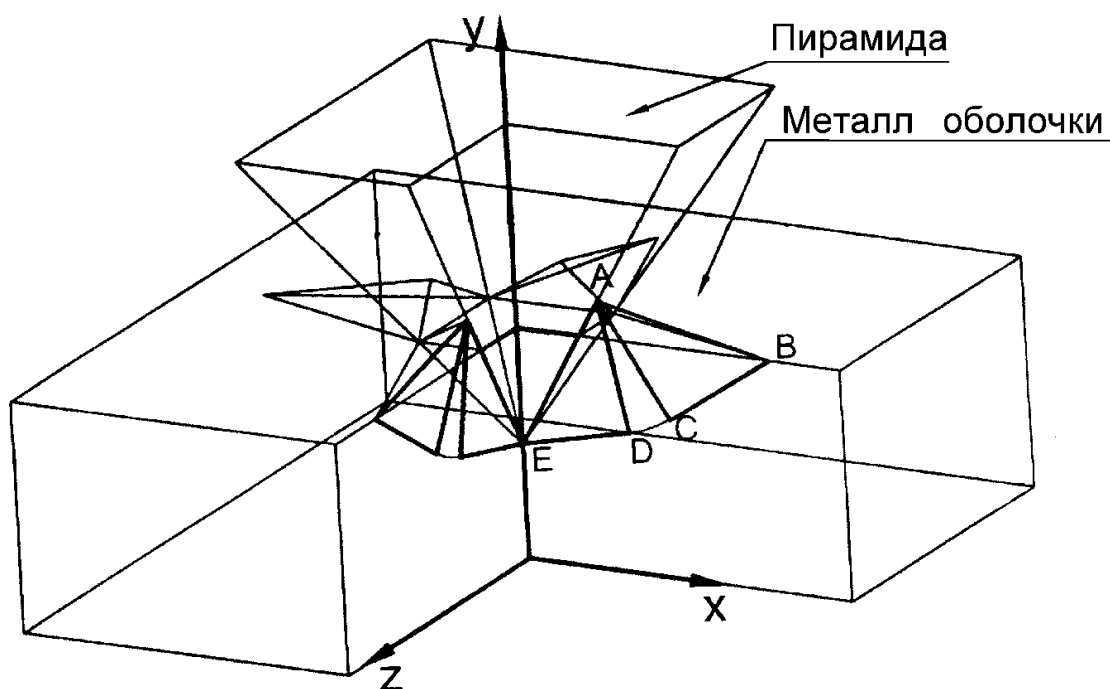


Рисунок 7.15 – Схема внедрения в металл оболочки частицы сердечника в виде пирамиды

Блок-схема алгоритма нахождения силы внедрения частицы в горизонтальную плоскость оболочки представлена на рисунке 7.16.

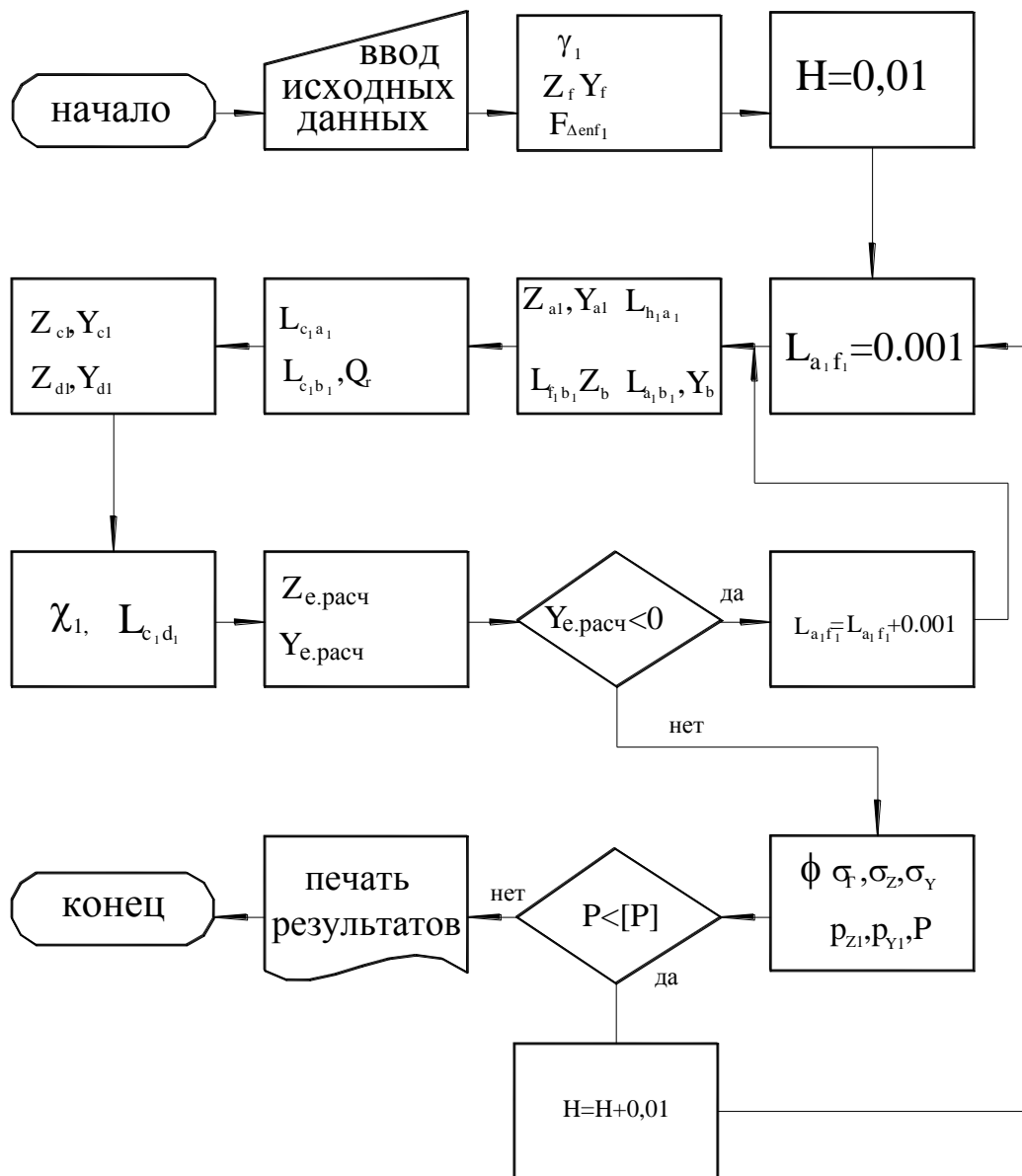


Рисунок 7.16 – Блок-схема алгоритма определения силы внедрения твердой частицы в материал оболочки

Результаты численной реализации разработанной математической модели внедрения частицы сердечника различной формы в металлическую оболочку при различных условиях представлены на рисунках 7.17...7.22.

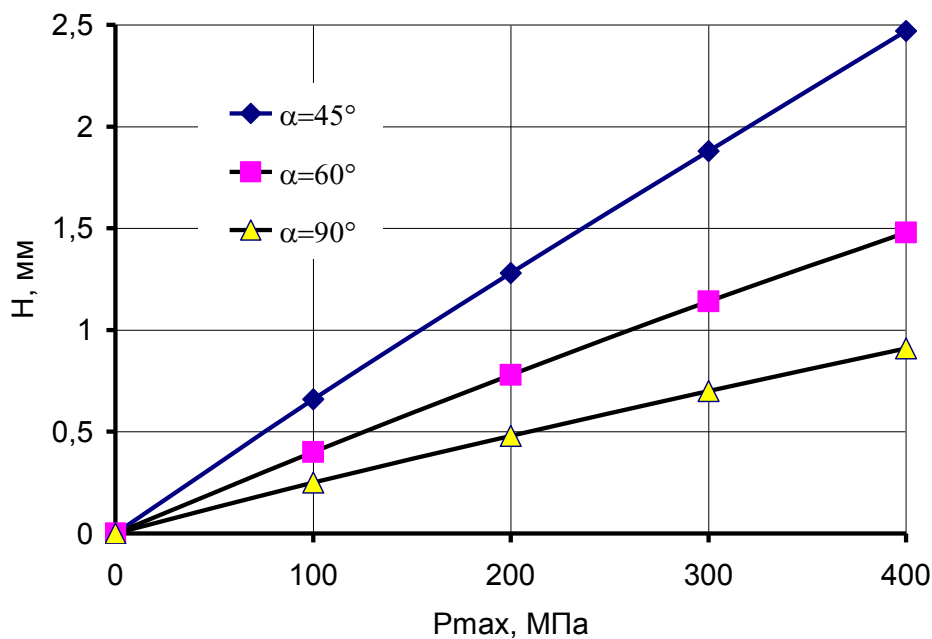


Рисунок 7.17 – Расчетные зависимости глубины внедрения частицы сердечника в виде клина от максимальных контактных напряжений при прокатке порошковой ленты

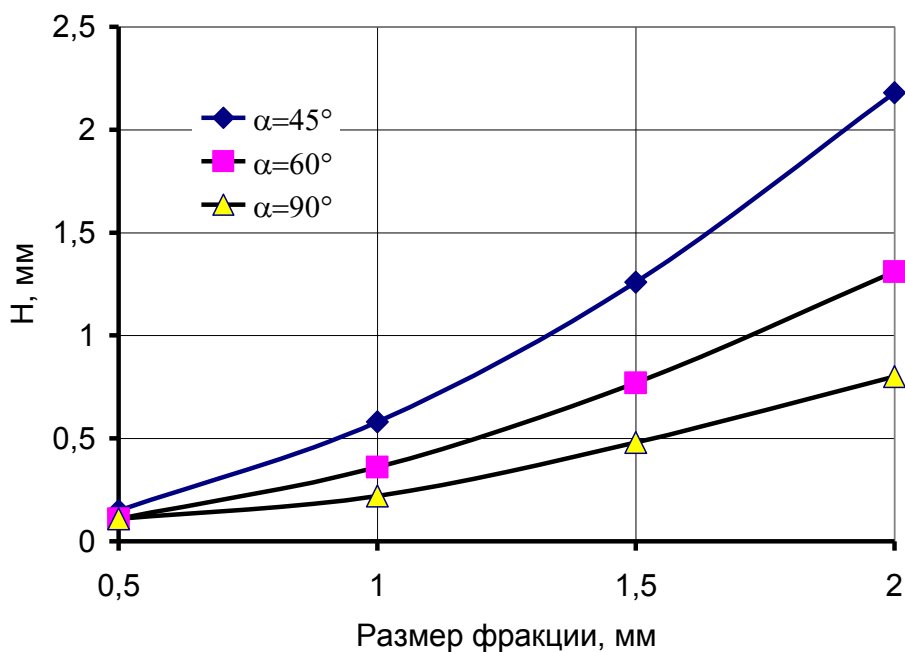


Рисунок 7.18 – Расчетные зависимости глубины внедрения частиц сердечника в виде клина от их фракционного состава

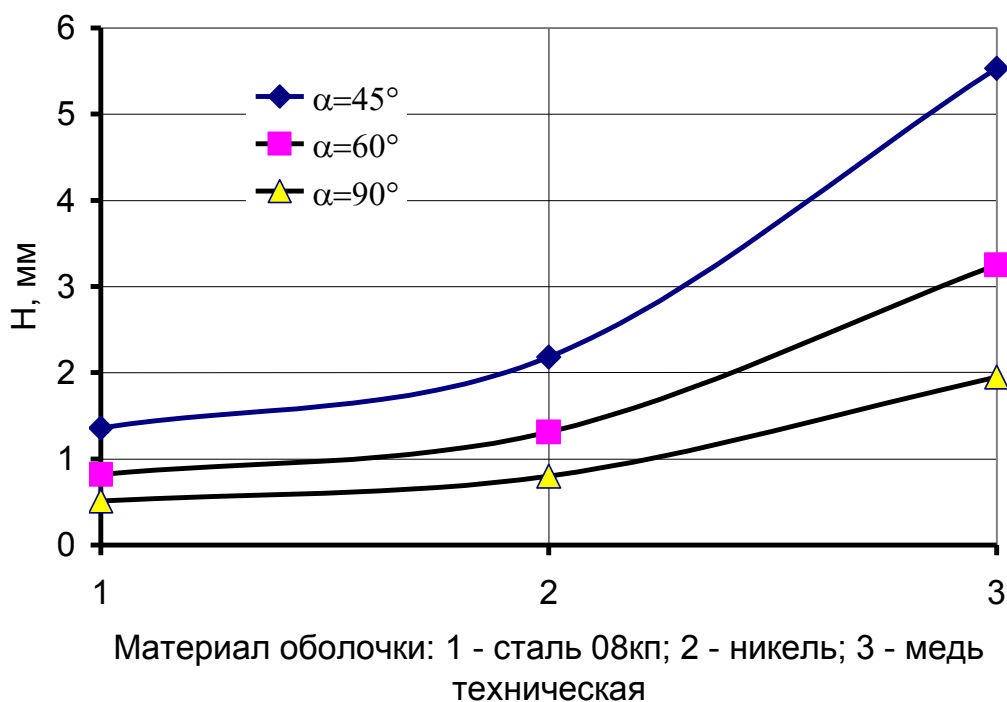


Рисунок 7.19 – Расчетные зависимости глубины внедрения частицы сердечника в виде клина от материала оболочки

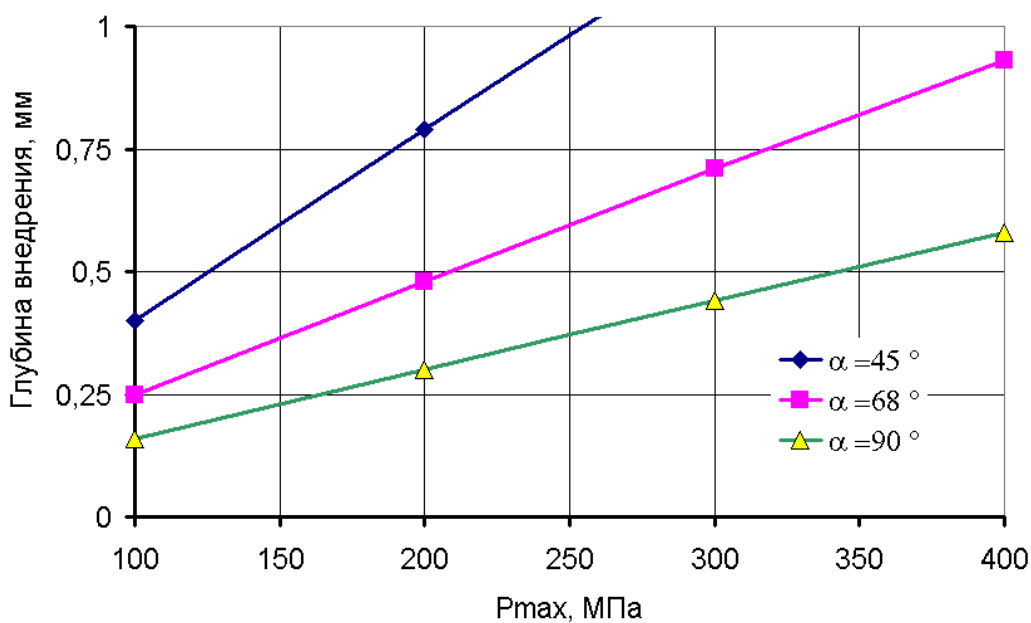


Рисунок 7.20 – Расчетные зависимости глубины внедрения частицы сердечника в форме конуса от максимальных контактных напряжений при прокатке

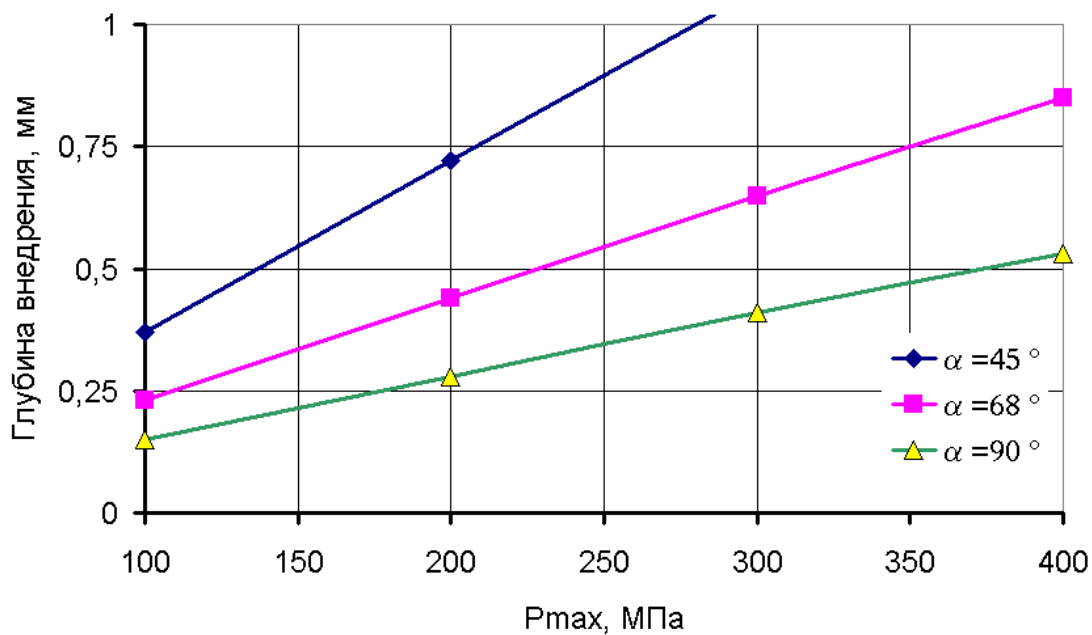


Рисунок 7.21 – Расчетные зависимости глубины внедрения частицы сердечника в форме призмы от максимальных контактных напряжений при прокатке

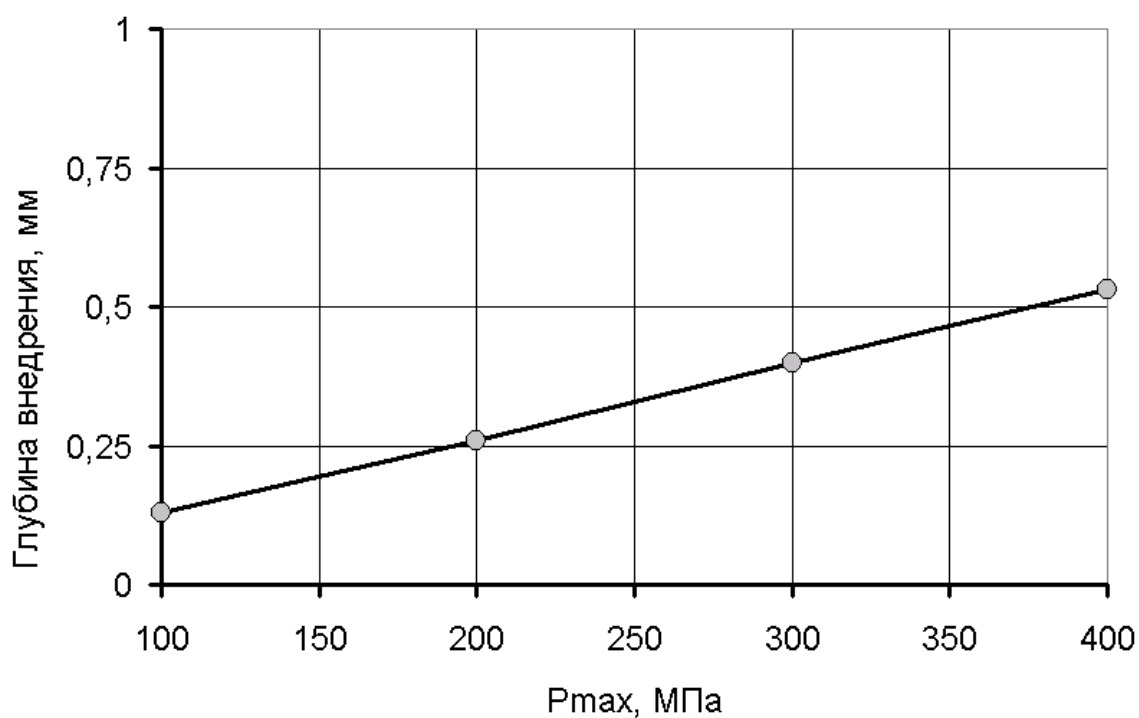


Рисунок 7.22 – Расчетные зависимости глубины внедрения частицы сердечника в форме шара от максимальных контактных напряжений при прокатке

Их анализ показал:

- с увеличением угла наклона образующей клина α глубина внедрения уменьшается (рис. 7.17...7.18);
- при увеличении максимальных контактных напряжений процесса прокатки порошковой ленты или размеров частиц глубина внедрения частицы сердечника в оболочку возрастает (рис. 7.19, 7.20);
- при увеличении предела текучести материала оболочки глубина внедрения частицы уменьшается (рис. 7.21);
- наибольшая глубина внедрения наблюдается при использовании частиц в форме конуса, а наименьшая – при использовании шарообразных частиц сердечника (рис. 7.22).

7.5 Имитационное математическое моделирование основных показателей качества готовой порошковой ленты

На стабильность процесса наплавки и качество наплавленного металла существенное влияние оказывают качественные показатели изготавливаемой порошковой ленты. Это делает необходимым изучение статистических закономерностей механизмов её формирования при прокатке. Но определение этих закономерностей экспериментальным путем весьма трудоёмко и требует дополнительные капиталовложения, а при проектировании новых технологий, когда отсутствует соответствующее оборудование – проведение этих исследований невозможно. Все это делает целесообразным использование методов имитационного моделирования. То есть на основе разработанных математических моделей (см. подразд. 4.1-4.3) необходимо создать модель, которая позволяет производить анализ основных показателей качества изготовленной порошковой ленты с учетом стохастического характера изменения основных исходных параметров процесса прокатки. В качестве метода имитационного моделирования при этом был

использован метод Монте-Карло [187; 293...299], который позволяет при сравнительно небольших количествах расчетов смоделировать реальный процесс. При имитационном моделировании в качестве варьируемых были использованы следующие технологические параметры процесса: исходная толщина порошкового сердечника h_0 ; толщина оболочки $h_{0п}$; исходная относительная плотность порошкового сердечника γ_0 . Помимо технологических параметров на качество порошковой ленты оказывает также влияние конструктивное исполнение оборудования, то есть следует принять во внимание значение модуля жесткости клетки $G_{кл}$, и учесть тот факт, что в результате погрешностей изготовления рабочие валки обладают некоторым радиальным биением ΔR . Характер изменения вышеперечисленных исходных параметров, согласно статистическим исследованиям [300...303], с достаточной точностью описывается нормальным законом распределения, при этом коэффициенты вариации параметров h_0 , $h_{0п}$, γ_0 составляют $v_i=0,03$.

Для математического моделирования случайного характера изменения исходных параметров разыгрывали случайные равновероятные числа c_k , расположенные в интервале от 0 до 1 и генерируемые стандартным машинным оператором *Random*. Затем на их основе вычисляли случайные числа μ_k , расположенные в интервале от -0,5 до +0,5, т.е., согласно [293]:

$$\mu_k = c_k - 1, \quad (7.28)$$

где k – номер разыгрываемого значения случайных величин.

Для генерирования нормально распределенных случайных чисел β_k использовали следующие зависимости [293]:

$$\beta_k = \frac{3 - \sqrt{2 - 12\pi\mu_k^2}}{\sqrt{2\pi}} \mu_k \quad \text{при } |\mu_k| < 0,487; \quad (7.29)$$

$$\beta_k = \frac{|\mu_k|}{\mu_k} [2,25867 + 57,0256(|\mu_k| - 0,487)] \quad \text{при } |\mu_k| > 0,487.$$

Случайную величину исходного параметра определяли с учетом его номинального значения X и коэффициента вариации v_x [293]:

$$X_k = X (1 + \beta_k \mathcal{G}_x), \quad (7.30)$$

где X_k – значения искомой случайной величины в данном k -ом розыгрыше.

С помощью зависимости (7.30) были описаны случайные значения всех исходных параметров, подчиняющихся нормальному закону распределения [293].

Последним элементом имитационного моделирования исходных параметров процесса прокатки порошковой ленты является моделирование величины радиального биения, и, соответственно, величины межвалкового зазора. С целью их корректного учета, необходимо, прежде всего, определение номинальной величины межвалкового зазора с учетом модуля жесткости рабочей клетки:

$$\Delta Z_0 = h_{1\Sigma} - P/G_{кл}, \quad (7.31)$$

где $G_{кл}$ – обобщенный модуль жесткости рабочей клетки.

Межвалковый зазор является случайной равномерно распределенной величиной, поэтому:

$$\Delta Z_k = \Delta Z_0 + \Delta R \cos(2\pi c_k), \quad (7.32)$$

где ΔR – суммарный полуразмах радиальных биений рабочих валков.

В связи с тем, что случайное изменение межвалкового зазора не позволяет однозначно определить значение силы прокатки, при моделировании была использована дополнительная итерационная процедура по его определению. После накопления массивов случайно заданных исходных параметров процесса и соответствующих им результирующих параметров, были определены основные ста-

статистические характеристики процесса прокатки порошковой ленты. Укрупненная блок-схема алгоритма имитационного моделирования основных показателей качества представлена на рисунке 7.23. Законы распределения исходных и результирующих параметров процесса прокатки порошковой ленты (рис. 7.24, 7.25) подчиняются нормальному закону распределения [304...306].

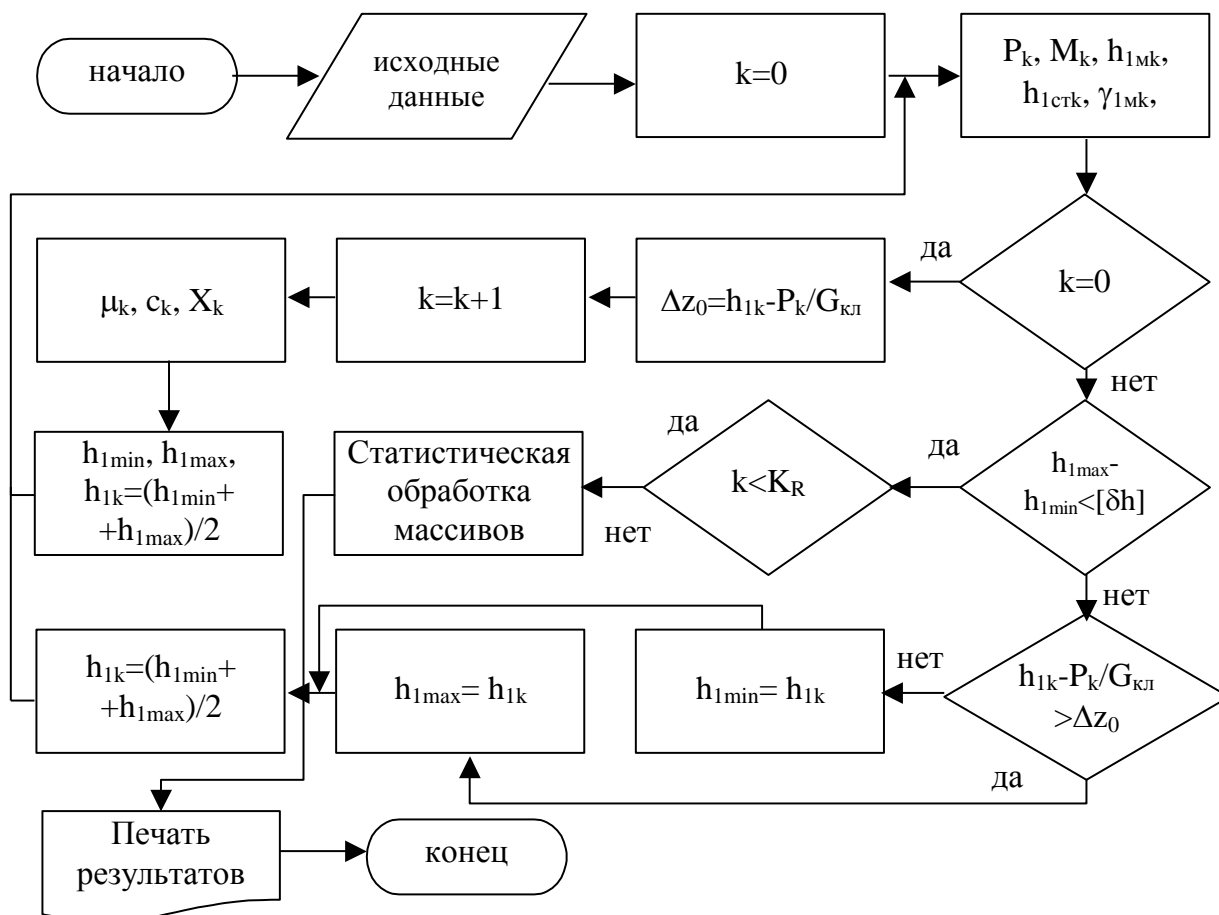


Рисунок 7.23 – Блок- схема алгоритма имитационного моделирования
имитационного моделирования

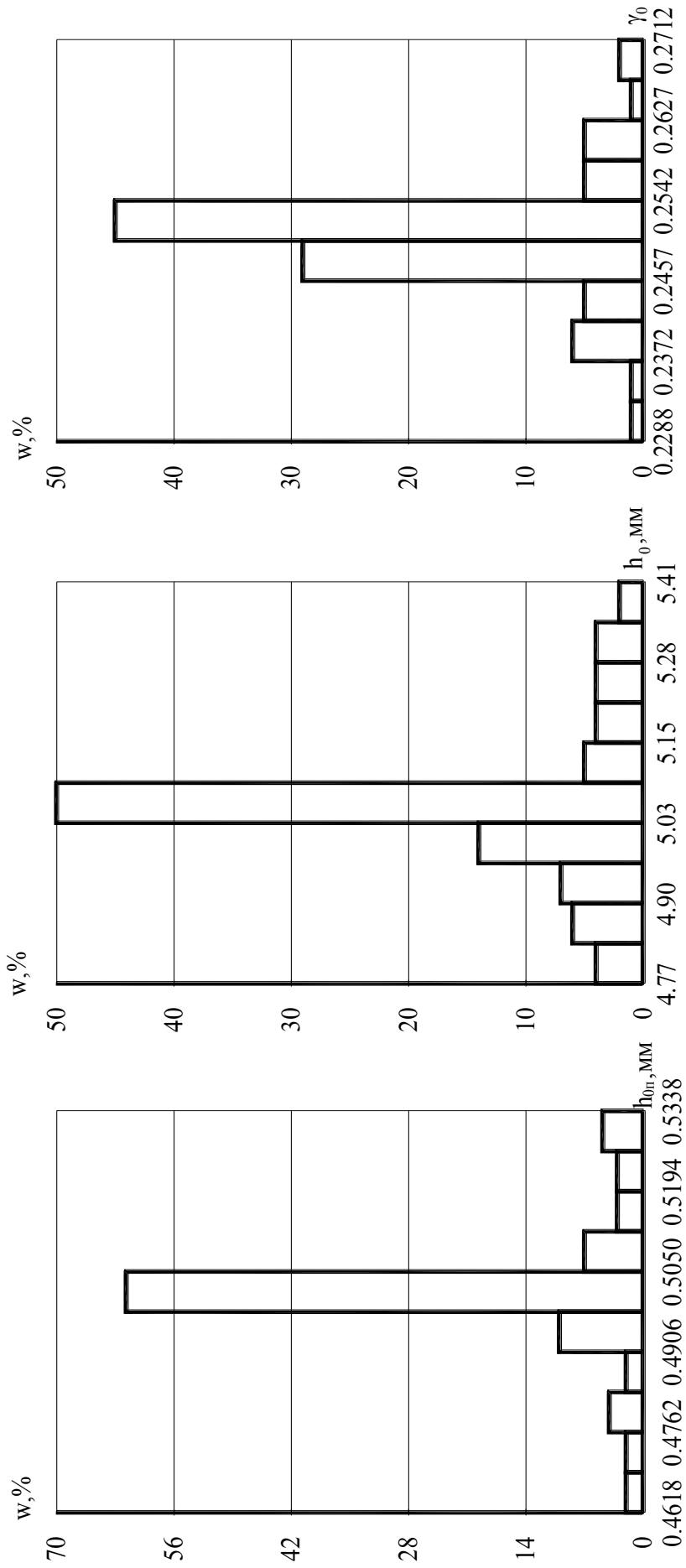


Рисунок 7.24 – Расчетные гистограммы распределений исходных параметров процесса прокатки порошковой ленты:

$$\overline{h_0} = 5 \text{ мм}; \overline{h_{0n}} = 0.5 \text{ мм}; \overline{h_{1\Sigma}} = 2.0 \text{ мм}; b = 100 \text{ мм}; V_0 = 0.05 \text{ м/с}; a_f = 0.35; f_{m0} = 0.2; f_{en0} = 0.09; \overline{\gamma_{0,m}} = 0.25;$$

$$a = 0.44; m = 1; n = 2.5; \sigma_{s0} = 458 \text{ Н/мм}^2; a_1 = 1130.6; a_2 = -1138.9; a_3 = 555.6; \sigma_{ns0} = 240 \text{ Н/мм}^2$$

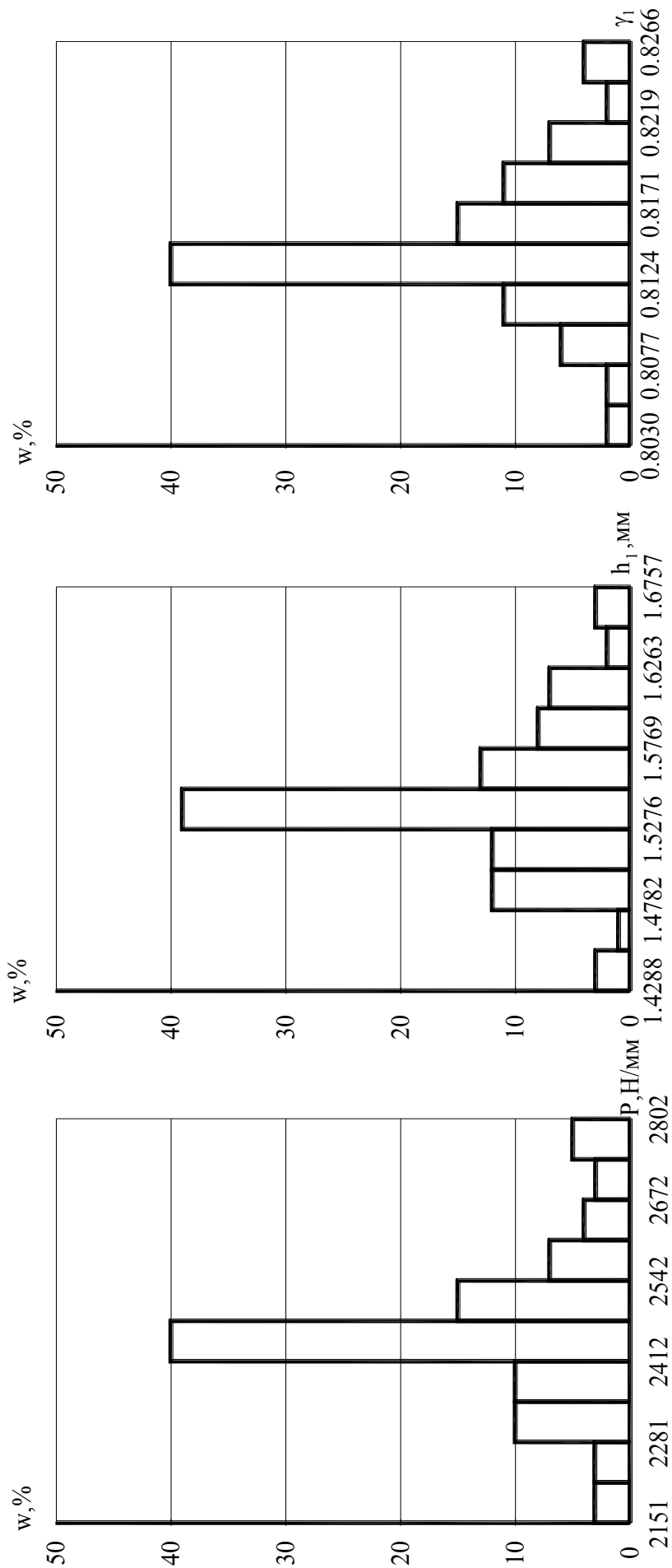


Рисунок 7.25 – Расчетные гистограммы распределений результирующих характеристик процесса прокатки порошковой ленты:

$$\overline{h_0} = 5 \text{ мм}; \overline{h_{0n}} = 0.5 \text{ мм}; \overline{h_{1\Sigma}} = 2.0 \text{ мм}; V_0 = 0.05 \text{ м/с}; a_f = 0.35; f_{m0} = 0.2; f_{en0} = 0.09; \overline{\gamma_{0M}} = 0.25;$$

$$a = 0.44; m = 1; n = 2.5; \sigma_{s0} = 458 \text{ Н/мм}^2; a_1 = 1130.6; a_2 = -1138.9; a_3 = 555.6; \sigma_{ns0} = 240 \text{ Н/мм}^2$$

Применительно к процессу прокатки порошковой ленты также был проведен анализ влияния вариации величины исходных толщин оболочки и сердечника, исходной относительной плотности сердечника на конечную толщину и относительную плотность сердечника (рис. 7.26, 7.27). Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- вариация исходных параметров процесса прокатки оказывает наибольшее влияние на силу прокатки (до 10%) и конечную толщину порошкового сердечника (до 5%), в то время как на конечную относительную плотность данная вариация оказывает незначительное влияние (см. рис. 7.26);
- на величину коэффициента вариации силы прокатки наибольшее влияние оказывает величина коэффициента вариации исходной толщины порошкового сердечника, а вариация исходной толщины оболочки на данный коэффициент влияет весьма незначительно (см. рис. 7.27, а);
- на величину коэффициента вариации результирующей толщины сердечника примерно одинаковое влияние оказывает, и величина коэффициента вариации исходной толщины порошкового сердечника, и вариация его исходной относительной плотности, а вариация исходной толщины оболочки, как и в предыдущем случае, на данный коэффициент влияет весьма незначительно (см. рис. 7.27, б);
- на величину коэффициента вариации конечной относительной плотности сердечника существенное влияние оказывает величина коэффициента вариации его исходной толщины, также существенное, но в меньшей степени на данный коэффициент оказывает влияние вариация исходной относительной плотности (см. рис. 7.27, в).

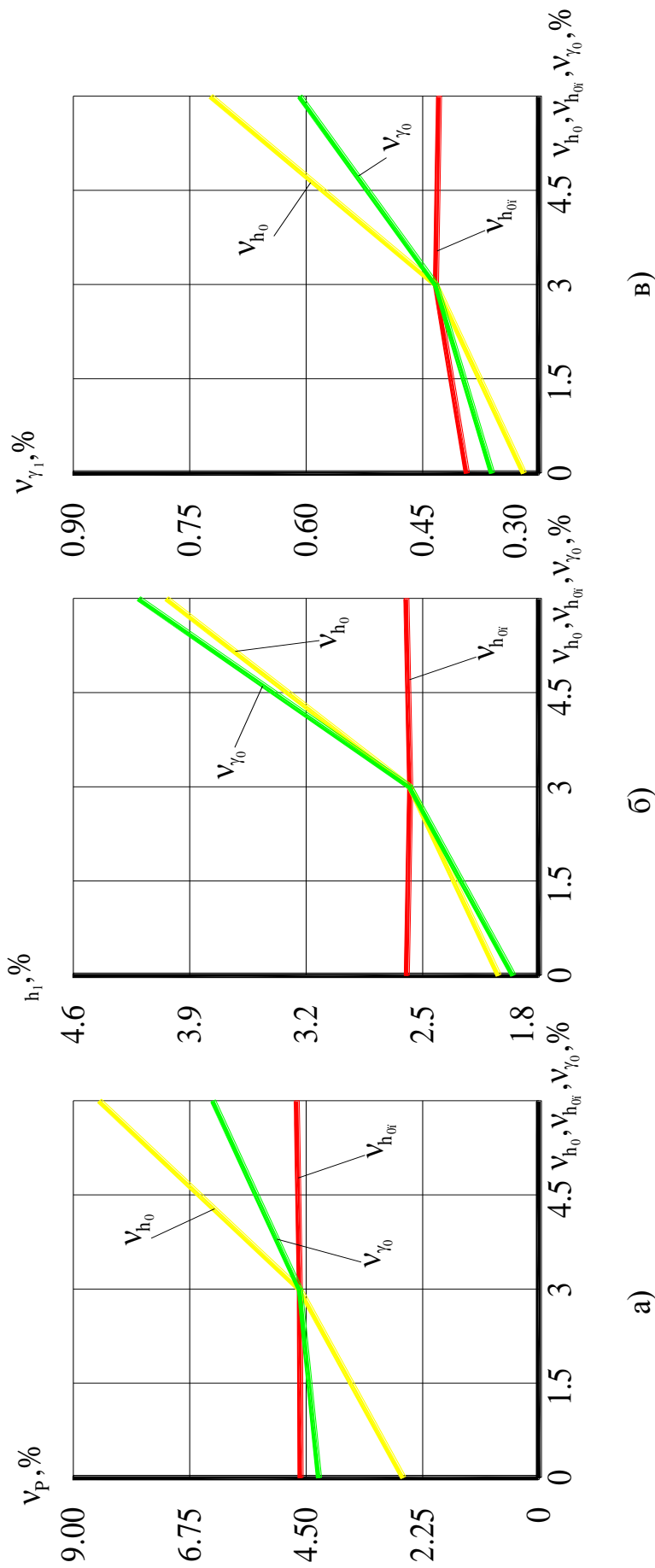


Рисунок 7.26 – Зависимость коэффициентов вариации результирующих характеристик от вариации исходных параметров процесса прокатки порошковой ленты:

$$\overline{h_0} = 5 \text{ мм}; \overline{h_{0n}} = 0.5 \text{ мм}; \overline{h_{1\Sigma}} = 2.0 \text{ мм}; b = 100 \text{ мм}; V_0 = 0.05 \text{ м/с}; a_f = 0.35; f_{m0} = 0.2; f_{en0} = 0.09; \overline{\gamma_{0M}} = 0.25;$$

$$a = 0.44; m = 1; n = 2.5; \sigma_{s0} = 458 \text{ Н/мм}^2; a_1 = 1130.6; a_2 = -1138.9; a_3 = 555.6; \sigma_{rs0} = 240 \text{ Н/мм}^2$$

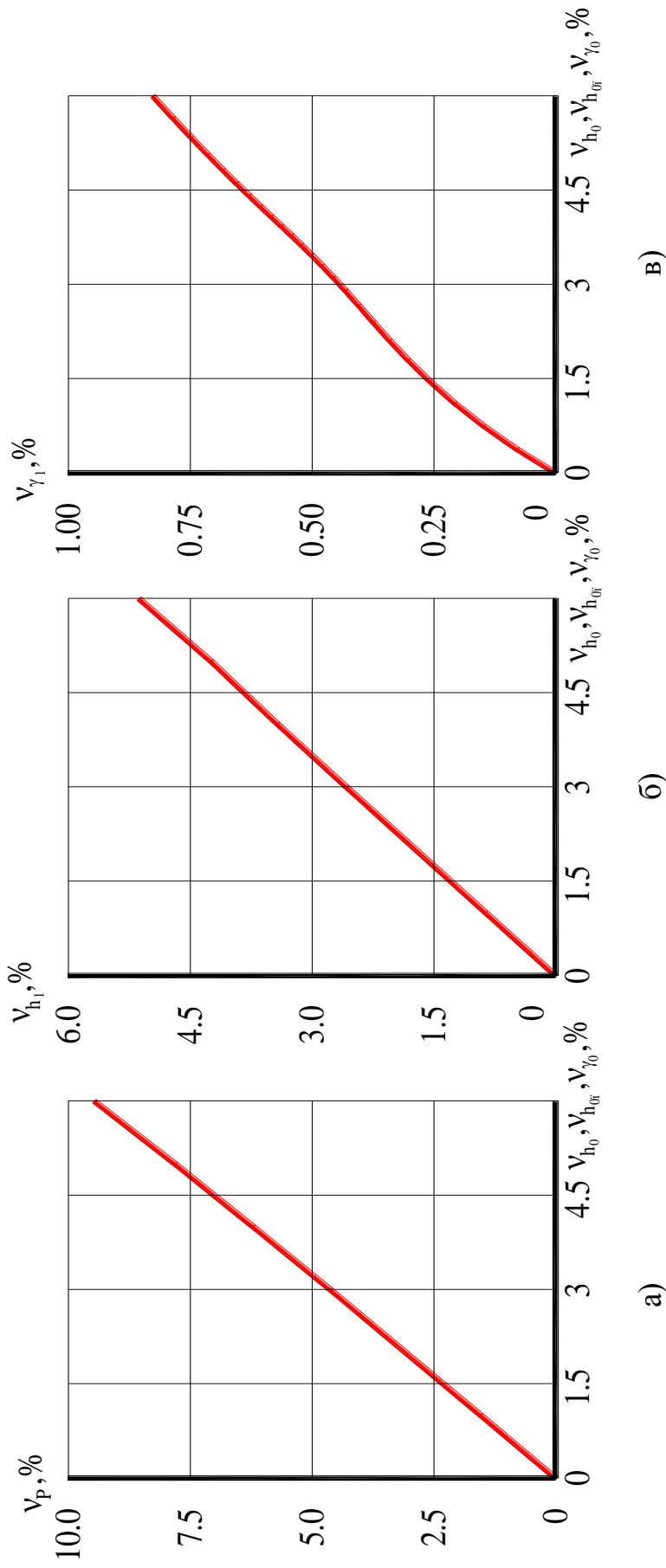


Рисунок 7.27 – Зависимость коэффициентов вариации результирующих характеристик процесса

прокатки порошковой ленты от вариации исходных параметров:

$$\overline{h_0} = 5.0 \text{ мм}; \overline{h_{0n}} = 0.5 \text{ мм}; \overline{h_{1\Sigma}} = 2.0 \text{ мм}; b = 100 \text{ мм}; V_0 = 0.05 \text{ м/с}; a_f = 0.35; f_{m0} = 0.2; f_{en0} = 0.09; \overline{\gamma_{0,m}} = 0.25;$$

$$a = 0.44; m = 1; n = 2.5; \sigma_{s0} = 458 \text{ Н/мм}^2; a_1 = 1130.6; a_2 = -1138.9; a_3 = 555.6; \sigma_{ns0} = 240 \text{ Н/мм}^2$$

В целом, полученные результаты подтверждают, что вариация исходных параметров процесса прокатки порошковой ленты в двухвалковой клети прокатного стана играет существенную роль как в формировании показателей качества готовых электродов, так и энергосиловых параметров процесса и, следовательно, разработка мероприятий, направленных на обеспечение стабильности режима прокатки, позволяет получать порошковые ленты с заданными показателями качества с точки зрения точности геометрических и физико-механических характеристик в пределах партии одного номинального типоразмера.

7.6 Выбор рациональных технологических параметров для обеспечения равномерного распределения плотности по сечению порошкового сердечника

Одним из основных требований, предъявляемых к порошковым лентам и проволокам является равномерное распределение плотности порошкового сердечника. Согласно ГОСТ 26467-85 и ГОСТ 26101-84 уровень отклонения коэффициента заполнения не должен превышать 3,5%...4,0%.

Коэффициент заполнения K_3 согласно ГОСТ определяется как отношение массы порошкового сердечника m_c к массе ленты m_l :

$$K_3 = \frac{m_c}{m_l} = \frac{m_c}{m_{об} + m_c} = \frac{V_c \rho_c}{V_{об} \rho_{об} + V_c \rho_c} = \frac{F_c \rho_c}{F_{об} \rho_{об} + F_c \rho_c} = \frac{1}{1 + \frac{F_{об} \rho_{об}}{F_c \rho_c}}, \quad (7.33)$$

где $m_{об}$ – масса оболочки;

$V_c, V_{об}$ – объемы порошкового сердечника и металлической оболочки;

$\rho_c, \rho_{об}$ – плотности материалов порошкового сердечника и металлической оболочки;

$F_c, F_{об}$ – площади поперечного сечения порошкового сердечника и металлической оболочки.

Выразим из формулы (7.33) плотность порошкового сердечника:

$$\rho_c = \frac{K_3}{1 - K_3} \frac{F_{об} \rho_{об}}{F_c}. \quad (7.34)$$

Приняв во внимание отклонение δK_3 выразим максимальное значение коэффициента заполнения:

$$K_3^{\max} = (1 + \delta K_3) K_3. \quad (7.35)$$

Аналогично для максимального значения плотности порошкового сердечника:

$$\rho_c^{\max} = (1 + \delta \rho_c) \rho_c. \quad (7.36)$$

Из отношения максимального к минимальному значению на основании (7.34)-(7.36) определим выражение для отклонения плотности порошкового сердечника:

$$\delta \rho_c = \frac{(1 + \delta K_3)(1 - K_3)}{1 - (1 + \delta K_3)K_3} - 1. \quad (7.37)$$

Из анализа полученной зависимости (7.37) видно, что отклонение плотности порошкового сердечника зависит от значения коэффициента заполнения и величины его отклонения. На рисунке 7.28 представлена графическая интерпре-

тация данной зависимости, которая была использована для определения регламентируемой стандартами величины равномерного распределения плотности порошкового сердечника.

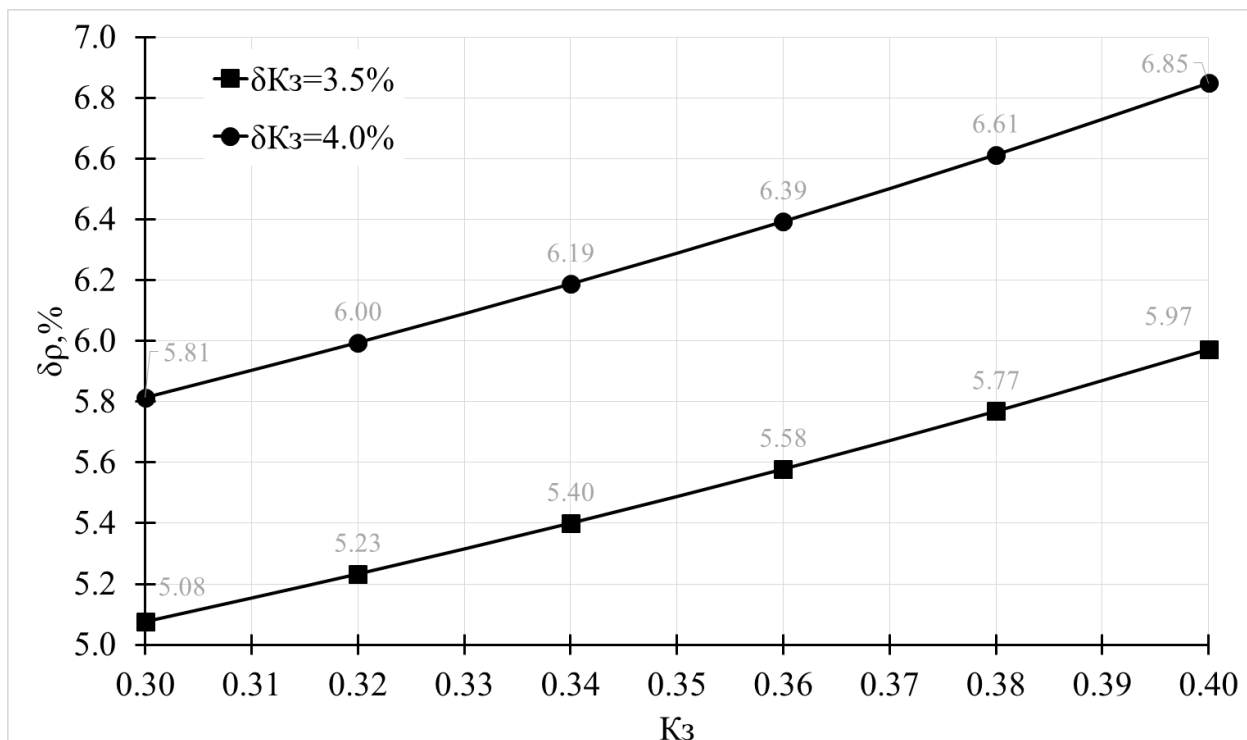


Рисунок 7.28 – Зависимость отклонения плотности порошкового сердечника от коэффициента заполнения

В результате реализации конечно-элементной модели (подразд. 4.4) были получены поля распределения пористости порошка по сечению заготовки на выходе из очага деформации при различных степенях обжатий. Из анализа полученных результатов видно, что наиболее равномерное распределение пористости наблюдается при обжатии на уровне 35%. При более низких степенях деформации происходит более интенсивное уплотнение сердечника в приконтактных областях, при более высоких – менее уплотненными остаются боковые кромки (рис. 7.29).

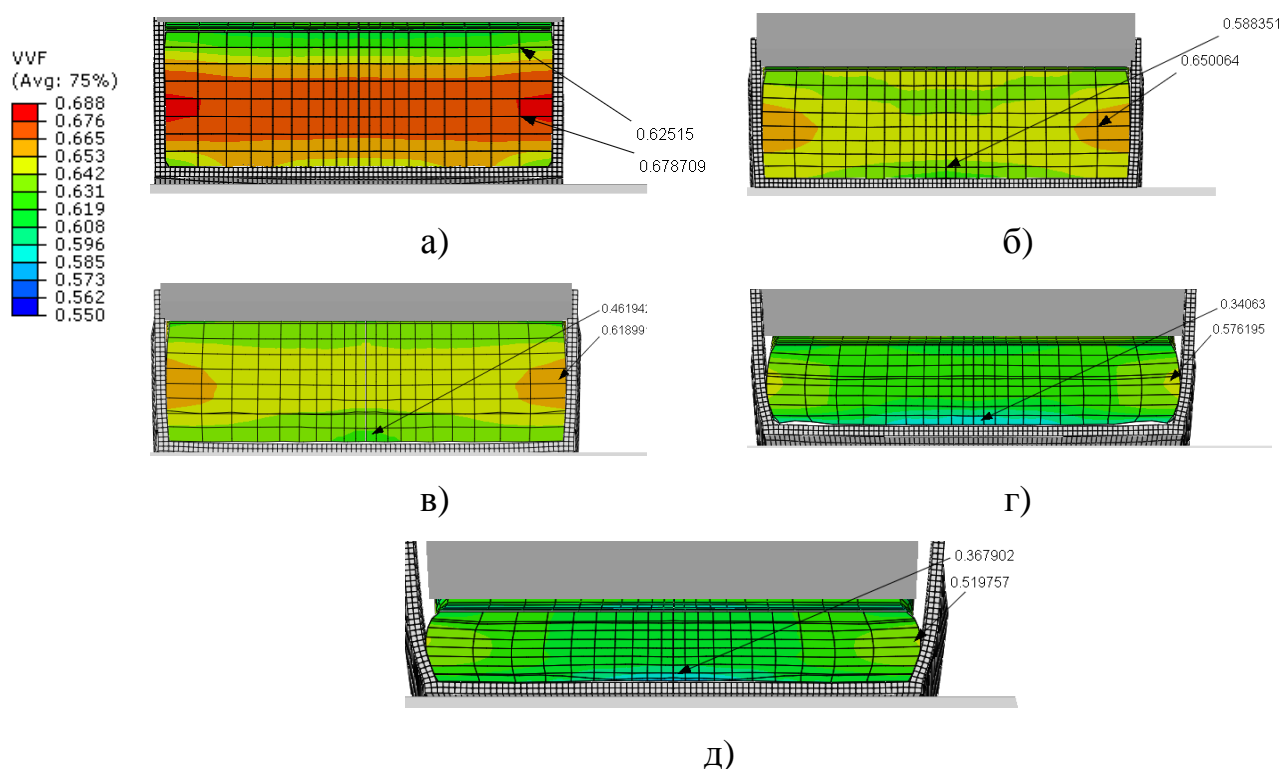


Рисунок 7.29 – Распределение пористости порошкового сердечника по сечению заготовки на выходе из очага деформации при различных обжатиях:

а – 12,5%; б – 25%; в – 37,5%; г – 50%; д – 62,5%

Результаты расчета относительной плотности порошкового сердечника γ_1 по сечению порошковой ленты приведены на рисунке 7.30. Из представленных распределений можно сделать следующий вывод: наиболее равномерное распределение плотности порошкового сердечника наблюдается при обжатиях 25...35%, при этом коэффициент вариации не превышает регламентированных значений.

Согласно используемым в теории прокатки критериям подобия процессов вторым фактором, оказывающим влияние на распределение компонент напряженно-деформированного состояния является ширина заготовки. На основе конечно-элементной модели (подразд. 4.4) были получены поля распределений пористости для различных ширин порошковой ленты (рис. 7.31). Как видно из представленных результатов с уменьшением ширины заготовки равномерность распределения плотности уменьшается за счет неполной обработки боковых кромок.

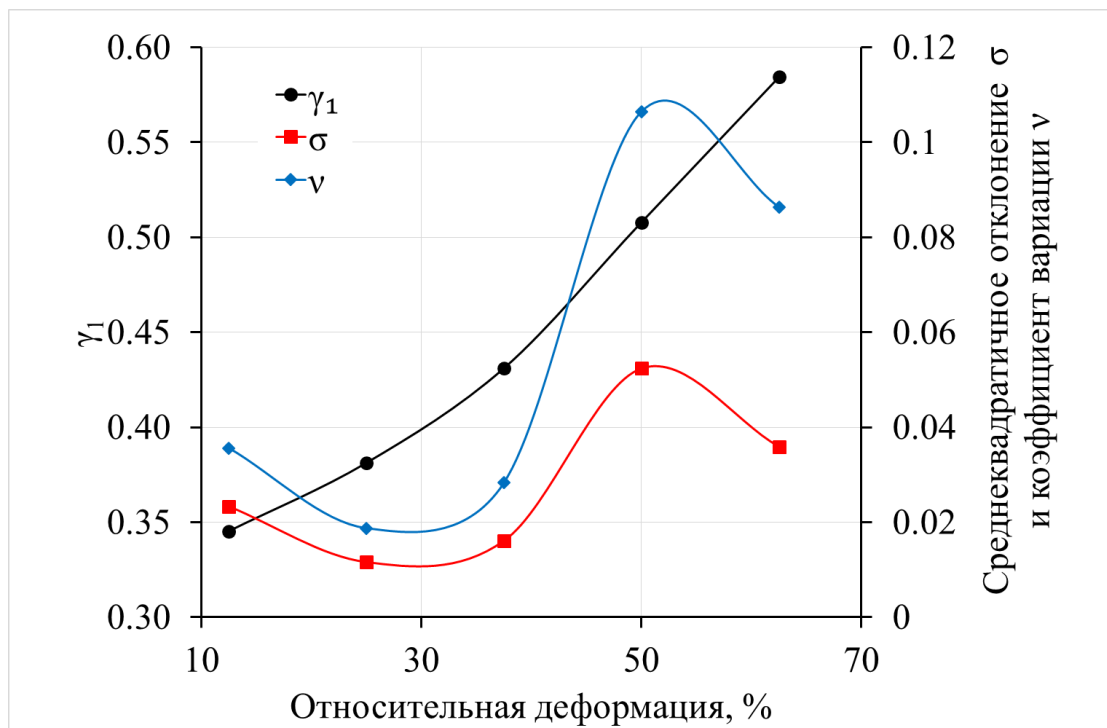


Рисунок 7.30 – Расчетные распределения средних значений γ_1 , среднеквадратичных отклонений σ и коэффициентов вариации ν относительной плотности порошкового сердечника в зависимости от относительной деформации

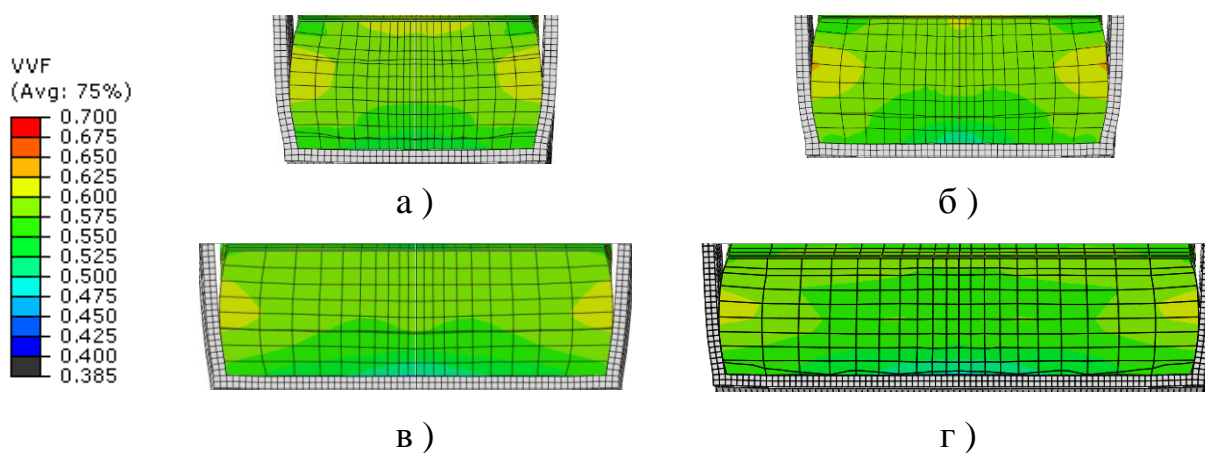


Рисунок 7.31 – Распределение пористости порошкового сердечника по сечению заготовки на выходе из очага деформации для лент различной ширины:

а – 10 мм; б – 12 мм; в – 15 мм; г – 20 мм

На основе реализации конечно-элементной модели прокатки порошковых лент в металлической оболочке (подразд. 4.4) были также получены расчетные распределения средних значений и коэффициентов вариации относительной плотности порошкового сердечника в зависимости от ширины и относительной деформации порошковой ленты (рис. 7.32). Из анализа данных зависимостей можно сделать вывод, что с увеличением ширины заготовки наблюдается тенденция к увеличению среднего значения относительной плотности с уменьшением его коэффициента вариации, при достижении определенных обжатий величина неравномерного распределения плотности превышает нормативные, при этом уровень данных обжатий уменьшается с уменьшением ширины заготовки. Для порошковых лент шириной 10...15 мм рекомендуемая величина обжатия не должна превышать 25%, для лент шириной 20 мм – 35%.

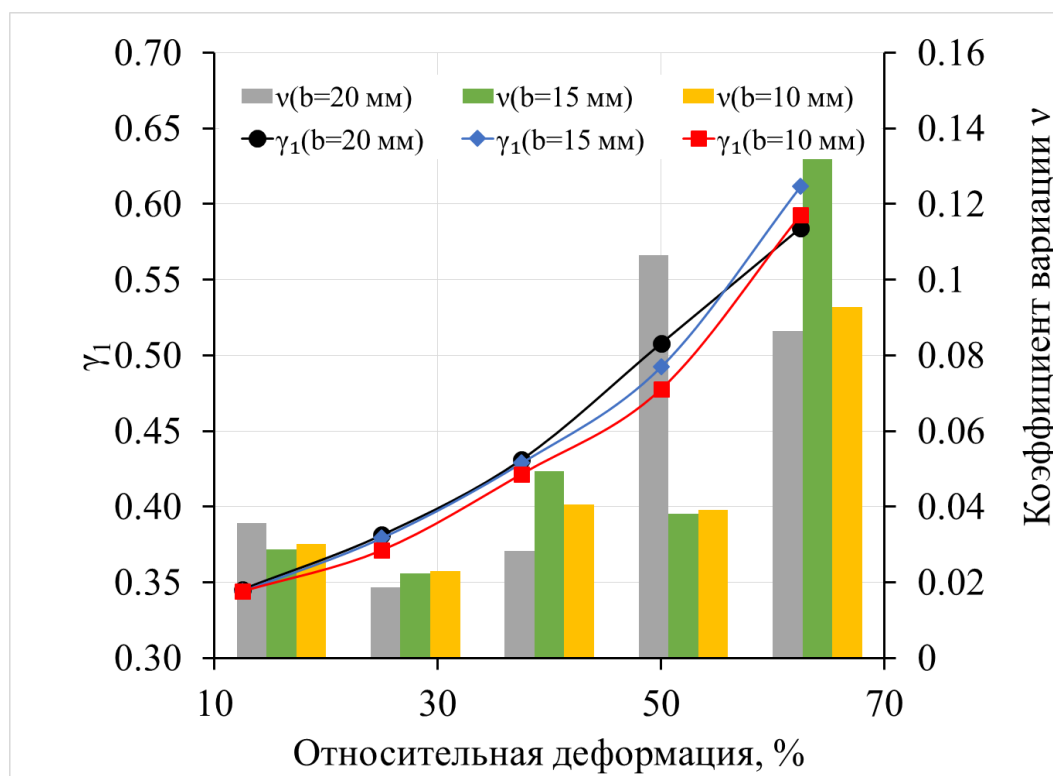


Рисунок 7.32 – Расчетные распределения средних значений и коэффициентов вариации относительной плотности порошкового сердечника в зависимости от ширины и относительной деформации порошковой ленты

Помимо относительной деформации и ширины заготовки на распределение компонент напряженно-деформированного состояния оказывает влияние радиус валков R . Для определения количественного влияния данного параметра на основе реализации конечно-элементной модели (см. подразд. 4.4) были получены поля распределений пористости порошка при радиусах валков от 25 до 100 мм (рис. 7.33).

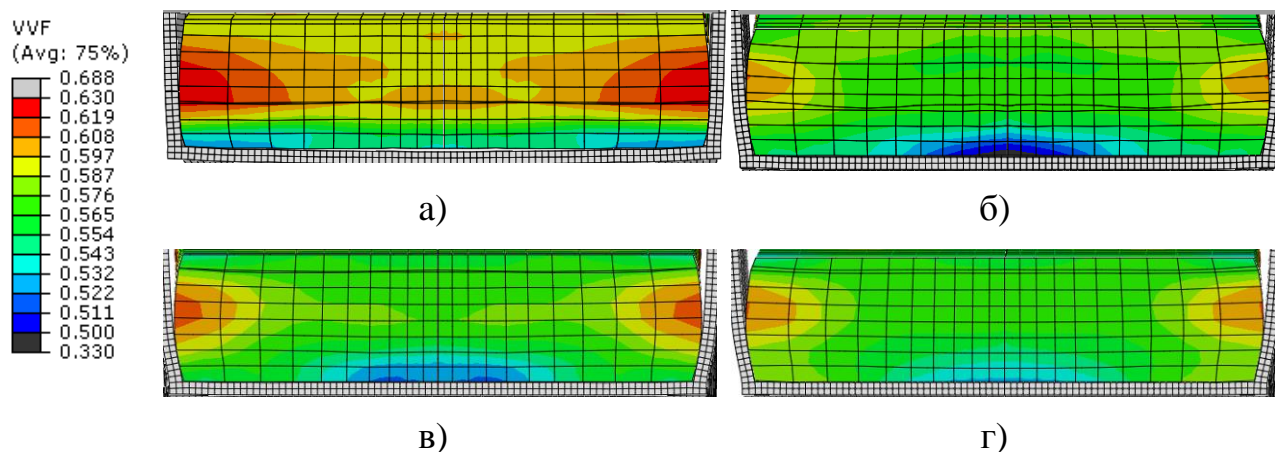


Рисунок 7.33 – Распределение пористости порошкового сердечника по сечению заготовки на выходе из очага деформации при различных радиусах валков R :

а – $R = 25$ мм ($L/h_{cp} = 1.3$); б – $R = 50$ мм ($L/h_{cp} = 1.9$);

в – $R = 75$ мм ($L/h_{cp} = 2.3$); г – $R = 100$ мм ($L/h_{cp} = 2.7$)

Как видно из представленных результатов равномерность распределения плотности возрастает при увеличении радиуса валков, при этом зоны с меньшей плотностью наблюдаются по боковым кромкам, а с большей – в зонах контактного взаимодействия с оболочкой со стороны нижнего валка.

На рисунке 7.34 представлены расчетные распределения средних, минимальных, максимальных значений, среднеквадратичного отклонения и коэффициентов вариации относительной плотности порошкового сердечника в зависимости от радиуса валков при прокатке порошковой ленты в металлической оболочке. Из анализа полученных результатов видно что с увеличением радиуса валков наблюдается уменьшение коэффициента вариации относительной плотности

и при радиусе валков больше 50 мм ($L/h_{cp} > 1.9$) данная величина не превышает регламентированных стандартами величин.

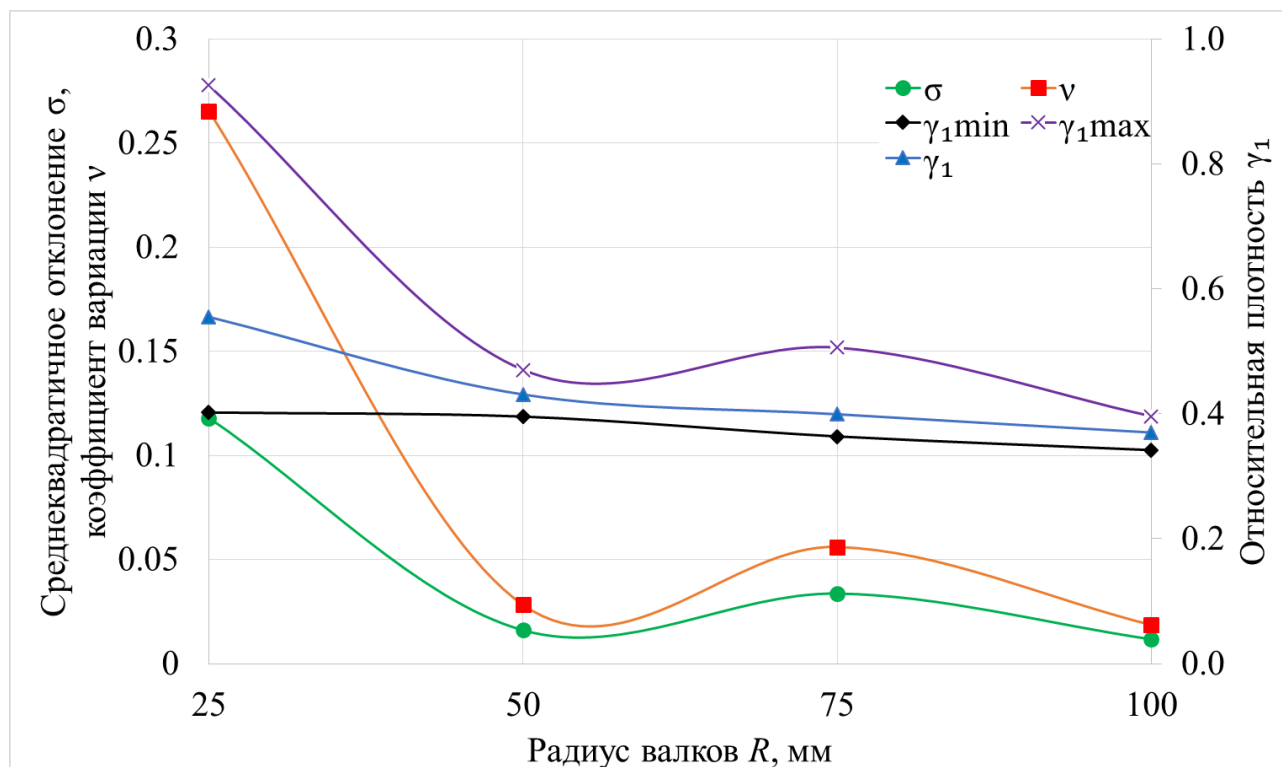


Рисунок 7.34 – Расчетные распределения средних, минимальных, максимальных значений, среднеквадратичного отклонения и коэффициентов вариации относительной плотности порошкового сердечника в зависимости от радиуса валков при прокатке порошковой ленты в металлической оболочке

Выводы

1 На основе анализа результатов численной реализации разработанных математических моделей процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков в металлической оболочке исследовано влияние и сформулированы рекомендации по выбору исходных технологических и конструктивных параметров, обеспечивающих необходимую плотность порошкового сердечника и геометрических характеристик готовой металлопродукции.

2 На основе соответствующих детерминированных решений и метода Монте-Карло разработан комплекс имитационных математических моделей процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков в металлической оболочке, позволяющие теоретически прогнозировать вероятностный характер изменения всех результирующих параметров и, как следствие, прогнозировать точность геометрических характеристик и степень стабильности плотности порошкового материала. Определены количественно диапазоны изменения соответствующих коэффициентов вариации геометрических размеров готового изделия и плотности порошкового сердечника. Установлено, что наиболее весомым фактором, влияющим на разнотолщинность проката и распределение плотности порошкового сердечника является радиальное биение валков.

3 На основе автоматизированного проектирования технологических режимов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков в металлической оболочке сформулированы и решены программно задачи обеспечения необходимой плотности порошкового материала и требуемых геометрических характеристик готового изделия в зависимости от исходной плотности порошка, величины обжатия, материала, формы и толщины оболочки, что позволило определить рациональные режимы деформации, количество переходов и осуществить оптимальный выбор заготовки.

4 На основе анализа реализации конечно-элементной модели прокатки порошковых лент в металлической оболочке установлено, что наиболее равномерное распределение плотности порошкового сердечника регламентируемое стандартами наблюдается при обжатиях на уровне 25...35%, при этом для порошковых лент шириной 10...15 мм рекомендуемая величина обжатия не должна превышать 25%, для лент шириной 20 мм – 35% при радиусе валков больше 50 мм ($L/h_{cp} > 1.9$).

ВЫВОДЫ

1 Дальнейшее повышение эффективности промышленной реализации процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий требует всестороннего исследования влияния металлической оболочки на напряженно-деформированное состояние при прокатке, волочении и плющении, разработки комплекса математических моделей, которые позволяют определять энергосиловые параметры процессов, прогнозировать основные показатели готовой продукции, учитывать влияние на них случайных факторов, а также осуществлять автоматизированное проектирование технологических режимов и конструктивных параметров оборудования для их изготовления.

2 Уточнено условие пластичности порошковых материалов, а именно взаимосвязи между напряжениями, плотностью и деформациями для случаев напряженного состояния, которое возникает при прокатке и волочении, что позволило повысить точность расчета напряженно-деформированного состояния при реализации данных процессов.

3 На основе теоретического анализа условий прокатки порошковых материалов в открытых металлических оболочках с использованием метода конечных разностей установлено влияние формы, материала и толщины оболочки на геометрические характеристики очага деформации. Установлено, что с увеличением жесткости оболочки уменьшается деформация порошкового сердечника, с увеличением коэффициента асимметрии процесса до 1,15 уменьшается зона пластической деформации на 10% при одновременном повышении плотности порошка на 5%, при прокатке двухслойных порошковых композиций происходит деформация только насыпного слоя порошка, с увеличением обжатия в сечениях близких к выходу из очага деформации происходит деформация и предварительно уплотненного слоя.

4 На основе теоретического анализа условий прокатки порошковых материалов в закрытых металлических оболочках замкового типа с использованием метода конечных разностей установлено влияние толщины материала оболочки на основе определения зон ее прогиба и прилегания и, соответственно, толщины порошкового слоя на входе в очаг деформации. Установлено, что повышение

степени обжатия до 60% приводит к пластической деформации оболочки и нарушению ее формы.

5 На основе теоретического анализа условий волочения порошковых материалов в металлической оболочке с использованием методов конечных разностей и конечных элементов установлено влияние величины обжатия и уровня натяжений на утонение стенок оболочки; при увеличении степени деформации порошковой проволоки минимальное значение переднего натяжения возрастает, причем при обжатии выше 30% уровень этих сил практически не меняется, также при этом наблюдается снижение коэффициента запаса прочности для материала оболочки, что может приводить к ее разрушению, изменение относительной плотности сердечника в зависимости от степени деформации проволоки носит нелинейный характер, при этом интенсивность увеличения плотности при обжатии более 30% резко снижается, что обусловлено снижением деформации порошковой составляющей композиции.

6 На основе теоретического анализа условий плющения порошковых материалов в металлической оболочке с использованием методов конечных разностей и конечных элементов установлено влияние толщины и материала оболочки порошковой ленты на энергосиловые параметры процесса. Установлено, что составляющая силы от деформации оболочки может быть соизмерима с силой от деформации порошкового сердечника, а также превышать ее в несколько раз в зависимости от величины обжатия, материала и толщины оболочки, то есть параметры оболочки весомо воздействуют на величину энергосиловых параметров процесса, что необходимо учитывать при проектировании рабочих клеток и выборе мощности приводов. Установлено, что наиболее равномерная деформация порошкового сердечника наблюдается при больших обжатиях, при обжатиях менее 25% недеформированными остаются боковые кромки заготовки, что снижает их эксплуатационные свойства.

7 На основе экспериментальных исследований процессов изготовления длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке установлена адекватность разработанных математических моделей. По результатам экспериментальных исследований прокатки порошковых лент установлено, что значения

сил прокатки, полученных в ходе теоретических и экспериментальных исследований, совпадают, погрешность вычислений не превысила 10% со среднеквадратичным отклонением 2,76%. Также установлено, что при прокатке по предложенной технологии (за два прохода с последовательной засыпанием компонентов в металлическую оболочку), относительная плотность сердечника повышается при одинаковых режимах прокатки и сохраняется при этом размер фракции порошка, является необходимым условием для данной технологии производства. Экспериментальное исследование волочения порошковых проволок показало, что погрешность расчета силы волочения не превысила 12%, а плотности – 9%. Экспериментальные исследования плющения порошковой проволоки показали, что погрешность расчета силы прокатки составила 1,0...16,3% со среднеквадратичным отклонением 5,39%, что свидетельствует о достаточной адекватности модели.

8 На основе анализа результатов численной реализации разработанных математических моделей процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков в оболочке исследовано влияние и сформулированы рекомендации по выбору исходных технологических и конструктивных параметров, обеспечивающих необходимую плотность порошкового сердечника и геометрических характеристик готовой металлопродукции. Установлено, что при прокатке порошковых лент максимальное обжатие за проход составляет 75%, при котором относительная плотность порошкового сердечника достигает единицы; при увеличении отношения толщины насыпного слоя к толщине уплотненного слоя до 0,4 конечная толщина уплотненного слоя уменьшается, причем практически линейно.

9 На основе соответствующих детерминированных решений и метода Монте-Карло разработан комплекс имитационных математических моделей процессов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков в оболочке, позволяющие теоретически прогнозировать вероятностный характер изменения всех результирующих параметров и, как следствие, прогнозировать точность геометрических характеристик и степень стабильности плотности порошкового материала в зависимости от исходных параметров заготовки. Определены количественно диапазоны изменения соответствующих коэффициентов

вариации геометрических размеров готового изделия и плотности порошкового сердечника. Установлено, что наиболее весомым фактором, влияющим на разнотолщинность проката и распределение плотности порошкового сердечника является радиальное биение валков; вариация исходных параметров процесса прокатки имеет наибольшее воздействие на силу прокатки (до 10%) и конечную толщину порошкового сердечника (до 5%), в то время как на конечную относительную плотность эта вариация имеет незначительное влияние; наиболее равномерное распределение пористости наблюдается при обжатии на уровне 35%. На основе анализа реализации конечно-элементной модели прокатки порошковых лент в металлической оболочке установлено, что наиболее равномерное распределение плотности порошкового сердечника регламентированное стандартами наблюдается при обжатии на уровне 25...35%, при этом для порошковых лент шириной 10...15 мм, рекомендованная величина обжатия не должна превышать 25%, для лент шириной 20 мм – 35% при радиусе валков больше 50 мм ($L/h_{cp} > 1,9$)

10 На основе автоматизированного проектирования технологических режимов изготовления длинномерных изделий из металлопорошков в оболочке сформулированы и решены программно задачи обеспечения необходимой плотности порошкового материала и необходимых геометрических характеристик готового изделия в зависимости от исходной плотности порошка, величины обжатия, материала, формы и толщины оболочки, что позволило определить рациональные режимы деформации, количество переходов и осуществить оптимальный выбор заготовки.

11 Результаты диссертационной работы в виде программных продуктов, технических решений и практических рекомендаций использованы на ПАО «Научно-исследовательский и проектно-технологический институт машиностроения» (г. Краматорск), ЧАО «Финпрофиль» (г. Харьков), ЧАО «Краматорский завод металлических конструкций» (г. Краматорск), ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» (г. Краматорск) и в Донбасской государственной машиностроительной академии. Экономический эффект за счет снижения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технологических работ составил 2653 тыс. гривен.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Наплавочные порошковые ленты и проволоки : справочник / П. В. Гладкий, И. А. Кондратьев, В. И. Юматова, А. П. Жудра. – К. : Техніка, 1991. – 36 с.
2. Structure and properties of hot-rolled strips obtained from titanium chips without chip remelting / A. V. Mal'kov, V. V. Shevchenko, I. D. Nizkin, E. V. Luk'yanova // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2008. – № 49(4). – pp. 258–260. – doi: 10.3103/S1067821208040081.
3. Mal'tsev I. M. Electroplastic Rolling of Metals with a High-Density Current / I. M. Mal'tsev // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2008. – № 49(3). – pp. 175–180. – doi: 10.3103/S1067821208030097.
4. Mal'tsev I. M. The effect of the electromagnetic field and skin and pinch effects on electrorolling metal powder materials under high-density pulse currents / I. M. Mal'tsev // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2009. – № 50(2). – pp. 142–146. – doi: 10.3103/S1067821209020138.
5. Mal'tsev I. M. Electrical rolling of a metal powder in roll electrodes with a high-density current / I. M. Mal'tsev // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2010. – № 51(4). – pp. 342–346. – doi: 10.3103/S1067821210040152.
6. Saifullin R. N. Production of metal mesh-based sintered powder bands using electrocontact rolling / R. N. Saifullin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2009. – № 50(5). – pp. 518–521. – doi: 10.3103/S1067821209050150.
7. Износостойкая наплавка ленточным порошковым электродом / О. А. Бакши [и др.]. // Сварочное производство. – 1960. – № 3. – С. 30–33.
8. Юзвенко Ю. А. Порошковая плющенко для наплавки / Ю. А. Юзвенко, Г. А. Кирилюк, С. Е. Кривчиков // Автоматическая сварка. – 1976. – № 7. – С. 73–74.
9. Юзвенко Ю. А. Порошковая электродная лента / Ю. А. Юзвенко // Автоматическая сварка. – 1960. – № 9. – С. 86–87.

10. Походня И. К. Перспективы развития производства сварочных материалов и пути повышения их качества / И. К. Походня // Сварочное производство. – 1989. – № 9. – С. 18–21.
11. Юзвенко Ю. А. Химическая неоднородность наплавленного слоя / Ю. А. Юзвенко, Б. А. Горпенюк, В. Л. Корбут // Автоматическая сварка. – 1978. – № 3. – С. 22–26.
12. Чигарев В. В. Порошковые ленты для наплавки / В. В. Чигарев, А. Г. Белик // Сварочное производство. – 2011. – № 8. – С. 38–44.
13. Чигарев В. В. Выбор оптимальных параметров порошковой ленты / В. В. Чигарев, П. Ф. Лаврик, О. В. Якименко // Сварочное производство. – 1980. – № 9. – С. 19–21.
14. Любич А. И. Порошковая проволока для наплавки деталей, работающих в условиях абразивного изнашивания / А. И. Любич // Сварочное производство. – 1992. – № 3. – С. 15.
15. Воропай Н. М. Технология изготовления плющеной проволоки для механизированной сварки / Н. М. Воропай, В. Г. Мищанин, В. А. Богдановский // Автоматическая сварка. – 1980. – № 12. – С. 66–67.
16. Чигарев В. В. Износостойкая наплавка порошковой лентой / В. В. Чигарев, А. Г. Белик, Т. Н. Филиппенко // Сборник научных работ национального университета кораблестроения. – 2009. – № 3. – С. 168–175.
17. Чигарев В. В. Производство и применение порошковых лент для наплавки износостойких сплавов / В. В. Чигарев // Автоматическая сварка. – 1994. – № 2. – С. 51–52.
18. Рябцев И. А. Наплавочные материалы для механизированных способов дуговой наплавки / И. А. Рябцев, Ю. М. Кусков // Сварка и родственные процессы в промышленности : доклады 2-го научно-технического семинара, 17 апреля 2007 г. – К. : Экотехнология, 2007. – С. 24–30.
19. Походня И. К. Сварка порошковой проволокой / И. К. Походня, А. М. Суптель, В. Н. Шлепаков. – К. : Наукова думка, 1972. – 223 с.

20. Пацкевич И. Р. О химической неоднородности слоя, наплавленного порошковой лентой в углекислом газе / И. Р. Пацкевич, Л. А. Хейфец // Автоматическая сварка. – 1971. – № 11. – С. 66–67.

21. Werner Hohn. Fulldratte im Spiegel der Patentliteratur / Hohn Werner // Zis-Mittei Lungen. – 1969. – Nr. 6. – P. 915–925.

22. Наплавка быстроизнашивающихся деталей самозащитными порошковыми лентами / Б. В. Данильченко [и др.]. // Автоматическая сварка. – 1989. – № 5. – С. 38–41.

23. Шимановский В. П. Материалы и оборудование для наплавки конусов и чаш доменных печей / В. П. Шимановский, А. П. Ворончук, С. М. Звездин // Оборудование и материалы для наплавки. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона, 1990. – С. 71–73.

24. Оборудование и материалы для наплавки листовых футеровочных элементов / А. П. Жудра, А. П. Ворончук, А. А. Фомакин, С. И. Великий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 6. – С. 53–55.

25. Новое оборудование для наплавки конусов и чаш засыпных аппаратов / А. П. Жудра, А. П. Ворончук, А. А. Фомакин, С. И. Великий // Автоматическая сварка. – 2009. – № 9. – С. 57–59.

26. Жудра А. П. Износостойкая наплавка порошковыми лентами / А. П. Жудра, А. П. Ворончук // Сварщик. – 2010. – № 6. – С. 6–10.

27. Автоматическая износостойкая наплавка зубьев ковша погрузчика Д-561 Б порошковой лентой ПЛ-АН 101 / Г. А. Кортелев [и др.]. // Сварочное производство. – 1973. – № 11. – С. 38–39.

28. Автоматическая наплавка порошковой лентой ПЛ-АН-101 лопастей шнеков / Г. А. Кортелев [и др.]. // Автоматическая сварка. – 1975. – № 2. – С. 49–50.

29. Кортелев Г. А. Автоматическая наплавка порошковой лентой ПЛУЗОХЗОГЗТЮ зубьев ковшей экскаватора Э-652 / Г. А. Кортелев, В. П. Жеряков, А. А. Черепяхин // Сварочное производство. – 1972. – № 12. – С. 32–34.

30. Еремеев В. Б. Механизированная наплавка изношенных деталей арматуры тепловых электростанций / В. Б. Еремеев // Наплавка. Опыт и эффективность применения. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона, 1985. – С. 41–44.

31. Еремеев В. Б. Разработка порошковой проволоки и ленты для наплавки трубопроводной арматуры / В. Б. Еремеев, Ю. З. Стреляный, И. И. Фруммин // Теоретические и технологические основы наплавки. Наплавочные материалы. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР. – 1978. – С. 3–7.

32. Николаенко М. Р. Неоднородность металла, наплавленного порошковым ленточным электродом / М. Р. Николаенко, Н. А. Гринберг // Технология и оборудование сварочных и наплавочных работ. – Тула, 1976. – С. 127–131.

33. Николаенко М. Р. Влияние бора, ванадия и никеля на структуру и свойства высокохромистых чугунов, наплавленных порошковой лентой / М. Р. Николаенко, Г. А. Кортелев, Н. А. Гринберг // Сварочное производство. – 1973. – № 4. – С. 32–34.

34. Пацкевич И. Р. Тепловой баланс дуги при наплавке порошковой лентой / И. Р. Пацкевич, А. М. Рыков // Сварочное производство. – 1972. – № 2. – С. 7–9.

35. Пацкевич И. Р. Опыт применения и перспективы развития наплавки порошковой ленты / И. Р. Пацкевич // Высокопроизводительные процессы наплавки и наплавочные материалы : материалы Всесоюз. совещ. – Коммунарск, 1973. – Киев : ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР, 1973. – С. 14–18.

36. Пацкевич И. Р. Статические характеристики дуги при наплавке порошковой лентой / И. Р. Пацкевич, А. М. Рыков // Сварочное производство. – 1973. – № 2. – С. 9–11.

37. Прокатное производство: справочник / Б. С. Азаренко [и др.]. ; под ред. Е.С. Рокотяна. – М. : Metallurgizdat, 1962. – Т. 1. – 744 с.

38. Rosert R. Application of flux-cored wires for welding in industry / R. Rosert // The Paton Welding Journal. – 2014. – № 6–7. – pp. 57–61. – <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2014.06.11>.

39. Исследования и разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области электродуговой сварки и наплавки порошковой проволокой (Обзор) / И. К. Походня, В. Н. Шлепаков, С. Ю. Максимов, И. А. Рябцев // Автоматическая сварка. – 2010. – № 12 (692). – С. 34–42.

40. Шлепаков В. Н. Современное состояние разработки и применение порошковых проволок для сварки углеродистых и низколегированных сталей / В. Н. Шлепаков, Ю. А. Гаврилюк, А. С. Котельчук // Автоматическая сварка. – 2010. – № 3 (683). – С. 46–51.

41. Современные методы ввода модификаторов в расплавы чугуна и стали / В. И. Жучков, О. Ю. Шешуков, Е. Ю. Лозовая, Л. А. Маршук. – Модифицирование как эффективный метод повышения качества чугунов и сталей : сб. докладов Литейного консилиума № 1. – Челябинск : Челябинский Дом печати, 2006. – С. 52.

42. Производство порошковой проволоки с фальцевым швом / В. Д. Есипов [и др.]. // Сталь. – 2000. – № 12. – С. 48–49.

43. Формовочный стан для производства порошковой проволоки с замковым соединением / В. Д. Есипов [и др.]. // Черные металлы. – 1998. – № 8. – С. 23–24.

44. Походня И. К. Изготовление порошковой проволоки из лент разных размеров / И. К. Походня, В. Ф. Альтер, П. И. Рак // Сварочное производство. – 1980. – № 10. – С. 14–15.

45. Грозданов П. К. Изыскание и исследование композиционного сплава для износостойкой наплавки : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.03.06 / ИЭС им. Е. О. Патона. – К., 1973. – 28 с.

46. Виноградов Г. А. Прокатка металлических порошков / Г. А. Виноградов, Ю. Н. Семенов. – М. : Metallurgizdat, 1960. – 87 с.

47. Аксенов Г. И. Прокатка металлических порошков в валках / Г. И. Аксенов, Ю. К. Семенов. – Филиал ВИНТИ, 1957. – 23 с.

48. Pat. 2009-149960 Japan, МПК В 22 F 7/04, 3/18 (2006.01). Powder-rolling apparatus and powder-rolling method / Mochizuki Tomotoshi, Shinozawa

Kazuhiro ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2007-330997 ; заявл. 21.12.07 ; опубл. 09.07.09.

49. Osakada K. Analytical methods for plastic working of cintered metals / K. Osakada, S. Shima // 6 [sixth] Internationale Pulvermetallurgische Tagung in der DDR. – 1977. – Bd. 1.s. 11/1-11/16.

50. Каташинский В. П. Прокатка порошковых композиционных материалов, армированных сетками / В. П. Каташинский, Л. Р. Вишняков // Порошковая металлургия. –1996. – № 3/4. – С. 15–19.

51. А. с. 764847 СССР, МКИ В 22 F 3/18. Способ получения пористого материала на основе железа / Е. И. Астров, Ю. А. Шоткин, В. А. Хренов и др. (СССР). – № 2617001/22-02 ; заявл. 15.05.78 ; опубл. 23.09.80, Бюл. 35. – 4 с.

52. Пат. 4042384 США, МКИ В 22 F 1/00, 7/00. Production of Metal Strip from powder / George Jackson, Terence Fieldsend; British Steel Corp. ; опубл. 16.08.77.

53. А. с. 728998, СССР, МКИ В22 F3/20 Устройство для экструзии материалов / И. П. Кожевников, М. М. Павлов (СССР). – № 2696464/22-02 ; заявл. 30.10.78 ; опубл. 25.04.80, Бюл 15. – 3 с. : ил.

54. Корнилов В. Н. Интенсификация процесса схватывания гранул при прокатке / В. Н. Корнилов // Всес. конф. по металлургии гранул : тез. докл. – М., 1991. – С. 20.

55. Либенсон Г. А. Процессы порошковой металлургии. В 2 т. Т. 2. Формование и спекание : учебник для вузов / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М. : МИСИС, 2002. – 320 с.

56. Pat. 2008-202085 Japan, МПК В 22 F 3/18 (2006.01). Method for controlling layer thickness of powder on roll face in material compression working equipment, and device therefor / Mochizuki Tomotoshi ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2007-037909 ; заявл. 19.02.07 ; опубл. 04.09.08.

57. Pat. 2009-095871 Japan, МПК В 23 К 35/40, 35/14 (2006.01), В 22 F 3/18, 3/035 (2006.01), В 22 F 3/02 (2006.01). Manufacturing facility and manufacturing method of clad brazing filler metal / Suzuki Kenji, Yoneyama Natsuki, Mochizuki Tomotoshi ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2007-271199 ; заявл. 18.10.07 ; опубл. 07.05.09.

58. Pat. 2007-270307 Japan, МПК В 22 F 3/18 (2006.01). Metallic material working apparatus and metallic material working method / Tazoe Nobuhiro ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2006-099621 ; заявл. 31.03.06 ; опубл. 18.10.07.

59. Pat. 2011-144424 Japan, МПК В 22 3/18 (2006.01), Н 01 М 4/68 (2006.01). Method for manufacturing lead alloy sheet and apparatus used in the same / Suzuki Atsushi, Machiyama Yoshiaki, Takahashi Satoru ; заявитель и патентообладатель Shin kobe electric mach co LTD (Япония). – № 2010-006491 ; заявл. 15.01.10 ; опубл 28.07.11.

60. Pat. 2008-202111 Japan, МПК В 22 F 3/18 (2006.01). Facility for compression-working of material / Tazoe Nobuhiro ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2007-040778 ; заявл. 21.02.07 ; опубл. 04.09.08.

61. Pat. 2008-196018 Japan, МПК В 22 F 3/18 (2006.01), В 24 В 5/37(2006.01). Material compression working apparatus / Tazoe Nobuhiro ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2007-033516 ; заявл. 14.02.07 ; опубл. 28.08.08.

62. Pat. 2005-353653 Japan, МПК В 22 F 3/18, Н 01 F 41/02. Anisotropical rare-earth sheet magnet and its manufacturing method / Kobayashi Osamu, Menjo Noboru ; заявитель и патентообладатель Minebea Co LTD (Япония). – № 2004-169742 ; заявл. 08.06.04 ; опубл. 22.12.05.

63. Pat. 2005-340261 Japan, МПК В 22 F 3/18, 3/24, Н 01 F 41/02, 1/053 /. Rare earth thin plate magnet and manufacturing method thereof / Menjo Noboru, Kobayashi Osamu ; заявитель и патентообладатель Minebea Co LTD (Япония). – № 2004-153208 ; заявл. 24.05.04 ; опубл. 08.12.05.

64. Технология и оборудование для производства композиционных заготовок тяжело нагруженных подшипников скольжения, используемых в металлургическом производстве / А. В. Сатонин, С. М. Романов, А. Н. Левкин, Ю. А. Воробьев, Э. П. Грибков // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь : ПГТУ, 1998. – Вып. 3. – С. 229–234.

65. Pat. 2011-153355 JAPAN, МПК В 22 F 3/18, 1/00, 7/02 (2006.01), В 23 К 35/40, 35/14 (2006.01), В 30 В 11/00, 11/18 (2006.01), В 23 Р 6/00 (2006.01), С 22 С 30/00 (2006.01). Functional sheet and method for strengthening surface of metallic product using the same / Yoneyama Natsuki, Yoshihisa Junichi; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония).– № 2010-016014 ; заявл. 27.01.10 ; опубл. 11.08.11.

66. Pat. 2011-149058 Japan, МПК В 22 F 7/02 (2006.01), В 23 К 20/04, 35/40, 35/14, 1/00, 103/08 (2006.01), F 01 D 5/28, 25/00 (2006.01), F 02 С 7/00 (2006.01), В 22 F 30/00 (2006.01). Function separation type functional joining sheet and method for strengthening surface of metal product using the same / Yoneyama Natsuki, Yoshihisa Junichi ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2010-011277 ; заявл. 21.01.10 ; опубл. 04.08.11.

67. Pat. CN103817330 (A) IPC B22F3/18; B22F7/02; C22C19/03; C22C19/05. Method of preparing strong-cubic texture composite base band for coating superconductor by metal powder rolling / Suo Hongli; Meng Yichen; Wang Yi; Ma Lin; Tian Hui; Liang Yaru; Peng Faxue; Wang Pan / UNIV BEIJING TECHNOLOGY 2014-05-28 Application number: CN2014184297 20140308 Priority number(s): CN2014184297 20140308.

68. Пат. 4045857 США, МКИ В 22 F 3/24. Method for manufacture of aluminum sheet and sintered high-density aluminum laminate by direct powder rolling process / Yoshikazu Suzuki ; заявитель и патентообладатель Agency of Industrial Science & Technology. – № 521369 ; заявл. 06.11.74 ; опубл. 6.09.77.

69. Крупногабаритные подшипники скольжения / С. Н. Бошин [и др.]. – Ярославль : Верхне-Волжское кн. изд-во, 1977. – 180 с.

70. Pat. 2009-155713 Japan, МПК В 22 F 7/04, 3/18 (2006.01), С 23 С 24/06, 24/08 (2006.01), В 32 В 15/08(2006.01). Coating method / Yoneyama Natsuki, Mochizuki Tomotoshi ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2007-338511 ; заявл. 28.12.07 ; опубл. 16.07.09.

71. Pat. 2009-172618 Japan, МПК В 23 К 35/40, 35/22, 35/30, 35/14 (2006.01), В 22 F 7/04, 3/18 (2006.01). Method or producing silver-containing clad sheet / Sakamoto Rie, Yoneyama Natsuki, Mochizuki Tomotoshi ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2008-011521 ; заявл. 22.01.08 ; опубл. 06.08.09.

72. Pat. 2004-082218 Japan, МПК В 22 F 3/18, 3/02, В 23 К 35/40. Brazing filler metal sheet and method for manufacturing the same / Mochizuki Tomotoshi, Iwasaki Takayuki, Yoshizawa Koki ; заявитель и патентообладатель IshikaWajima Harima Heavy ind со LTD (Япония). – № 2003-192901 ; заявл. 07.07.03 ; опубл. 18.03.04.

73. Заявка 4-40402 Япония, МКИ В 22 F 7/04; F 16 С 33/14. Способ получения композиционного материала / Дайдо метару когё К. К. ; заявл. 02.09.85. – № 60-193384 ; опубл. 02.07.92. – № 62-54003.

74. Францевич И. Н. Порошковая металлургия / И. Н. Францевич. – М. : Знание, 1958. – 164 с.

75. Benesovski F. Fundamental principles of Powder Metallurgy / F. Benesovski, W. D. Jones. – London : Edward Arnold Ltd, 1960. – 1032 p. DOI: 10.1002/maco.19620130119.

76. Pat. 2003-194061 Japan, МПК F 16 С 33/12, 9/04, 33/14, В 22 F 3/24, 7/04, 3/18, 7/00, С 22 С 9/00, С 23 С 28/00, 24/08. Copper-based sintered sliding material and its manufacturing method / Saito Koji, Inoue Eisaku, Fujita Masahito, Shibayama Takayuki ; заявитель и патентообладатель Daido Metal со LTD (Япония). – № 2001-397444 ; заявл. 27.12.01 ; опубл. 09.07.03.

77. А. с. 621473 СССР, МКИ В 22 F 3/18. Устройство для прокатки металлических порошков / Е. И. Астров [и др.]. (СССР). – № 2354396 /22-02 ; заявл. 26.04.76 ; опубл. 30.08.78, Бюл. 32. – 2с. : ил.

78. Заявка 2025467 Великобритания, МКИ³ В 22 F7/00. Forming bearings by coating with metal powders and heating and compacting / Glyco-METALLWERKE DAELLEN BLOOS GMBH. ; заявл. 06.07.79 ; опубл. 23.01.80. – № 4745.

79. Заявка 55-2441 Япония, МКИ В 22 F 7/04; В 22 F 3/24; В 22 С 33/12. Многослойный материал для деталей скольжения и способ его изготовления / Дайдо мэтару когё К.К. ; заявл. 08.08.75. – № 50-96325 ; опубл. 21.01.80. – № 3-62.

80. Заявка 1483328 Великобритания, МКИ В 22 F 7/04. Process of making composite bearing material / Federal-Mogul Corporation ; опубл. 17.08.77. – № 4612.

81. Технология и оборудование для производства композиционных заготовок тяжело нагруженных подшипников скольжения, используемых в металлургическом производстве / А. В. Сатонин, С. М. Романов, А. Н. Левкин, Ю. А. Воробьев, Э. П. Грибков // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь : ПГТУ, 1998. – № 3. – С. 65–68.

82. А. с. 123271 СССР, МКИ В 23 К30/16. Порошковый электрод / Г. П. Клековкин, О. А. Бакши, Т. В. Сумина, Е. Ф. Белоусов (СССР). – № 617960/25 ; заявл. 30.01.59 ; опубл. 23.10.59, Бюл. № 20. – с. 2. : ил.

83. А. с. 143180 СССР, МКИ В 23 К 30/16. Порошковый электрод Г. П. Клековкина (СССР) ; заявитель и патентообладатель Г. П. Клековкин. – № 686397/25 ; заявл. 23.11.60 ; опубл. 10.01.62, Бюл. № 23. – с. 2. : ил.

84. А. с. 581973 СССР, МКИ В 23 К 35/48. Порошковая лента / В. В. Чигарев, В. А. Муратов, П. Ф. Лаврик, Л. А. Суржикова (СССР). – № 2342458/25-27 ; заявл. 02.04.76 ; опубл. 05.01.75, Бюл. № 1. – 2 с.

85. Чигарев В. В. Устройство для объемного дозирования шихты порошковых электродов / В. В. Чигарев, Ю. К. Кирсанов, В. Д. Тамиров // Известия высших учебных заведений. – М. : Машиностроение, 1984. – № 9. – С. 132–133.

86. Березкин П. Н. Механизация технических процессов в сварочном производстве / П. Н. Березкин, В. М. Соколовский. – Челябинск : Южно-уральское книжное издательство. – 1966. – 72 с.

87. Чигарев В. В. Влияние режимов прокатки однозамковой порошковой ленты на сварочно-технологические свойства и характер ее плавления / В. В. Чигарев, Д. А. Зареченский // Вісник приазовського державного технічного університету. – Маріуполь : ПДТУ, 2008. – № 18. – С. 166–169.
88. Ворончук А. П. Порошковые ленты для износостойкой наплавки / А. П. Ворончук // Автоматическая сварка. – 2014. – № 6–7. – С. 75–78.
89. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением ; под ред. Б. Е. Патона. – М. : Машиностроение, 1974. – 768 с.
90. А. с. 200075 СССР. Порошковая лента ПЛ-АН101 / Ю. А. Юзвенко, В. П. Шимановский, И. П. Копылец. – БИ. – 1967. – № 16.
91. Целиков А. И. Теория продольной прокатки / А. И. Целиков, Н. С. Никитин, С. Е. Рокотян. – М. : Металлургия, 1980. – 320 с.
92. Васильев Я. Д. Производство полосовой и листовой стали / Я. Д. Васильев, М. М. Сафьян. – К. : Вища школа, 1976. – 191 с.
93. Робертс В. Холодная прокатка стали / В. Робертс. – М. : Металлургия, 1981. – 544 с.
94. Серебренников А. М. Анализ состава оборудования и конструкции механизмов плющильных станов / А. М. Серебренников // Труды ВНИИМЕТ-МАШ. – 1963. – № 22. – С. 347–360.
95. Бричко Г. А. Анализ геометрических параметров плющеной ленты / Г. А. Бричко // Метизное производство. – 1972. – № 1. – С. 102–105.
96. Пат. 28829 Україна, МПК В 21 В 37/16. Спосіб отримання плющених стрічок різного типорозміру з дроту одного діаметра / В. А. Федорінов, О.В. Сатонін, К.С. Давиденко, А.І. Дворжак ; заявник та патентовласник Донбаська державна машинобудівна академія. – № 200708521; заявл. 24.07.07; опубл. 25.12.07.
97. Пат. 96603 Україна, МПК В 21 В 1/22. Спосіб одержання плющеної стрічки / С. М. Жучков, О. П. Лохматов, К. Ю. Ключніков, В. Є. Баришев, І. В. Сікачина, Ю. С. Галенко ; заявник та патентовласник Інститут чорної металургії НАН України. – № 200900462 ; заявл. 22.01.09 ; опубл. 25.11.11.

98. Ложечников Е. Б. Прокатка в порошковой металлургии / Е. Б. Ложечников. – М. : Металлургия, 1987. – 184 с.

99. Pat. 2008-214726 Japan, МПК В 22 F 7/04, 7/08, 3/18 (2006.01), В 23 К 1/00 (2006.01). Clad plate production equipment / Tazoe Nobuhiro ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2007-056903 ; заявл. 07.03.07 ; опубл. 18.09.08.

100. Pat. 2008-121050 Japan, МПК В 22 F 3/18 (2006.01). Powder sheet and powder clad production device / Tazoe Nobuhiro ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2006-304869 ; заявл. 10.11.06 ; опубл. 29.05.08.

101. Pat. 2008-106314 Japan, МПК В 22 F 3/18, 7/04 (2006.01). Powder rolling device / Tazoe Nobuhiro ; заявитель и патентообладатель IHI Corp (Япония). – № 2006-290968 ; заявл. 26.10.06 ; опубл. 08.05.08.

102. А. с. 603500 СССР, МКИ В 22 F 3/18. Рабочая клеть двухвалкового стана для прокатки порошков / Е. Б. Ложечников, В. И. Вепринцев, Г. П. Злобин, Е. И. Сапронов, Г. В. Шведков (СССР). – № 2363612/22-02 ; заявл. 20.05.76 ; опубл. 25.04.78, Бюл. № 15.– с. 3. : ил.

103. А. с. 732076 СССР, МКИ В 22 F 3/18. Стан для прокатки порошка / Е. Б. Ложечников, Е. В. Ложечников, Г. В. Шедко (СССР). – № 2638503/22-02 ; заявл. 03.07.78 ; опубл. 05.05.80, Бюл. № 17. – 3 с. : ил.

104. А. с. 1574369, СССР МКИ В 22 F 3/18. Валковый комплект для прокатки профилей из порошковых материалов / Ю. Ф.Бахматов, В. Д.Голев, Н. Г.Шафранов, А. А. Исаков (СССР). – № 4460437/31-02 ; заявл. 31.07.88 ; опубл. 30.06.90, Бюл. № 24. – 3 с. : ил.

105. Pat. US2014030430 (A1) — 2014-01-30 IPC B05D1/28 Powder-rolling device and powder-rolling method / Mochizuki Chitoshi [Jp]; Oda Tamotsu [Jp] // Mochizuki Chitoshi [Jp]; Oda Tamotsu [Jp] + Application number: US201214110464 20120409 Priority number(s): JP20110090390 20110414 ; WO2012JP59691 20120409.

106. А. с. 839692 СССР, МКИ В 22 F3/18. Устройство для прокатки трехслойной ленты из порошковых материалов/ Ю. П. Пудовиков, М. Б. Генералов

(СССР). – № 2763921/22-02 ; заявл. 05.03.79 ; опубл. 23.06.81, Бюл. № 23. – 3 с. : ил.

107. А. с. 835645 СССР, МКИ В22 F 3/18. Устройство для подачи порошка в валки прокатного стана / Е. Б. Ложечников, Ю. А. Ковалевич, Г. В. Шведко, А. Н. Демидов (СССР). – № 2741126 /22-02 ; заявл. 26.03.79 ; опубл. 07.06.81, Бюл. № 21. – 2 с. : ил.

108. Пат. 4231729 США, МКИ В 22 F 3/24. Powder rolling apparatus / John H. Tundemann, Charles V. Goodrich ; Huntington Alloys Inc. ; заявл. 9.10.79 ; опубл. 4.11.80.

109. А. с. 686819 СССР, МКИ В 22 F 3/18. Дозирующее устройство для подачи порошка в валки / К. И. Жданов [и др.]. (СССР). – № 2505847 /22-02 ; заявл. 05.07.77 ; опубл. 25.09.79, Бюл. № 35. – 3 с. : ил.

110. Pat. 2009-090337 Japan, МПК В 23 К 35/40, 35/14 (2006.01), В 22 F 3/18, 7/08 (2006.01). Brazing filler metal sheet production device, and method for producing brazing filler metal sheet / Yoneyama Natsuki, Mochizuki Tomotoshi ; заявитель IHI Corp (Япония). – № 2007-263725 ; заявл. 09.10.07 ; опубл. 30.04.09.

111. Pat. 2007-302983 Japan, МПК В 22 F 3/18 (2006.01). Apparatus for compressing material / Mochizuki Tomotoshi заявитель IHI Corp (Япония). – № 2006-135443 ; заявл. 15.05.06 ; опубл. 22.11.07.

112. Pat. 2006-057158 Japan, МПК В 22 F 3/18 (2006.01). Method for manufacturing composite material with low thermal expansivity and high thermal conductivity / Igo Yasuyuki, Fuyu Kiyouhei, Yamaguchi Hideo, Takano Yasuo ; заявитель Hitachi Cable LTD (Япония). – № 2004-242127 ; заявл. 23.08.04 ; опубл. 02.03.06.

113. Pat. 2005-139536 Japan, МПК В 22 F 3/18. Powder-rolling apparatus and method / Iwasaki Takayuki, Mochizuki Tomotoshi ; заявитель IshikaWajima Harima Heavy ind co LTD (Япония). – № 2003-379976 ; заявл. 10.11.03 ; опубл. 02.06.05.

114. Pat. JP2013060611 (A) – 2013-04-04. IPC B22F3/18; B28B3/12; H01G11/22; H01G13/00; H01M4/139. Powder rolling device, and method for producing rolled sheet // NIPPON ZEON Co +Application number: JP20110197852 20110912 Priority number(s): JP20110197852 20110912.

115. Pat. JP2013062268 (A) – 2013-04-04 IPC B65D88/26; H01G13/00; H01M4/139 Powder rolling mill and method for producing rolled sheet // NIPPON ZEON CO + Application number: JP20110197853 20110912 Priority number(s): JP20110197853 20110912.

116. Shima S. Compaction of Metal Powder by Rolling / S. Shima, M. Yamada // Powder Metallurgy. – 1984. – № 27(1).– pp. 39–44. – doi:10.1179/pom.1984.27.1.39.

117. Северденко В. П. Пластичность и обработка металлов давлением / В. П. Северденко, Е. Б. Ложечников. – Минск : Наука и техника, 1964. – 110 с.

118. Виноградов Г. А. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул / Г. А. Виноградов, В. П. Каташинский. – М. : Metallurgia, 1979. – 224 с.

119. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. – М. : Физматгиз, 1960. – 243 с.

120. Прокатка порошка титана в тонкую ленту по методу Горьковского политехнического института / Г. И. Аксенов, В. Г. Хромов, А. Н. Николаев, Ю. Н. Семенов // Титан и его сплавы. – М., 1960. – Вып. 3. – С. 152–158.

121. Жданович Г. М. Теория прессования металлических порошков / Г. М. Жданович. – М. : Metallurgia, 1968. – 258 с.

122. Цитович Н. А. Механика грунтов / Н. А. Цитович. – М. : Высшая школа, 1983. – 288 с.

123. Чекмарев А. П. Методы исследования процессов прокатки / А. П. Чекмарев, С. А. Ольдзиевский. – М. : Metallurgia, 1969. – 274 с.

124. Томленов А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М. : Metallurgia, 1972. – 408 с.

125. Губкин С. И. Пластическая деформация металлов. В 3 т. Т. 3. Теория пластической обработки металлов / С. И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1961. – 306 с.

126. Губкин С. И. Теория обработки металлов давлением / С. И. Губкин. – М. : Metallurgizdat, 1947. – 532 с.

127. Одномерное математическое моделирование процесса прокатки порошковых материалов / А. В. Сатонин [и др.]. – Р., 1992. – 15 с. – Деп. в Укр. ИНТЭИ 29.04.92, № 520. – Ук92.

128. Романов С. М. Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / С. М. Романов, А. В. Сатонин. – Р., 1993. – 16 с. – Деп. в Укр. ИНТЭИ 22.06.93, № 1193. – Ук93.

129. Прогрессивные технологические процессы штамповки деталей из порошков и оборудование / Г. М. Волкогон [и др.]; под общ. ред. А. М. Дмитриева, А. Г. Овчинникова. – М. : Машиностроение, 1991. – 320 с.

130. Ложечников Е. Б. Напряженно-деформированное состояние при прокатке порошков / Е. Б. Ложечников // Порошковая металлургия. – 1981. – № 3. – С. 13–18.

131. Аксенов Г. И. Прокатка порошка в ленту / Г. И. Аксенов, А. Н. Николаев, Ю. Н. Семенов // Вопросы порошковой металлургии и прочности материалов. – К. : Изд. АН УССР, 1955. – Вып. 2. – С. 119–140.

132. Каташинский В. П. Неравномерность деформации и распределение напряжений по ширине порошкового проката / В. П. Каташинский, Г. А. Виноградов, Г. Я. Калущкий // Порошковая металлургия. – 1975. – № 12. – С. 28–32.

133. Каташинский В. П. Применение метода крупных частиц для моделирования пластической деформации порошковых материалов при прокатке / В. П. Каташинский, А. Л. Новофастовский // Порошковая металлургия. – 1990. – № 6. – С. 27–32.

134. Мусихин А. М. Определение поля скоростей при прокатке пористых материалов / А. М. Мусихин // Порошковая металлургия. – 1988. – № 5. – С. 1–6.
135. Друянов Б. А. Прикладная теория пластичности пористых тел / Б. А. Друянов. – М. : Машиностроение, 1989. – 168 с.
136. Гениев Г. А. Динамика пластической и сыпучей среды / Г. А. Гениев, М. И. Эстрин. – М. : Стройиздат, 1972. – 216 с.
137. Перельман В. Е. Формирование порошковых материалов / В. Е. Перельман. – М. : Металлургия, 1979. – 232 с.
138. Степаненко А. В. Геометрические и энергосиловые параметры процесса прокатки металлических порошков. I. Границы очага деформации и поля напряжений в зонах отставания и опережения / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич, В. Е. Харлан // Порошковая металлургия. – 1990. – № 2. – С. 13–17.
139. Степаненко А. В. Геометрические и энергосиловые параметры процесса прокатки металлических порошков. II. Мощность, момент, контактные напряжения прокатки и распределение плотности в очаге деформации / А. В. Степаненко, Л. А. Исаевич, В. Е. Харлан // Порошковая металлургия. – 1991. – № 2. – С. 13–17.
140. Katashinskii V. P. Stress-strain state of powder being rolled in the densification zone. I. Mathematical model of rolling in the densification zone / V. P. Katashinskii, M. B. Shtern // Powder Metall. Met. Ceram. – 1983. – № 22 (11). – pp. 882–885. – doi 10.1007/BF00805540.
141. Katashinskii V. P. Stress-strain state of powder being rolled in the densification zone / V. P. Katashinskii, M. B. Shtern // Powder Metall. Met. Ceram. – 1983. – № 22(12). – pp. 972–976. – doi 10.1007/BF00802421.
142. Stepanenko A. V. Geometric and power parameters of the metal powder rolling process. I. Boundaries of the seat of deformation and stress field in the lag and forward slip zones / A. V. Stepanenko, L. A. Isaevich, V. E. Kharlan // Powder Metall. Met. Ceram. – 1990. – № 29(2). – pp. 101–105. – doi 10.1007/BF00794530.

143. Stepanenko A. V. Geometric and energy-force parameters of the process of rolling of metal powders II. The rolling power, moment, and contact stresses and distribution of density in the area of deformation / A. V. Stepanenko, L. A. Isaevich, V. E. Kharlan // Powder Metall. Met. Ceram. – 1991. – № 30(2). – pp. 101–105. – doi 10.1007/BF00797280.

144. Драгобецкий В. В. Решение одномерной задачи пластического деформирования двухслойной порошковой заготовки при импульсном нагружении / В. В. Драгобецкий, Д. В. Савелов // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. – 2015. – № 2. – С. 126-130.

145. Ренне И. И. Оценка параметров прокатки двухслойной полосы, содержащей пористый слой / И. И. Ренне // Порошковая металлургия. – 1988. – № 3. – С. 26–29.

146. Кулешов И. Е. Методика расчета энергосиловых параметров прокатки биметаллических материалов из порошков / И. Е. Кулешов // Сталь. – 1989. – № 9. – С. 90–93.

147. Manufacturing of High-Performance Al356/SiCp Composite by CAR Process / S. Amirkhanlou, R. Jamaati, B. Niroumand, M. R. Toroghinejad // Materials and Manufacturing Processes. – 2011. – № 26. – pp. 902–907. – doi:10.1080/10426914.2011.577879.

148. Воробьев Ю. А. Совершенствование технологических режимов и конструктивных параметров механического оборудования для реализации процессов прокатки порошковых материалов на металлической подложке : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.05 : защищена 26.04.01 : утв. 13.06.01 / Воробьев Юрий Анатольевич. – Краматорск, 2001. – 245 с.

149. Штібен В. Ф. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов на металлической подложке / В. Ф. Штібен, Ю. А. Воробйов, Е. П. Грибков // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. 4. – С. 123–128.

150. Воробйов Ю. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / Ю. А. Воробйов, Э. П. Грибков // Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии. – Донецк : ЛИК, 1998. – С. 151–156.

151. Морозов И. А. Точность геометрических характеристик композиционных материалов, полученных на основе процесса прокатки порошков / И. А. Морозов, Ю. А. Воробъев, Э. П. Грибков // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск ДГМА, 1998. – Вып. 4. – С. 100–104.

152. Льовкін О. М. Напряженно-деформированное состояние при прокатке порошковых материалов на металлической подложке / О. М. Льовкін, Ю. А. Воробйов, Э. П. Грибков // Наука, производство, предпринимательство – развитию металлургии. – Донецк : ЛИК, 1998. – С. 146–151.

153. Романов С. М. Автоматизированное проектирование технологических режимов процесса первичной и вторичной прокатки порошковых материалов / С. М. Романов, Ю. А. Воробъев, Э. П. Грибков // Совершенствование процессов и оборудования обработки давлением в металлургии и машиностроении : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – Вып. 4. – С. 95–99.

154. Гогаев К. А. Порошковая металлургия инструментальных сталей / К. А. Гогаев, В. И. Ульшин // Нац. акад. наук Украины, Ин-т проблем материаловедения им. И. Н. Францевича. – Донецк : Ноулидж, Донец. отд-ние, 2012. – 367 с.

155. Gogaev K. A. Contact stresses in the deformation zone and average pressure during asymmetric rolling of metal powders / K. A. Gogaev, G. Ya. Kalutskii, V. S. Voropaev // Powder Metallurgy And Metal Ceramics. – 2013. – Vol. 52. – № 3-4. – pp. 126–131. – doi: 10.1007/s11106-013-9504-z.

156. Hirohata T. Experiment on metal powder compaction by differential speed rolling / T. Hirohata, S. Masaki, S. Shima // J. Mater. Process. Technol. – 2001. – № 111. – pp. 113–117. – doi: 10.1016/S0924-0136(01)00492-7.

157. Guigon P. Roll press design-influence of force feed systems on compaction / P. Guigon, O. Simon // Powder Technology. – 2003. – № 130. – pp. 257–264. – doi: 10.1016/S0032-5910(02)00223-1.

158. Simon O. Correlation between powder-packing properties and roll press compact heterogeneity / O. Simon, P. Guigon // Powder Technology. – 2003. – № 130. – pp. 257–264. – doi: 10.1016/S0032-5910(02)00202-4.

159. Es-Saheb M. H. Diametral compression test: validation using finite element analysis / M. H. Es-Saheb, A. Albedah, F. Benyahia // Int J Adv Manuf Technol. – 2011. – № 57 (5-8). – pp. 501–509. – doi: 10.1007/s00170-011-3328-0.

160. Modeling the powder compaction process using the finite element method and inverse optimization / M. Hrairi, H. Chtourou, A. Gakwaya, M. Guillot // Int J Adv Manuf Technol. – 2011. – № 56(5-8). – pp. 631–647. – doi: 10.1007/s00170-011-3211-z.

161. Keshavarz Sh. Genetic algorithm-based numerical optimization of powder compaction process with temperature-dependent cap plasticity model / Sh. Keshavarz, A. R. Khoei, Z. Molaeinia // Int J Adv Manuf Technol. – 2013. – № 64(5-8). – pp. 1057–1072. – doi: 10.1007/s00170-012-4053-z.

162. Tseng H-C. An analysis of the formability of aluminum/copper clad metals with different thicknesses by the finite element method and experiment / H-C. Tseng, C. Hung, C-C. Huang // Int J Adv Manuf Technol. – 2010. – № 48 (9-12). – pp. 1029–1036. – doi: 10.1007/s00170-009-2446-4.

163. Numerical simulation and experimental study on geometry variations and process control method of vertical hot ring rolling / X. Wang, L. Hua, X. Han, X. Wang, D. Wang, Y. Liu // Int J Adv Manuf Technol. – 2014. – № 73(1-4). – pp. 389–398. – doi: 10.1007/s00170-014-5770-2.

164. Zheng Z.-X. Experimental and numerical modeling for powder rolling / Z.-X. Zheng, W. Xia, Z.Y. Zhou // Rev. Adv. Mater. Sci. – 2013. – № 33. – pp. 330-336. – http://www.ipme.ru/e-journals/RAMS/no_43313/05_433_zheng.pdf.

165. Wang P. T. Evolution of porosity during thin plate rolling of powder-based porous aluminum / P. T. Wang, M. E. Karabin // Powder Technology. – 1994. – Vol. 78, Issue 1. – pp. 67–76. – doi: 10.1016/0032-5910(93)02768-6.

166. До питання оптимізації режимів волочіння порошкового дроту / М. Б. Штерн, Л. Н. Ткаченко, О. Г. Кіркова, А. В. Кузьмов, О. П. Майданюк // Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. – Київ : ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2009. – № 11. – С. 111–117.

167. Дослідження процесу ущільнення порошкового осердя під час волочіння порошкового дроту на основі моделі пластичного деформування пористих матеріалів / Л. Н. Ткаченко, О. Г. Кіркова, А. В. Кузьмов, М. Б. Штерн // Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві. – Київ : ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України, 2012. – № 14. – С. 116–122.

168. Simulation of Powder-Cored Wire Drawing / E. G. Kirkova, L. N. Tkachenko, A. V. Kuz'mov, M. B. Shtern, A. P. Maidanyuk // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – November 2013. – Volume 52. – Issue 7. – pp. 393–400. – doi: 10.1007/s11106-013-9539-1.

169. Kazeminezhad M. An experimental investigation on the deformation behavior during wire flat rolling process / M. Kazeminezhad, Taheri A. Karimi // J Mater Process Tech. – 2005. – № 160(3). – pp. 313–320. – doi:10.1016/j.jmatprotec.2004.06.020.

170. Kazeminezhad M. A study on the cross-sectional profile of flat rolled wire/ M. Kazeminezhad, Taheri A. Karimi, Tieu A. Kiet // J Mater Process Tech. – 2008. – № 200. – pp. 325–330. – doi:10.1016/j.jmatprotec.2007.09.029.

171. Lambiase F. A Experimental and Finite Element Investigation of Roll Drawing Process / F. Lambiase, Di Ilio // J Mater Eng Perform. – 2012. – № 21(2). – pp. 161–166. – doi:10.1007/s11665-011-9932-1.

172. Pronzdizio J. Flattening of narrow and thin stainless steel strips / J. Pronzdizio // Archives of Materials Science and Engineering. – 2008. – № 29(2). – pp. 121–124. – http://www.archivesmse.org/vol29_2/29211.pdf.

173. Плеснецов С. Ю. Теоретический анализ деформированного состояния металла в местах изгиба до 180 / С. Ю. Плеснецов, О. И. Тришевский // Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ" : сб. науч. тр. Темат. вып. : Инновационные технологии и оборудование обработки материалов в машиностроении и металлургии. – Харьков : НТУ "ХПИ". – 2015. – № 24 (1133). – С. 77-86.

174. Тришевский О. И. Методика расчета технологических параметров формовки в валках периодических замкнутых гофров на листовых и гнутых профилях / О. И. Тришевский // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2012. - № 1. – С. 25-27.

175. Драгобецкий В.В. Выбор и обоснование методов теоретических исследований процесса деформирования осесимметричных заготовок /В. В. Драгобецкий, Р.Г.Пузырь, Р.Г.Аргат// Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. – 2013. – Т.1. – № 43. – С. 86-93.

176. Бобров Г. В. Окислительные процессы при плазменном напылении карбидов вольфрама / Г. В. Бобров, В. И. Привензенцев, Г. Д. Никифоров // Сварочное производство. – 1971. – № 8. – С. 13–18.

177. Чигарев В. В. Особенности наплавки композиционного сплава порошковым ленточным электродом / В. В. Чигарев. – Металл и литье Украины. – 2005. – № 7-8. – С. 70-72.

178. Порошковая металлургия и напыленные покрытия : учебник для вузов / В. Н. Анциферов [и др.]. ; под ред. Б. С. Митина. – М. : Металлургия, 1987. – С. 327–330.

179. Лебедев Б. Д. Сварочная порошковая проволока / Б. Д. Лебедев. – Харьков : ХГУ, 1973. – 95 с.

180. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М. : Мир, 1986. – 318 с.

181. Liu G. R. The Finite Element Method: A Practical Course / G. R. Liu, S. S. Quek. – Department of Mechanical Engineering, National University of Singapore. – 2003. – 348 p.

182. Боровік П. В. Теоретичні дослідження процесів обробки металів тиском на основі методу скінчених елементів : навчальний посібник / П. В. Боровік. – Алчевськ : ДонДТУ, 2012. – 170 с.

183. Манилык Т. Н. Практическое применение программного комплекса ABAQUS в инженерных задачах. Версия 6.5. / Т. Н. Манилык, К. В. Ильин // МФТИ, ТЕСИС, 2006. – 67 с.
184. Selig S. G. A Review of Finite Element Simulations of Metal Powder Die Compaction / Stanley G. Selig, Darrel A. Doman // Journal of Machinery Manufacturing and Automation. – 2014. – Vol. 3, Iss. 2. – pp. 32–40. <http://www.academicpub.org/jmma/paperInfo.aspx?paperid=15670>.
185. Santaoja K. Viskouse and elastic-plastic material model in the ABAQUS / K. Santaoja. – Espoo, 1993. – 54 p.
186. Компьютерное моделирование процессов обработки металлов давлением / В. Н. Данченко [и др.]. – Днепропетровск : Системные технологии, 2005. – 448 с.
187. Калиткин Н. Н. Численные методы / Н. Н. Калиткин. – М. : Наука, 1978. – 512 с.
188. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения ; под ред. М. М. Федорченко. – К. : Наукова думка, 1985. – 624 с.
189. Такэкава Д. Критерии текучести металлических порошковых пресовок. Фунтай реби фумацу якин / Д. Такэкава, Е. Масуда // Journal of Japan Society of Powder Metallurgy. – 1981. – V. 28. – № 3. – pp. 90–94.
190. Лаптев А. М. Построение деформационной теории пластичности пористых материалов / А. М. Лаптев // Изв. вузов. Машиностроение. – 1980. – № 4. – С. 158–163.
191. Петросян Г. Л. Деформационная теория пластичности пористых материалов / Г. Л. Петросян // Изв. вузов. Машиностроение. – 1979. – № 11. – С. 5–8.
192. Пат. 40142А Україна, МКВ В 22 F3/03. Установка для экспериментального визначення фізико-механічних властивостей порошкових ма-

теріалів / Потапкін В. Ф., Лаптев О. М., Сатонін О. В., Грибков Е. П., Воробйов Ю. А. ; заявник та патентовласник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № 2000073921 ; заявл. 04.07.00 ; опубл. 16.07.01, Бюл. № 6.

193. Методика и оборудование для экспериментального определения исходных данных на проектирование процессов обработки давлением дискретных сред / Э. П. Грибков, Е. В. Бережная, В. А. Данилюк, А. С. Селедцов // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3(32). – С. 47–52.

194. Пат. 59317 Україна, МПК В 22 F 3/03 (2006.01). Установка для экспериментального визначення основних показників фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів різноманітного скла / Сатонін О. В., Грибков Е. П., Іванов О. О., Косяков О. В. ; заявник та патентовласник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201012688 ; заявл. 26.10.10 ; опубл. 10.05.11, Бюл. № 9. – 3 с.

195. Тензометрия в машиностроении / Р. А. Макаров [и др.]. – М. : Машиностроение, 1975. – 268 с.

196. Stress state and kinematics for rolling of powdered materials on metal substrate / V. F. Potapkin, A. N. Levkin, A. V. Satonin, S. M. Romanov, Yu. A. Vorob'yev, E. P. Gribkov // Powder Metall Met C+ 39 (1-2) : 11–17. DOI: 10.1007/BF02677434.

197. Грибков Э. П. Математическое моделирование процессов изготовления порошковых лент и проволоки / Э. П. Грибков // Тези доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, Запоріжжя, 20–23 листопада 2007 р. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2007. – С. 29–30.

198. Грибков Э. П. Математическое моделирование процессов изготовления порошковых лент и проволоки / Э. П. Грибков // IX Международная конференция «Стратегия качества в промышленности и образовании» 31 мая–7 июня 2013 г. (г. Варна, Болгария). В 3 т. Т. 3. International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. – 2013. – С. 40–41.

199. Грибков Э. П. Математическое моделирование процессов обработки давлением порошковых лент и проволоки / Э. П. Грибков // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 2 (35). – С. 25–30.

200. Chigarev V.V. Investigation of the process of drawing flux-cored wire for welding copper to steel / V.V. Chigarev, P.A. Gavrish, E.P. Gribkov // *Welding International* Volume 26, Issue 9, 2012. – pp. 718–722. DOI: 10.1080/09507116.2011.653152.

201. Грибков Э. П. Моделирование напряженного состояния при волочении порошковой проволоки / Э. П. Грибков, В. Д. Кассов, И. В. Серов // *Матер. міжнар. наук.-практ. конф. «Перспективы развития горно-металлургического комплекса».* – Краматорськ : НКМЗ, 2004. – С. 90–94.

202. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния металла при прессовании осесимметричных заготовок / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков, А. Г. Чижиков, А. В. Периг // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 460–465.

203. A mathematical model of the process of rolling flux-cored tapes / V. V. Chigarev, A. G. Belik, E. P. Gribkov, P. A. Gavrish // *Welding International*. – 2015. – Vol. 29, Issue 1. – pp. 70–74. DOI:10.1080/09507116.2014.888192.

204. Математическое моделирование напряжений и деформаций при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электродотактной наплавки / Э. П. Грибков, Е. В. Бережная, В. А. Данилюк, К. Д. Махмудов // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1(30). – 320 с. – С. 61–64.

205. Воробьев Ю. А. Экспериментальный метод для определения физико-механических свойств порошка / Ю. А. Воробьев, В. Г. Попик, Э. П. Грибков // *Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії : зб. наук. пр.* – Краматорськ : ДДМА, 1999. – Вип. 5. – С. 226–228.

206. Патент на корисну модель 59317 Україна, МПК В 22 F 3/03 (2006.01). Установа для експериментального визначення основних показників фізико-механічних властивостей порошкових матеріалів різноманітного скла / Сатонін О. В., Грибков Е. П., Іванов О. О., Косяков О. В. ; заявник та патентовласник Донбас. держ. машинобуд. акад. – № u201012688 ; заявл. 26.10.10 ; опубл. 10.05.11, Бюл. № 9. – 3 с.

207. Методика и оборудование для экспериментального определения исходных данных на проектирование процессов обработки давлением дискретных сред / Э. П. Грибков, Е. В. Бережная, В. А. Данилюк, А. С. Селедцов // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 3 (32). – С. 137–141.

208. Кожевникова И. А. Развитие теории тонколистовой прокатки для повышения эффективности работы широкополосных станов / И. А. Кожевникова, Э. А. Гарбер // М-во образования и науки Рос. Федерации, Федер. агентство по образованию, Череповец. гос. ун-т, металлург. фак. – Череповец : ЧГУ, 2010. – 274 с. : ил. ; 21 см. – Библиогр.: с. 265-274. – 25 экз. – ISBN 978-5-85341-394-8.

209. Федоринов В. А. Технологии, оборудование и методы расчета процессов холодной полистовой прокатки : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, М. В. Федоринов. – Краматорск : ДГМА, 2012. – 268 с. – 978-966-379-529-4.

210. Управление качеством тонколистового проката / В. Л. Мазур, А. М. Сафьян, И. Ю. Приходько, А. И. Яценко. – К. : Техника, 1997. – 384 с.

211. Gogaev KA. Contact stresses in the deformation zone and average pressure during asymmetric rolling of metal powders / KA. Gogaev, GYa. Kalutskii, VS. Voropaev // Powder Metall Met C+ Vol.52. #3–4: 126–131. doi: 10.1007/s11106-013-9504-z.

212. Gogaev KA. Production of Titanium Powder Sheets by Asymmetric Rolling / KA. Gogaev, VS. Voropaev, GYa. Kalutskii // Podrezov YuN, Verbilo

DG, Koryak OS. Powder Metall Met C+ 9–10 (487): 11–23. doi: 10.1007/s11106-013-9462-5.

213. Murata Y. Experimental Analysis of Metal Flow and Strain Distribution in Rolling of Sn-Pb Powder. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering / Y. Murata, E. Yuasa, M. Tanaka // Special Issue on Recent Advances in Materials and Processing 3 (2): 167-177.* <http://dx.doi.org/10.1299/jmmp.3.167>.

214. Численное математическое моделирование процессов прокатки порошковых лент : монография / Э. П. Грибков, В. Д. Кассов, В. А. Данилюк, Е. В. Бережная. – Краматорск : ДГМА, 2013. – 156 с. – 978-966-379-652-9.

215. Грибков Э. П. Производство порошковых электродных лент методами прокатки / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Машини та пластична деформація металів : тези доп. II Міжнар. наук.-техн. конф., (Запоріжжя, 19–22 листоп. 2012 р.) ; відп. ред. В. В. Чигиринский. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2012. – С. 50–52.*

216. Грибков Э. П. Способ производства порошковых электродных лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Научно-технический прогресс в чёрной металлургии : матер. I Межд. научн.-техн. конференции (2–4 октября 2013 г.) ; отв. ред. А. Л. Кузьминов. – Череповец : ЧГУ, 2013. – С. 68–70.*

217. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния порошковых материалов при прокатке / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Научно-технический прогресс в металлургии – 2012 : матер. междунар. науч. семинара (12 декабря 2012 г.) ; отв. ред. Э. А. Гарбер, З. К. Кабаков. – Череповец : ЧГУ, 2013. – С. 97–106.*

218. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев. – М. : Металлургия, 1973. – 288 с.

219. Федоринов В. А. Математическое моделирование напряжений, деформаций и основных показателей качества при прокатке относительно широких листов и полос : монография / В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков. – Краматорск : ДГМА, 2010. – 244 с. – 978-966-379-389-4.

220. Eduard P. Gribkov. Research into the process of producing powder tapes / Eduard P. Gribkov, Alexander V. Perig, Viktoriya A. Danilyuk // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 77. – pp. 1087–1104. DOI: 10.1007/s00170-014-6496-x.

221. Gribkov E. P. Mathematical modelling stress-strain behaviour at rolling of the compositions including powder materials / E. P. Gribkov, V. A. Danilyuk // *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*. – 2013. – № 5(45). – pp. 42–46.

222. Математическая модель процесса прокатки порошковой ленты с учетом пластической деформации оболочки / В. Д. Кассов, С. В. Малыгина, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 2 (27). – С. 47–52.

223. Сатонин А. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке порошковых материалов / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // *Сучасні проблеми металургії*. – Дніпропетровськ, 2002. – Т. 5. – С. 137–142.

224. Сатонин А. В. Численное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества листового металлопроката : учебное пособие / А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // Краматорск : ДГМА, 2009. – 156 с. – 978-966-379-382-5.

225. Грибков Э. П. Влияние формы оболочки на геометрические и энергосиловые параметры при прокатке порошковой электродной ленты / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Обработка материалов давлением : сб. науч. тр.* – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 1 (34). – С. 226–233.

226. Грибков Э. П. Математическая модель процесса прокатки порошковой электродной ленты / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр.* – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2012. – С. 52–59.

227. Грибков Э. П. Исследование процесса прокатки порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2012. – № 4. – С. 34–41.

228. Писаренко Г.С. Справочник по сопротивлению материалов / Г. С. Писаренко, А. П. Яковлев, В. В. Матвеев. – К. : Наукова думка, 1973. – 704 с.

229. Грибков Э. П. Исследование локальных и интегральных характеристик напряженно-деформированного состояния металла при уплотнении порошкового сердечника в металлической оболочке / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 4 (33). – С. 53–59.

230. Грибков Э. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества при прокатке двухслойных порошковых композиций / Э. П. Грибков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 604–609.

231. Потапкин В.Ф. К расчету моментов и опережения при симметричной прокатке тонких полос / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, В. П. Орел // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1988. – № 9. – С. 151–152.

232. Экспериментальная установка для моделирования процесса горячей прокатки толстых листов / В. Ф. Потапкин, В. А. Федоринов, А. В. Сатонин, В. П. Орел // Тез. докл. Всесоюзн. научн.-техн. семинара "Совершенствование технологии производства толстолистового проката с целью повышения качества готовой продукции". – Донецк, 1987. – С. 25–26.

233. Левкин А. Н. Напряженно-деформированное состояние при вторичной прокатке порошковых материалов на металлической подложке / А. Н. Левкин, Ю. А. Воробьев, Э. П. Грибков // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 1999. – С. 185–186.

234. Грибков Э. П. Математическое моделирование основных показателей качества готовой металлопродукции при прокатке двухслойных порошковых материалов / Э. П. Грибков, И. А. Морозов // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 626–628.

235. Потапкин В. Ф. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке композиционных материалов / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // Металлургическая и горнорудная промышленность. Труды V международной науч.-техн. конф. «Теоретичні проблеми прокатного виробництва». – Днепропетровск : НМЕТАУ, 2000. – С. 72–74.

236. Клименко Г. П. Совершенствование технологии и методов расчета процесса прокатки двухслойных порошковых лент / Г. П. Клименко, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – № 2(31). – С. 123–128. ISSN 1993-8322.

237. Мироненко Е. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при реализации процесса прокатки двухслойных порошковых лент / Е. В. Мироненко, Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2011. – № 4 (29). – С. 79–83.

238. A mathematical model of the process of rolling flux-cored tapes / V. V. Chigarev, A. G. Belik, E. P. Gribkov, P. A. Gavrish // Welding International. – 2015. – Vol. 29, Issue 1. – pp.70-74. ISSN 0950-7116. DOI: 10.1080/09507116.2014.888192.

239. Кассов В. Д. Исследование процесса изготовления порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков, С. В. Малыгина // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2009. – № 2 (21). – С. 315–318.

240. Кассов В. Д. Математическая модель процесса прокатки порошковой ленты с учетом пластической деформации оболочки / В. Д. Кассов,

А. В. Сатонин, Э. П. Грибков // Зб. наук. праць Українського державного морського технічного університету. – Миколаїв : УДМТУ, 2002. – № 7. – С. 38–46.

241. Кассов В. Д. Математическое моделирование и экспериментальное исследование процесса изготовления порошковой ленты с промежуточным слоем связующего / В. Д. Кассов, И. В. Воленко, Э. П. Грибков // Материалы международной научно-методической конференции «Современные проблемы сварки и родственных технологий. Совершенствование подготовки кадров». – Мариуполь : ПГТУ, 2001. – С. 99–101.

242. Численное математическое моделирование процессов плакирования, прокатки и формовки композиционных листовых материалов : монография / А. В. Сатонин, В. А. Луценко, Э. П. Грибков, А. А. Сатонин // Краматорск : ДГМА, 2012. – 228 с. – 978-966-379-584-3.

243. Сатонін О. В. Напружено-деформований стан вторинної прокатки порошкових матеріалів на металевій підложці / О. В. Сатонін, Ю. А. Воробйов, Е. П. Грибков // Новые конструкционные стали и сплавы и методы их обработки для повышения надежности и долговечности изделий. – Запорожье : ЗГТУ, 1998. – С. 280–281.

244. Напряженное состояние и кинематика при прокатке порошковых материалов на металлической подложке / В. Ф. Потапкин, А. Н. Левкин, А. В. Сатонин, С. М. Романов, Э. П. Грибков // Порошковая металлургия. – 2000. – № 1–2. – С. 13–22.

245. Прокатка металлических порошков / Г. А. Виноградов [и др.]. – М. : Металлургия, 1969. – 382 с.

246. Напряженно-деформированное состояние и кинематика изготовления порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Зб. наук. праць Українського державного морського технічного університету. – Миколаїв : УДМТУ. – 2001. – № 4(375). – С. 64–73.

247. Грибков Э. П. Напряженно-деформированное состояние при прокатке двухслойных порошковых материалов, один слой из которых является

монометаллом / Э. П. Грибков, А. Н. Кулик // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в машинобудуванні і металургії : зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА, 2000. – С. 138–141.

248. Кассов В. Д. Теоретический анализ и методика расчета силовых параметров производства порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков, И. В. Воленко // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2001. – С. 548–554.

249. Перлин И. Л. Теория волочения / И. Л. Перлин, М. З. Ерманок.– М. : Металлургия, 1971. – 448 с.

250. Грибков Э. П. Моделирование процесса изготовления сварочной порошковой проволоки / Э. П. Грибков, И. В. Серов // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали третьої міжнародної науково-технічної конференції ; під заг. ред. В.Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2005. – С. 22.

251. Грибков Э. П. Численное математическое моделирование процессов изготовления порошковой проволоки / Э.П. Грибков // Пластическая деформация металлов : сб. науч. тр. В 2 т. – Днепропетровск : Акцент ПП, 2014. – Т. 1. – С. 164 – 168. – ISBN 978-617-7109-29-6.

252. Грибков Э. П. Численное математическое моделирование процессов изготовления порошковой проволоки / Э. П. Грибков // Программа и тезисы докладов Десятой международной научно-технической конференции "Пластическая деформация металлов". – НМетАУ (г. Днепропетровск). – 19-23 мая 2014 г. – С. 23–24.

253. Грибков Э. П. Численное одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при мундштучном формовании порошковой проволоки / О. И. Бескровная, В. К. Ковалько, Э. П. Грибков // Обробка матеріалів тиском : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 1 (19). – С. 125–129.

254. Гринь А. Г. Автоматизированное проектирование технологических режимов изготовления прессованной порошковой проволоки / А. Г. Гринь, Э. П. Грибков, А. В. Свиридов // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2008. – № 8 (126). – С. 49–56.

255. Гринь А. Г. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при прокатке прессованной порошковой проволоки / А. Г. Гринь, Э. П. Грибков, А. В. Свиридов // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – С. 311–316.

256. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков, В. А. Дарченко, И. В. Воленко // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ-Хмельницький, 2002. – С. 345–348.

257. Chigarev V. V. Investigation of the process of drawing flux-cored wire for welding copper to steel / V. V. Chigarev, P. A. Gavrish, E.P. Gribkov // *Welding International*, Volume 26, Issue 9, 2012 – 718-722 pp - ISSN 0950-7116 (Print), 1754-2138 (Online). DOI:10.1080/09507116.2011.653152.

258. Грибков Э. П. Моделирование напряженного состояния при волочении порошковой проволоки / Э. П. Грибков, В. Д. Кассов, И. В. Серов // *Металлург. Спецвыпуск*. – М., 2004. – № 1. – С. 44.

259. Грибков Э. П. Математическое моделирование напряжений и деформаций при мундштучном формовании порошковой проволоки / Э. П. Грибков // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні : зб. наук. пр. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2013. – № 1 (14). – С. 37–44.

260. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки / А. Г. Гринь, Э. П. Грибков, А. В. Свиридов, И. А. Бойко // Удосконалення процесів і обладнання обробки

тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 522–527.

261. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки / А. Г. Гринь, А. В. Свиридов, И. А. Бойко, Э. П. Грибков // Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском : матер. наук.-техн. конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 13.

262. Кассов В. Д. Напряженно-деформированное состояние при волочении порошковой проволоки / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков, В. А. Дарченко // Сб. тезисов докладов IX региональной научно-технической конференции. В 2 т. – Мариуполь : ПГТУ, 2002. – Т. 2. – С. 69–70.

263 Чигарев В. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении порошковой проволоки / В. В. Чигарев, В. В. Тимченко, Э. П. Грибков // Сб. тезисов докладов XI региональной научно-технической конференции. – Мариуполь : ПГТУ, 2004. – Т. 2. – С. 37.

264. Чигарев В. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при волочении сварочной проволоки / В. В. Чигарев, И. В. Коваленко, Э. П. Грибков // Сб. тезисов докладов XI региональной научно-технической конференции. В 2 т. – Мариуполь : ПГТУ, 2004. – Т. 2. – С. 36.

265. Чигарев В. В. Математическая модель изготовления порошковой проволоки для ремонтной сварки энергетических установок / В. В. Чигарев, И. В. Серов, Э. П. Грибков // Вісник двигунобудування. – 2004. – № 3. – С. 47–50.

266. Левкин А. Н. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния и геометрических характеристик при реализации процесса прокатки биметаллических порошковых композиций / А. Н. Левкин, Э. П. Грибков, Ю. А. Воробьев // Удосконалення процесів та обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні. – Краматорськ, 2000. – С. 360–363.

267. Шевченко А. В. Изготовление порошковой плющенко для восстановительной наплавки / А. В. Шевченко, Э. П. Грибков // Вісник двигунобудування. – 2006. – № 4. – С. 13–15.

268. Грибков Э. П. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при плющении порошковой проволоки / Э. П. Грибков, С. Н. Грибкова, А. И. Дворжак // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 553–556.

269. Математическое моделирование напряжений и деформации при реализации процесса плющения порошковой проволоки для электроконтактной наплавки / Э. П. Грибков, Е. В. Бережная, В. А. Данилюк, К. Д. Махмудов // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2012. – № 1 (30). – С. 61–64.

270. Грибков Э.П. Математическое моделирование процесса плющения порошковой проволоки / Э.П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2015. – № 2 (41). – С. 96–102.

271. Одномерное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния при правке растяжением с изгибом / В. И. Дунаевский, В. А. Самойлов, А. В. Сатонин, А. Б. Егоров // Изв. вузов Черная металлургия. – 1994. – № 9. – С. 44–47.

272. Грибков Э. П. Математическое моделирование профилирования ободьев колес / Э. П. Грибков, Е. Ю. Гаврильченко, Д. В. Мережко // Актуальные проблемы в машиностроении. – Новосибирск : НГТУ, 2016. – № 3 – С. 330–335.

273. Сторожев М. В. Теория обработки металлов давлением : учебник для вузов / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1977. – 423 с.

274. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов. В 2 т. Т.1. Металловедение и термическая обработка стали / Я. Б. Фридман. – М. : Машиностроение, 1974. – 472 с.

275. Грибков Э. П. Конечно-элементное моделирование плющения порошковой проволоки / Э. П. Грибков // *Обработка материалов давлением* : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2016. – № 1 (42). – С. 63–66.

276. Грибков Э. П. Экспериментальное исследование влияния толщины оболочки на параметры процесса прокатки порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2013. – № 1 (14). – С. 45–51.

277. Грибков Э. П. Экспериментальные исследования процесса прокатки порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *X International Conference “Strategy of Quality in Industry and Education” June 6-13 2014, Varna, Bulgaria* // *International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus. Special Number.* – pp. 50–53. ISSN 978-617-518-288-8.

278. Грибков Э. П. Экспериментальные исследования технологии производства порошковых лент / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // *Вестник Нац. техн. ун-та "ХПИ"* : сб. науч. тр. те-мат. вып. : новые решения в современных технологиях. – Харьков : НТУ ХПИ, 2013. – № 43 (1016). – С. 56–60.

279. Экспериментальное исследование процесса волочения порошковой проволоки / А. Г. Гринь, А. В. Свиридов, И. А. Бойко, Э. П. Грибков // *Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском* : матер. наук.-техн. конф. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 22.

280. Грибков Э. П. Влияние режимов производства порошковой ленты на формирование наплавленного слоя / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк, В. Д. Кассов // *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку.* – Краматорськ, 2011. – С. 39.

281. Кассов В. Д. Автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // *Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні* : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – С. 248–253.

282. Чигарев В. В. Технологические особенности наплавки порошковой лентой / В. В. Чигарев, Э. П. Грибков, Е. В. Кассова // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку. Матеріали п'ятої Міжнародної науково-технічної конференції 4-7 червня 2007 року. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 118.

283. Грибков Э. П. Автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки композиций, включающих порошковые материалы / Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 2014. – № 1 (38). – С. 142–147. ISSN 2076-2151.

284. Грибков Э. П. Автоматизированное проектирование технологических режимов прокатки порошковой ленты / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк // Актуальные проблемы в машиностроении: материалы первой международной научно-практической конференции ; под ред. В.Ю. Скибы. – Новосибирск : НГТУ, 2014. – С. 56–62. – ISBN 978-5-7782-2410-0.

285. Кассов В. Д. Влияние режимов прокатки порошковой ленты на наплавку композиционного сплава типа «релит-мельхиор» / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Нові конструкційні сталі та стопи і методи їх обробки для підвищення надійності та довговічності виробів : зб. наук. праць ІХ Міжнар. наук.-техн. конф. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2003. – С. 49–51.

286. Чигарев В. В. Автоматизированное проектирование технологических режимов изготовления порошковой проволоки для сварки деталей металлургических машин / В. В. Чигарев, И. В. Серов, Э. П. Грибков // Захист металургійних машин від поломок : зб. наук. пр.– Маріуполь : ПДТУ, 2005. – Вип. 8. – С. 211–213.

287. Chigarev V. V. Improving the technological conditions of drawing flux-cored welding wires / V. V. Chigarev, P. A. Gavrish, E. P. Gribkov // Welding International Volume 28, Issue 1. – 2014 – pp. 59–61 DOI: 10.1080/09507116.2013.796655.

288. Автоматизированное проектирование режимов изготовления порошковой проволоки / В. В. Чигарев, Г. В. Шекула, А. М. Куций, Э.П. Грибков //

Розвиток методів розрахунку, удосконалення технологій та обладнання процесів обробки металів тиском : матер. наук.-техн. конференції. – Краматорськ : ДДМА, 2007. – С. 19.

289. Автоматизированное проектирование технологических режимов при волочении порошковой проволоки / Э. П. Грибков, А. В. Периг, Е. В. Кассова, А. Е. Безматный // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – № 1 (3). – С. 93–99.

290. Грибков Э. П. Оптимизация технологических режимов изготовления порошковой плющенко / Э. П. Грибков, И. В. Шевченко // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2008. – № 8 (126). – С. 123–127.

291. Кассов В. Д. Влияние формы частиц сердечника на качество поверхности порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ : ДДМА, 2004. – С. 610–613.

292. Кассов В. Д. Моделирование поведения частиц сердечника при прокатке порошковой ленты / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Удосконалення процесів і обладнання обробки тиском в металургії і машинобудуванні : зб. наук. пр. – Краматорськ-Слов'янськ : ДДМА, 2003. – С. 140–143.

293. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : Наука, 1973. – 301 с.

294. Бусленко Н. П. Метод статистических испытаний и его реализация на цифровых машинах / Н. П. Бусленко, Ю. А. Шредер. – М. : Наука, 1961. – 384 с.

295. Потапкин В. Ф. Исследование процесса холодной прокатки тонких полос в статистическом аспекте / В. Ф. Потапкин, Л. М. Белкин, А. В. Сатонин // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1985. – № 1. – С. 59–61.

296. Сатонин А. В. Методики и программные средства по имитационному математическому моделированию рабочих нагрузок при реализации различных технологических схем листопрокатного производства / А. В. Сатонин

// Защита металлургических машин от поломок : сб. науч. тр. – Мариуполь : ПГТУ, 1999. – Вып. 4. – С. 54–59.

298. Морозов И. А. Точность геометрических характеристик композиционных материалов, полученных на основе процесса прокатки порошков / И. А. Морозов, Ю. А. Воробьев, Э. П. Грибков // Обработка материалов давлением : сб. науч. тр. – Краматорск : ДГМА, 1998. – № 4. – С. 100–104.

299. Математические модели и программные средства по автоматизированному расчету напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества при прокатке порошковых материалов на металлической подложке / В. Ф. Потапкин, А. В. Сатонин, С. М. Романов, В. Ф. Штибен, И. А. Морозов, А.Н. Левкин, Ю. А. Воробьев, Э. П. Грибков // Донбас. гос. машиностроит. академи. – Краматорск, 1996. – 44 с. – Библиогр.: 20 назв. – Рус. – Деп. в УкрИНТЭИ 25.10.96, №71. – Ук96.

300. Луговский В. И. Алгоритмы систем автоматизации листовых станов / В. И. Луговский. – М. : Металлургия, 1974. – 320 с.

301. Железнов Ю. Д. Статистические исследования точности тонколистовой прокатки / Ю. Д. Железнов, С. Л. Коцарь, А. Г. Абиев. – М. : Металлургия, 1982. – 239 с.

302. Коновалов Л. В. Нагруженность, усталость, надежность деталей металлургических машин / Л. В. Коновалов. – М. : Металлургия, 1981. – 280 с.

303. Статистическое моделирование и оптимизация технологических режимов процесса холодной прокатки тонких полос / В. Ф. Потапкин, Л. М. Белкин, А. В. Сатонин, В. С. Севастьянов // Теория и практика тонколистовой прокатки : межвуз. сб. науч. тр. – Воронеж. – 1989. – С. 84–82.

304. Грибков Э. П. Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой электродной ленты / Э. П. Грибков, В. А. Данилюк, Е. В. Бережная // Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля. – Луганськ : СНУ ім. В. Даля, 2012. – № 13 (184). – С. 74–79.

305. Кассов В. Д. Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой ленты для наплавки / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Зб. наук. праць Кіровоградського державного технічного університету. – Кіровоград : КДТУ, 2003. – Вип. 12. – С. 167–172.

306. Кассов В. Д. Имитационное математическое моделирование основных показателей качества порошковой ленты для наплавки / В. Д. Кассов, Э. П. Грибков // Тези доповідей I Міжнар. наук.-техн. конф. «Машинобудування та металообробка–2003». – Кіровоград : КДТУ, 2003. – С. 88–90.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А . Методика и результаты экспериментального определения физико-механических свойств порошков различного состава

В ходе эксперимента было осуществлено определение механических свойств порошка на основе меди, содержащего 79% меди, 15% олова, 4% свинца, 2% графита. Технологическая сущность эксперимента заключалась в прессовании соответствующей порошковой композиции в закрытой матрице при различных, варьируемых по величине, значениях силы Y_i . При этом само прессование производили с использованием нажимного механизма рабочей клетки промышленно- лабораторного прокатного стана 200×260 кафедры АММ (ДГМА, г. Краматорск) (см. рис. 3.2). Для определения механических свойств порошка одного состава достаточно одного опыта, так как использование сельсин- датчика, установленного на нажимном механизме, позволило определить текущую высоту испытуемой заготовки, соответствующую текущему значению силы прессования Y_i , то есть одним опытом заменялась целая их серия. Тарировку месдоз для измерения радиальной составляющей силы прессования производили на отдельном гидравлическом прессе путем имитационного нагружения силой известной величины.

С целью непосредственного определения текущей плотности, образец взвешивали сразу после прессования на лабораторных весах с погрешностью до 0,01 г, а одновременно с этим измерение конечной высоты производили при помощи инструментального микрометра с погрешностью, не превышающей 0,01 мм.

С учетом известных значений массы заготовки M и геометрических характеристик D_m , d_c , h_i (см. рис. 2.3) величину плотности ρ_i в каждом отдельном случае определяли из очевидного соотношения:

$$\rho_i = \frac{4M}{\pi(D_M^2 - D_C^2)h_i}, \quad (\text{A.1})$$

где h_i – высота заготовки.

Здесь следует указать на то, что для определения относительного показателя плотности $\gamma_i = \rho_i / \rho_M$ помимо собственно определяемого эмпирически значения плотности ρ_i необходимой является и количественная оценка плотности исследуемой композиции в ее монолитном состоянии ρ_M . Величина ρ_M для композиции, содержащей n компонентов, в свою очередь, может быть определена чисто аналитически из следующих соображений. Очевидно, что объем монолитного композиционного материала есть сумма объемов его составляющих, т.е.

$$V_M = \sum_{j=1}^n V_{Mj}, \quad (\text{A.2})$$

где j – порядковый номер каждой отдельной составляющей исследуемой порошковой композиции.

Разделим левую и правую части уравнения на массу монолита M_M :

$$V_M / M_M = \sum_{j=1}^n V_{Mj} / M_{Mj}, \quad (\text{A.3})$$

где с учетом $V_M / M_M = 1 / \rho_M$ и $V_{Mj} = M_{Mj} / \rho_{Mj}$ уравнение может быть трансформировано к виду:

$$1 / \rho_M = \sum_{j=1}^n M_{Mj} / (M_{Mj} M_j) = \sum_{j=1}^n m_j / \rho_{Mj}, \quad (\text{A.4})$$

откуда в окончательном виде искомая величина ρ_m с учетом плотности каждой из составляющей в монолитном состоянии ρ_{mj} и ее удельного содержания по массе $m_j = M_{mj}/M_m$ может быть определена как:

$$\rho_m = 1 / \sum_{j=1}^n m_j / \rho_{mj} . \quad (\text{A.5})$$

На примере одного из состава порошковой композиции бронзографита, включающей по массе 79% меди (Cu, $m_j=0.79$, $\rho_{mj}=8.9\text{г/см}^3$), 15% олова (Sn, $m_j=0.15$, $\rho_{mj}=7.3\text{г/см}^3$), 3% свинца (Pb, $m_j=0.04$, $\rho_{mj}=11.3\text{г/см}^3$) и 2% графита (C, $m_j=0.02$, $\rho_{mj}=2.23\text{г/см}^3$), расчетная величина плотности γ_m в монолитном состоянии составила:

$$\rho_m = 1 / [(0.79 / 8.9) + (0.15 / 7.3) + (0.04 / 11.3) + (0.02 / 2.23)] = 8.208 \text{ г/см}^3 .$$

Нормальные контактные p_i и радиальные σ_r напряжения для каждого случая определяли по формулам (3.16) и (3.18), а коэффициенты α_i и β_i – (3.19) и (3.20).

В качестве примера результатов проведенного исследования в табл. А.1 дана количественная, а на рис. А.1 – графическая интерпретация зависимостей коэффициентов $\alpha(\gamma)$ и $\beta(\gamma)$, полученных при прессовании порошка бронзографита описанного выше состава. Здесь также для качественного сопоставления результатов представлены экспериментальные распределения этих же коэффициентов для медного порошка ПМС–1, который является близким по составу и физико- механическим свойствам к бронзографиту. Данные распределения получены в работе [109] и достаточно подтверждены практически. Сопоставление этих зависимостей подтверждает правомерность разработанного экспериментального метода, и возможность его применения на практике.

Из анализа полученных результатов для порошка на основе меди является очевидным, что с увеличением силы прессования радиальные напряжения возрастают (см. табл. А.1). По мере увеличения относительной плотности γ значения коэффициента α снижаются и снижаются практически линейно, что, в свою очередь, позволяет принять степенной показатель аналитического описания m равным единице. Количественная же оценка коэффициента a того же аналитического описания для данного материала составила $a=1,737$.

Значения коэффициента β с увеличением относительной плотности возрастают (см. рис. А.1), асимптотически приближаясь к единице, что, в частности, соответствует условиям деформирования сплошных сред [109]. Полученная же для порошка данного состава количественная оценка степенного показателя n в данном случае составила $n=3,049$, а значение σ_s было равно 274 Н/мм^2 и именно эти значения могут быть использованы в качестве исходных данных при реализации различных математических моделей процесса прокатки порошковых материалов.

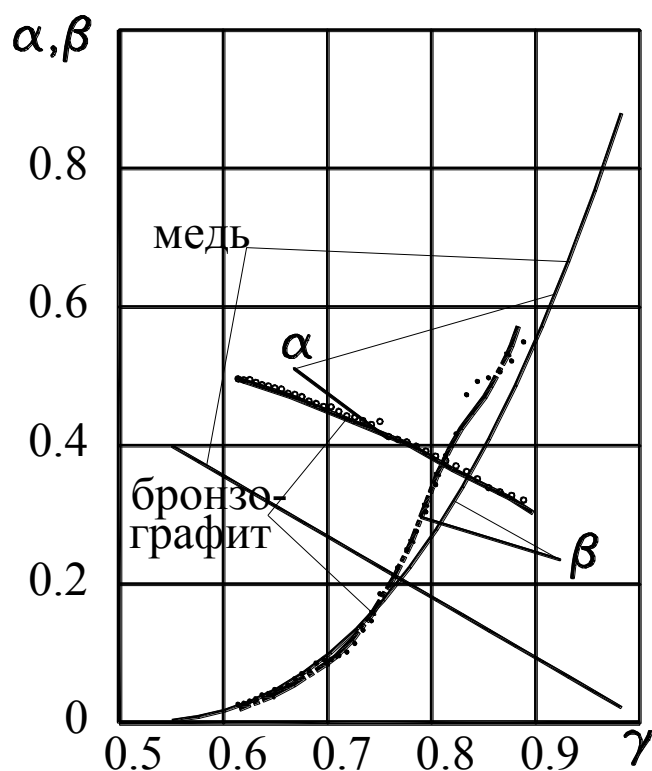


Рисунок А.1 – Расчетные распределения коэффициентов α и β для порошка на основе меди и марки ПМС-1

Таблица А.1 – Экспериментальные значения компонент напряженно-деформированного состояния, а также расчетные значения коэффициентов α и β , полученные при прессовании порошка на основе меди (79%Cu, 15%Sn, 4%Pb, 2%C)

i	H, мм	P, Н/мм ²	σ_r , Н/мм ²	γ	α	β
1	7.605	182.91	28.53	0.88850	0.32165	0.55008
2	7.805	174.20	24.82	0.86574	0.33366	0.50692
3	8.005	169.85	20.81	0.84411	0.35236	0.49310
4	8.205	154.60	16.06	0.82353	0.37101	0.41727
5	8.405	139.36	12.60	0.80393	0.38514	0.34413
6	8.605	124.12	9.61	0.78525	0.39947	0.27688
7	8.805	111.05	7.63	0.76741	0.40941	0.22375
8	9.005	100.17	4.73	0.75037	0.43524	0.18622
9	9.205	84.92	3.93	0.73406	0.43648	0.13399
10	9.405	74.04	3.02	0.71845	0.44341	0.10242
11	9.605	69.68	2.15	0.70349	0.45638	0.09166
12	9.805	67.50	1.84	0.68914	0.46114	0.08634
13	10.005	60.97	1.23	0.67537	0.47099	0.07096
14	10.205	53.35	0.89	0.66213	0.47589	0.05452
15	10.405	50.08	0.56	0.64941	0.48363	0.04832
16	10.605	45.73	0.37	0.63716	0.48820	0.04041
17	10.805	40.28	0.12	0.62536	0.49558	0.03152
18	11.005	37.02	0.08	0.61400	0.49669	0.02664

Приложение Б . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при первичной прокатке порошковых материалов в металлической оболочке (VB 6.0)

```

'Determination of the length of deformation zone with taking into account the process asymmetry
500:
kv2 = (R2 + Hp) / R1 * kv
Rpr = 2 * R1 * (R2 + Hp) / (R1 + R2 + Hp)
Lmax = Sqr(2 * R1 * (Hp0 - hl1))
Lmin = Sqr(Rpr * (Hp0 - hl1))
'Procedure Call for determination of stressed-strained state
Call calc(L0, kv2, Rpr)
'Determination of shell deformation
kv = 1
1000:
i = Kr
1001:
Wx1 = 4 - 5 * (L0 - Xm(i - 1)) / (L0 - Xm(i)) + ((L0 - Xm(i - 1)) ^ 5 / (L0 - Xm(i)) ^ 5)
MI = (B2 * H1 ^ 3 - b * (H1 - Hp) ^ 3) / 12
Wx2 = Px2m(i) * b * (L0 - Xm(i)) ^ 5 / 120 / ep / MI
Wx = Abs(Wx1 * Wx2)
Wxm(i) = Wx
Y2 = Sqr((R2 + Hp) ^ 2 - Xm(i) ^ 2) - Sqr((R2 + Hp) ^ 2 - Xm(i - 1) ^ 2)
arcs = Xm(i) / (R2 + Hp): arcs1 = arcs ^ 2 / (1 - arcs ^ 2)
Y1 = (Xm(i - 1) - Xm(i)) * (Tan(Atn(Sqr(arcs1)))) + Wx
Y1m(i) = Y1: Y2m(i) = Y2
If Y2 > Y1 Then
xotr = Xm(i): Potr = Px2m(i)
Else
i = i - 1
If i = 1 Then
arcs2 = L0 / R1: arcs3 = arcs2 ^ 2 / (1 - arcs2 ^ 2)
arcs4 = L0 / (R2 + Hp): arcs5 = arcs4 ^ 2 / (1 - arcs4 ^ 2)
H0r = hl1 + R1 * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs3)))) + (R2 + Hp) * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs5))))
GoTo 3000
End If
GoTo 1001
End If
dH01 = R1 * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs3))))
WH0 = Potr * b * (L0 - xotr) ^ 5 * 4 / (120 * ep * MI)
arcs6 = xotr / (R2 + Hp): arcs7 = arcs6 ^ 2 / (1 - arcs6 ^ 2)
dH02 = (R2 + Hp) * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs7)))) + (L0 - xotr) * Tan(Atn(Sqr(arcs7))) + WH0
Ldyg = Sqr(R2 ^ 2 - (R2 - dH02) ^ 2)
Ldygm(i) = Ldyg
H0r = hl1 + dH01 + dH02
'Determination of the length of deformation zone with taking into account the shell bending process
3000:
dLL = 2 * (Lmax - Lmin) / (Lmax + Lmin) * 100
If dLL < 5 Then GoTo 2000
If H0r > Hp0 Then Lmax = L0
If H0r < Hp0 Then Lmin = L0
'Procedure Call for determination of stressed-strained state
Call calc(L0, kv2, Rpr)
'Determination of integral characteristics of the process
2000:
L0 = Ldyg

```

```

`Procedure Call for determination of stressed-strained state
Call calc(L0, kv2, Rpr)
rpl = Yxm(Kr)
Rolling Force
i = 1: SP = 0
1150: SP = SP + Px2m(i)
i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 1150
Rpr = L0 ^ 2 / (Hp0 - hl1)
PSR = SP / Kr
i = 1
SP = Px2m(1) * dx / 2: SM1 = Px2m(1) * Fx1m(1) * dx * R1 / 2: SM2 = Px2m(1) * Fx2m(1) * dx * R2 / 2
If i < 1.5 Then GoTo 1310
1280: SP = SP + 0.5 * (Px2m(i) + Px2m(i - 1)) * dx
SM1 = SM1 + 0.5 * (Px2m(i) * Fx1m(i) + Px2m(i - 1) * Fx1m(i - 1)) * dx * R1
SM2 = SM2 + 0.5 * (Px2m(i) * Fx2m(i) + Px2m(i - 1) * Fx2m(i - 1)) * dx * R2
1310: i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 1280
PPL = SP * b / 1000: MPL1 = SM1 * b / 1000: MPL2 = SM2 * b / 1000
PYP = Px2m(Kr) * LYP * b / 2000
PPR = PPL + PYP
`Rolling Moment (Rolling Torque)
MM1 = MPL1 - 0.5 * Px2m(Kr) * LYP * fop1 * R1 / 1000
MM2 = MPL2 - 0.5 * Px2m(Kr) * LYP * fop2 * R2 / 1000
`Strip tension (Bend tension)
T0 = G0 * Hp0 * b
T1 = Gx2 * hl1 * b
`Rolling Power
Sop1 = (Hn1 / hl1 - 1) * 100
Sop2 = (Hn2 / hl1 - 1) * 100
N1 = (MM1 / R1) * V1 * hl1 / Hn1
N2 = (MM2 / R2) * V1 * hl1 / Hn2
Ns = N1 + N2
`Specific power consumption of the process
rpl = rpl * rpm
AYD = (MM1 * hl1 / R2 / Hn1 + MM2 * hl1 / R1 / Hn2) / (b * hl1 * rpl)
End Sub
`Procedure for computation of stressed-strained state
Sub calc(L0, kv2, Rpr)
510:
Pmax = -1E+35
EE = 0
`Determination of the length of deformation zone with taking into account the influence of shell on
deformation zone geometry
Lop1 = L0 * Sqr(hl1 * (kv2 - 1) / (Hp0 - hl1) + kv2 * (Lop1 / L0) ^ 2)
Lot1 = L0 - Lop1
Lop2 = 0.00001
Lot2 = L0
`Determination of the initial parameters for computation
dx = L0 / Kr
DH = Hp0 - hl1
Hn1 = hl1 + DH * (Lop1 / L0) ^ ah
Hn2 = hl1 + DH * (Lop2 / L0) ^ ah
X1 = L0: Gx1 = 0: Hx1 = Hp0
i = 1
yx1 = Rpu / rpm
Al = a * (1 - yx1) ^ m
If Al > 0.5 Then Al = 0.5
BT = yx1 ^ (2 * n)

```

```

GTF = a0 * a1 ^ a2
Px1 = GTF * Sqr(4 * (1 + Al) * BT / 3 / (1 + 4 * Al))
Fx11 = fot1: Fx21 = fot2
`Iteration Procedure
710:
`The section coordinate Determination
X2 = X1 - dx
`Determination of the current thickness of the powder layer
Hx2 = hl1 + DH * (X2 / L0) ^ ah
`Reduction determination
DHx = Hx1 - Hx2
`Friction coefficients determination
If X2 > Lop1 Then Fx12 = fot1 * ((X2 - Lop1) / (L0 - Lop1)) ^ af1
If X2 > Lop2 Then Fx22 = fot2 * ((X2 - Lop2) / (L0 - Lop2)) ^ af2
If X2 <= Lop1 Then Fx12 = -fop1 * ((Lop1 - X2) / Lop1) ^ af1
If X2 <= Lop2 Then Fx22 = -fop2 * ((Lop2 - X2) / Lop2) ^ af2
`Determination of normal contact stresses
xx1 = (1 - 2 * Al) * Hx2 / (1 + 4 * Al) + 1 / 2 * (Hx1 - Hx2 - (Fx12 + Fx22)) * dx
xx2 = Px1 / 2 * (Hx1 - Hx2 - (Fx11 + Fx21)) * dx - Gx1 * Hx1
xx3 = Hx2 ^ 2 * (((1 - 2 * Al) / (1 + 4 * Al)) ^ 2 - 1)
GTF = a0 * (EE + a1) ^ a2
xx4 = Hx2 ^ 2 * 4 * (1 + Al) * BT * GTF ^ 2 / 3 / (1 + 4 * Al)
BBC = xx1 ^ 2 * xx2 ^ 2 - (xx1 ^ 2 - xx3) * (xx2 ^ 2 - xx4)
BBCm(i) = BBC
Px2 = (-xx1 * xx2 + Sqr(BBC)) / (xx1 ^ 2 - xx3)
`Determination of normal stresses
ABC = Px2 ^ 2 * (((1 - 2 * Al) / (1 + 4 * Al)) ^ 2 - 1) + 4 * (1 + Al) * BT * GTF ^ 2 / 3 / (1 + 4 * Al)
ABCm(i) = ABC
Gx2 = (1 - 2 * Al) * Px2 / (1 + 4 * Al) - Sqr(ABC)
If Px2 > Pmax Then Pmax = Px2: imax = i
`Determination of tangential contact stresses
tau1vm(i) = Px1 * Fx11
tau1nm(i) = Px1 * Fx21
tau2vm(i) = Px2 * Fx12
tau2nm(i) = Px2 * Fx22
`Determination of deformation characteristics
Eh = (Hx1 - Hx2) / Hx1
DeHx = (Px2 * (1 + 4 * Al) - Gx2 * (1 - 2 * Al)) / (Gx2 * (1 + 4 * Al) - Px2 * (1 - 2 * Al))
DeHx = Abs(DeHx)
Ex = Eh / DeHx
`Determination of relative density of powder
yx1 = yx1 * Hx1 / Hx2 / (1 + Ex)
Yxm(i) = yx1
Al = a * (1 - yx1) ^ m
BT = yx1 ^ (2 * n)
`Equivalent deformation determination
dE = BT ^ (1 / 2) * (2 / 9 * ((Ex - Eh) ^ 2 + Eh ^ 2 + Ex ^ 2)) / yx1
EE = EE + dE
`Formulation of transition condition to the next cross-section
Alm(i) = Al: BTm(i) = BT: GTFm(i) = GTF
Gxm(i) = Gx2: Xm(i) = X2
X1 = X2: Px1 = Px2: Gx1 = Gx2: Fx11 = Fx12: Fx21 = Fx22
Hx1 = Hx2
Xm(i) = X2: Hxm(i) = Hx2: Fx1m(i) = Fx12: Fx2m(i) = Fx22
Px2m(i) = Px2
i = i + 1
`The transition to computation of the next cross-section
If i <= Kr Then GoTo 710
The final relative density of powder
YHL1 = hl1 * Px2 / el

```

`The length of elastic recovery zone

$$\text{LYP} = \text{Sqr}(\text{Rpr} * \text{YHL1})$$

`The value of normal stresses at output of the deformation zone

$$\text{Gx2} = \text{Gx2} - 0.5 * \text{LYP} * \text{Px2} * (\text{fop1} + \text{fop2}) / \text{hl1}$$

`The condition of validity of equality of normal stresses at output of the deformation zone and forward pull stress

If $\text{Gx2} > \text{G0}$ Then $\text{kv2} = \text{kv2} + 0.001$: GoTo 510

End Sub

Приложение В . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при прокатке двухслойных порошковых материалов в металлической оболочке (VB 6.0)

```

'Исходные данные
Hp = Val(Text23.Text) 'толщина оболочки, мм
hl1 = Val(Text2.Text) 'конечная толщина ленты, мм
H0M = Val(Text28.Text) 'исходная толщина мягкого слоя порошка, мм
H0T = Val(Text29.Text) 'исходная толщина твердого слоя порошка, мм
b = Val(Text3.Text) 'ширина ленты, мм
B2 = Val(Text24.Text)
H = Val(Text25.Text)
b1 = Val(Text26.Text) 'геометрические размеры сечения оболочки, мм
R1 = Val(Text4(1).Text)
R2 = Val(Text4(0).Text) 'радиус валков, мм
V1 = Val(Text8.Text) 'скорость прокатки, м/с
aM = Val(Text5.Text)
mM = Val(Text6.Text)
nM = Val(Text7.Text)
aT = Val(Text30.Text)
mT = Val(Text31.Text)
nT = Val(Text32.Text) 'коэффициенты для каждого состава порошка
kv = Val(Text9.Text) 'коэффициент асимметрии
RpuM = Val(Text10.Text) 'плотность утрамбовки мягкого слоя порошка
RpuT = Val(Text33.Text) 'плотность утрамбовки твердого слоя порошка
rpmM = Val(Text11.Text) 'плотность твердой фазы мягкого слоя порошка
rpmT = Val(Text34.Text) 'плотность твердой фазы твердого слоя порошка
G1 = Val(Text12.Text) 'напряжение переднего натяжения, Н
fotM = Val(Text13(0).Text)
fotT = Val(Text13(1).Text) 'коэффициенты трения в зоне отставания
fopM = Val(Text13(2).Text)
fopT = Val(Text13(3).Text) 'коэффициенты трения в зоне опережения
fc = Val(Text36.Text) 'коэффициент трения между слоями порошков
afM = Val(Text14(0).Text)
afT = Val(Text14(1).Text) 'коэффициенты, характеризующие распределение трения
ah = Val(Text15.Text) 'степенной показатель, описывающий форму контактной поверхности
ak = Val(Text16.Text) 'степенной показатель кинематической асимметрии
ev = Val(Text17(0).Text) 'модуль упругости валка
elM = Val(Text17(1).Text) 'модуль упругости ленты мягкого порошка
elT = Val(Text17(2).Text) 'модуль упругости ленты мягкого порошка
ep = Val(Text27.Text) 'модуль упругости оболочки
wv = Val(Text18(0).Text) 'коэффициент Пуассона для валка
wl = Val(Text18(1).Text) 'коэффициент Пуассона для ленты
Kr = Val(Text19.Text) 'число разбиений очага деформации
a0M = Val(Text20.Text)
a0T = Val(Text35.Text)
a1 = Val(Text21.Text)
a2 = Val(Text22.Text) 'коэффициенты упрочнения
romilka = 0.05
Hp0 = H0M + H0T
RPR = 2 * R1 * R2 / (R1 + R2)
L0 = Sqr(RPR * (Hp0 - hl1)): L1 = L0
600:
SL = 0.001: JS1 = -100: JS2 = -100: JS3 = -100: JS4 = -100
610:

```

```

620:
Pmax = -1E+35: iMax = 0
PmaxM = -1E+35: iMaxM = 0: PmaxT = -1E+35: iMaxT = 0
EEM = 0: EET = 0
Lop1 = L0 * SL
Lot1 = L0 - Lop1
Lop2 = L0 * Sqr(hl1 * (kv - 1) / (Hp0 - hl1) + kv * (Lop1 / L0) ^ 2)
Lot2 = L0 - Lop2
dx = L0 / Kr
DH = Hp0 - hl1
HN1 = hl1 + DH * (Lop1 / L0) ^ ah
HN2 = hl1 + DH * (Lop2 / L0) ^ ah
Fx11 = fotM: Fx21 = fotT
X1 = L0: Gx1 = 0: Hx1 = Hp0: Hx1M = H0M: Hx1T = H0T
i = 2: Gxm = 0: GxT = 0
' Расчет для мягкого слоя
yx1M = RpuM / rpmM
AL1M = aM * (1 - yx1M) ^ mM
If AL1M > 0.5 Then AL1M = 0.5
BT1M = yx1M ^ (2 * nM)
GTFM = a0M * a1 ^ a2
Px11M = GTFM * Sqr(4 * (1 + AL1M) * BT1M / 3 / (1 + 4 * AL1M))
' Расчет для твердого слоя
yx1T = RpuT / rpmT
AL2T = aT * (1 - yx1T) ^ mT
If AL2T > 0.5 Then AL2T = 0.5
BT2T = yx1T ^ (2 * nT)
GTFT = a0T * a1 ^ a2
Px12T = GTFT * Sqr(4 * (1 + AL2T) * BT2T / 3 / (1 + 4 * AL2T))
700: X2 = X1 - dx: meter = 1
flagpom = 0: pomilka = 0.05
Hx1Mf = Hx1M: Hx1Tf = Hx1T: Hx1f = Hx1
If i > 1 Then Hx1M = Hx2M: Hx1T = Hx2T: Hx1 = Hx2
cir = 0
znak = 1000: reduceT = 1: reduceM = 1:
Hx2 = hl1 + DH * (X2 / L0) ^ ah
HxAll(i) = Hx2
DHX = Hx1 - Hx2
If X2 > Lop1 Then Fx12 = fotM * ((X2 - Lop1) / (L0 - Lop1)) ^ afM
If X2 > Lop2 Then Fx22 = fotT * ((X2 - Lop2) / (L0 - Lop2)) ^ afT
If X2 <= Lop1 Then Fx12 = -fopM * ((Lop1 - X2) / Lop1) ^ afM
If X2 <= Lop2 Then Fx22 = -fopT * ((Lop2 - X2) / Lop2) ^ afT
Hx2M = Hx2 * Hx1M / Hx1
Hx2T = Hx2 - Hx2M
prirost = 0.5: shsh = 0
If prirost < 0.5 Then GoTo 75
If Hx2T > Hx1T Then Hx2T = Hx1T - DHX * prirost: Hx2M = Hx2 - Hx2T: prirost = prirost / 1.2: shsh =
shsh + 1:
If Hx2M > Hx1M Then Hx2M = Hx1M - DHX * prirost: Hx2T = Hx2 - Hx2M: prirost = prirost / 1.2: shsh =
shsh + 1:
If Hx2M < Hx1M And Hx2T < Hx1T Then GoTo 75
75:
YYMs = YYM: YYTs = YYT
AL1Ms = AL1M: AL2Ts = AL2T
BT1Ms = BT1M: BT2Ts = BT2T
If meter = 1 Then
Hx1Mpr = Hx1M: Hx2Mpr = Hx2M
Open "prom-M.dat" For Output As 1
Print #1, H0M, Hx1M, Px11M, Gx1M
Print #1, AL1M, BT1M, GTFM, yx1M

```

```

If i > 1 Then
  Print #1, EEM, Px11M, Gx1M, Fx11, Fx21
  Print #1, Al(1, i - 1), BT(1, i - 1), GTF(1, i - 1)
End If
Close #1
End If
If meter = 1 Then
Hx1Tpr = Hx1T: Hx2Tpr = Hx2T
Open "prom-T.dat" For Output As 2
Print #2, H0T, Hx1T, Px12T, Gx1T
Print #2, AL2T, BT2T, GTF2T, yx1T
If i > 1 Then
  Print #2, EET, Px12T, Gx1T, Fx11, Fx21
  Print #2, Al(2, i - 1), BT(2, i - 1), GTF(2, i - 1)
End If
Close #2
End If
shagok = 0.001
703:
cir = cir + 1
If Hx2M >= Hx1M Then Hx2M = Hx1M: Hx2T = Hx2 - Hx2M: reduceM = 0
If Hx2T >= Hx1T Then Hx2T = Hx1T: Hx2M = Hx2 - Hx2T: reduceT = 0
reduces(1, i) = reduceM
reduces(2, i) = reduceT
If reduceM <> 0 Then
If i > 1 Then AL1M = Al(1, i - 1): BT1M = BT(1, i - 1)
Call calcM(dEmas, Yx, Ex, Eh, ABC, BBC, PPx2, GGx2, Hx1M, Hx2M, Px1M, Px21M, GTFM, yx1M, Gx1M,
EEM, Al, BT, GTF)
End If
If reduceT <> 0 Then
If i > 1 Then AL2T = Al(2, i - 1): BT2T = BT(2, i - 1)
Call calcT(dEmas, Yx, Ex, Eh, ABC, BBC, PPx2, GGx2, Hx1T, Hx2T, Px12T, Px22T, GTFT, yx1T, Gx1T,
EET, Al, BT, GTF)
End If
If reduceM = 0 Then Call promM(Al, BT, GTF, ABC): Px2M = Px2T
If reduceT = 0 Then Call promT(Al, BT, GTF, ABC): Px2T = Px2M
If reduceM = 0 Or reduceT = 0 Then GoTo 6767
PPcur = Px21M - Px22T: pogr = Abs(PPcur) / ((Px22T + Px21M) / 2)
pogrmas(i) = pogr
If PPcur > 0 Then ppjj(cir) = 1000
If PPcur < 0 Then ppjj(cir) = -1000
If PPcur = 0 Then ppjj(cir) = 0
If cir > 2 And ppjj(cir) <> 0 Then
If ppjj(cir) <> ppjj(cir - 1) Then shagok = shagok / 10: flagpom = flagpom + 1
End If
If flagpom > 3 Then pomilka = pomilka + 0.01: flagpom = flagpom - 2
  If shagok < 0.00001 And pomilka < 0.2 Then pomilka = pomilka + 0.01
  If pogr > pomilka Then
    Hx2Msc = Hx2M: Hx2Tsc = Hx2T
9898:
If ppjj(cir) > 0 Then Hx2M = Hx2M + shagok: Hx2T = Hx2T - shagok
If ppjj(cir) < 0 Then Hx2M = Hx2M - shagok: Hx2T = Hx2T + shagok
If Hx2M > Hx1M And shagok > 0.0001 Then Hx2M = Hx2Msc: Hx2T = Hx2Tsc: shagok = shagok / 10:
GoTo 9898
If Hx2T > Hx1T And shagok > 0.0001 Then Hx2T = Hx2Tsc: Hx2M = Hx2Msc: shagok = shagok / 10:
GoTo 9898
yx1M = yx1Ms: yx1T = yx1Ts
AL1M = AL1Ms: AL2T = AL2Ts
BT1M = BT1Ms: BT2T = BT2Ts
GoTo 703

```



```

End If
6767:
qws = 1
  Al(qws, i) = AL1M: BT(qws, i) = BT1M: GTF(qws, i) = GTF1M
  Gx(qws, i) = Gx2M: X(qws, i) = X2
  Px11M = Px21M: Gx1M = Gx2M
  X(qws, i) = X2: Hx(qws, i) = Hx2M: Fx1(qws, i) = Fx12: Fx2(qws, i) = Fx22
  Px2(qws, i) = Px21M:
qws = 2
  Al(qws, i) = AL2T: BT(qws, i) = BT2T: GTF(qws, i) = GTF2T
  Gx(qws, i) = Gx2T: X(qws, i) = X2
  Px12T = Px22T: Gx1T = Gx2T:
  X(qws, i) = X2: Hx(qws, i) = Hx2T: Fx1(qws, i) = Fx12: Fx2(qws, i) = Fx22
  Px2(qws, i) = Px22T
  Fx11 = Fx12: Fx21 = Fx22
meter = meter + 1
If Px21M > Pmax Then Pmax = Px21M: iMax = i
If Px22T > Pmax Then Pmax = Px22T: iMax = i
If Px22T > PmaxT Then PmaxT = Px22T: iMaxT = i
If Px21M > PmaxM Then PmaxM = Px21M: iMaxM = i
If reduceM = 0 Then dEmas(1, i) = 0
If reduceT = 0 Then dEmas(2, i) = 0
EEM = EEM + dEmas(1, i)
EET = EET + dEmas(2, i)
Hx1M = Hx2M: Hx1T = Hx2T: Hx1 = Hx2
i = i + 1
X1 = X2: reduceM = 1: reduceT = 1
If X1 > 0 Then GoTo 700
If Px11M < 0 Or Px12T < 0 Then GoTo 1000
qws = 1
YHL1 = Px2(1, Kr) * (Hx(1, Kr) / eIM + Hx(2, Kr) / eIT)
LYP = Sqr(RPR * YHL1)
tau1x = Gx(1, Kr) * Hx(1, Kr) + Gx(2, Kr) * Hx(2, Kr)
tau2x = (Px2(1, Kr) * Fx1(1, Kr) / 2 + Px2(2, Kr) * Fx2(2, Kr) / 2) * LYP
tauend = tau1x + tau2x
1000:
If JS1 > 0 Then GoTo 1030
If tauend > G1 Then SL = SL + 0.02: j = j + 1: GoTo 610
JS1 = 100
1030:
If JS2 > 0 Then GoTo 1060
If tauend < G1 Then SL = SL - 0.004: GoTo 610
JS2 = 100
1060:
If JS3 > 0 Then GoTo 1090
If tauend > G1 Then SL = SL + 0.0004: GoTo 610
JS3 = 100
1090:
If JS4 > 0 Then GoTo 1120
If tauend < G1 Then SL = SL - 0.00001: GoTo 610
SL = SL + 0.000005: JS4 = 100: GoTo 610
1120:
rpl = Yx(qws, Kr)
1140:
i = 1: SP = 0
1150:
SP = SP + (Px2(1, i) + Px2(2, i)) * 0.5
i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 1150
PSR = SP / Kr

```

```

xL = 8 * PSR * RPR * (1 - wv ^ 2) / 3.1416 / ev
L1 = (Sqr(RPR * (Hp0 - hl1) + xL ^ 2)) + xL
dL = Sqr((L1 - L0) ^ 2) / L1 * 100
If dL < 0.5 Then GoTo 1260
L0 = L1: GoTo 600
1260:
i = 1: SP = (Px2(1, 1) + Px2(2, 1)) * 0.5 * dx / 2: SM1 = Px2(1, 1) * Fx1(1, 1) * dx * R1 / 2: SM2 =
Px2(2, 1) * Fx2(2, 1) * dx * R2 / 2
If i < 1.5 Then GoTo 1310
1280:
SP = SP + 0.5 * ((Px2(1, i) + Px2(2, i)) * 0.5 + (Px2(1, i - 1) + Px2(2, i - 1)) * 0.5) * dx
SM1 = SM1 + 0.5 * (Px2(1, i) * Fx1(1, i) + Px2(1, i - 1) * Fx1(1, i - 1)) * dx * R1
SM2 = SM2 + 0.5 * (Px2(2, i) * Fx2(2, i) + Px2(2, i - 1) * Fx2(2, i - 1)) * dx * R2
1310:
i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 1280
PPL = SP * b / 1000: MPL1 = SM1 * b / 1000: MPL2 = SM2 * b / 1000
PYP = (Px2(1, Kr) + Px2(2, Kr)) * 0.5 * LYP * b / 2000
PPR = PPL + PYP
MM1 = MPL1 - 0.5 * Px2(1, Kr) * LYP * fopM * R1 / 1000
MM2 = MPL2 - 0.5 * Px2(2, Kr) * LYP * fopT * R2 / 1000
T0 = g0 * Hp0 * b
T1 = Gx2 * hl1 * b
SOP1 = (HN1 / hl1 - 1) * 100
SOP2 = (HN2 / hl1 - 1) * 100
N1 = (MM1 / R1) * V1 * hl1 / HN1
N2 = (MM2 / R2) * V1 * hl1 / HN2
NS = N1 + N2
rpl = rpl * rpm
End Sub
'=====Для более мягкого слоя=====
Public Sub calcM(dEmas, Yx, Ex, Eh, ABC, BBC, PPx2, GGx2, Hx1M, Hx2M, Px11M, Px21M, GTFM, yx1M,
Gx1M, EEM, Al, BT, GTF)
qws = 1
If i <> 1 Then yx1M = Yx(1, i - 1)
yx1M = RpuM / rpmM * HOM / Hx2M
If yx1M > 1 Then yx1M = 1
AALM = aM * (1 - yx1M) ^ mM
BBTM = yx1M ^ (2 * nM)
PPx2M = GTFM * Sqr(BBTM * (1 + 4 * AALM) / AALM) / 3
GGx2M = PPx2M * (1 - 2 * AALM) / (1 + 4 * AALM)
PPx2(qws, i) = PPx2M: GGx2(qws, i) = GGx2M
xx1 = (1 - 2 * AL1M) * Hx2M / (1 + 4 * AL1M) + 1 / 2 * ((Hx1 - Hx2) - 1 / 2 * (Hx1 - Hx2) - (Hx1M -
Hx2M) - (Fx12 - fc) * dx)
xx2 = 1 / 2 * Px11M * ((Hx1 - Hx2) - 1 / 2 * (Hx1 - Hx2) - (Hx1M - Hx2M) - (Fx11 - fc) * dx) - Gx1M *
Hx1M
xx3 = Hx2M ^ 2 * (((1 - 2 * AL1M) / (1 + 4 * AL1M)) ^ 2 - 1)
GTFM = a0M * (EEM + a1) ^ a2
xx4 = Hx2M ^ 2 * 4 * (1 + AL1M) * BT1M * GTFM ^ 2 / 3 / (1 + 4 * AL1M)
BBC = xx1 ^ 2 * xx2 ^ 2 - (xx1 ^ 2 - xx3) * (xx2 ^ 2 - xx4)
BBC(qws, i) = BBC
If BBC < 0 Then
Px21M = -xx2 / xx1
Else
Px21M = (-xx1 * xx2 + Sqr(BBC)) / (xx1 ^ 2 - xx3)
End If
ABC = Px21M ^ 2 * (((1 - 2 * AL1M) / (1 + 4 * AL1M)) ^ 2 - 1) + 4 * (1 + AL1M) * BT1M * GTFM ^ 2 /
3 / (1 + 4 * AL1M)
If ABC < 0 Then
ABC = 0

```

```

Px21M = GTFM * Sqr(4 * (1 + AL1M) * BT1M / 3 / (1 + 4 * AL1M))
End If
ABC(qws, i) = ABC
Gx2M = (1 - 2 * AL1M) * Px21M / (1 + 4 * AL1M) - Sqr(ABC)

EhM = (Hx1M - Hx2M) / Hx1M
If ABC = 0 Then
ExM = 0
Else
DeHxM = (Gx21M * (1 + 4 * AL1M) - Px21M * (1 - 2 * AL1M)) / (Px21M * (1 + 4 * AL1M) - Gx2M * (1 - 2 * AL1M))
ExM = EhM * DeHxM
End If
Ex(qws, i) = ExM: Eh(qws, i) = EhM
yx1M = yx1M * Hx1M / Hx2M / (1 + ExM)
If yx1M > 1 Then yx1M = 1: znakM = 0
Yx(qws, i) = yx1M
dEM = BT1M ^ (1 / 2) * (2 / 9 * ((ExM - EhM) * (ExM - EhM) + ExM * ExM + EhM * EhM)) / yx1M
dEmas(qws, i) = dEM
AL1M = aM * (1 - yx1M) ^ mM
If AL1M > 0.5 Then AL1M = 0.5
BT1M = yx1M ^ (2 * nM)
End Sub
'=====Для более твердого слоя=====
Public Sub calcT(dEmas, Yx, Ex, Eh, ABC, BBC, PPx2, GGx2, Hx1T, Hx2T, Px12T, Px22T, GTFT, yx1T, Gx1T, EET, Al, BT, GTF)
qws = 1
If i <> 1 Then yx1T = Yx(2, i - 1)
yx1T = RpuT / rpmT * H0T / Hx2T
If yx1T > 1 Then yx1T = 1
AALT = aT * (1 - yx1T) ^ mT
BBTT = yx1T ^ (2 * nT)
PPx2T = GTFT * Sqr(BBTT * (1 + 4 * AALT) / AALT) / 3
GGx2T = PPx2T * (1 - 2 * AALT) / (1 + 4 * AALT)
PPx2(qws, i) = PPx2T: GGx2(qws, i) = GGx2T
xx1 = (1 - 2 * AL2T) * Hx2T / (1 + 4 * AL2T) + 1 / 2 * ((Hx1 - Hx2) - 1 / 2 * (Hx1 - Hx2) - (Hx2T - Hx2T) - (Fx22 + fc) * dx)
xx2 = 1 / 2 * Px12T * ((Hx1 - Hx2) - 1 / 2 * (Hx1 - Hx2) - (Hx1T - Hx2T) - (Fx21 + fc) * dx) - Gx1T * Hx1T
xx3 = Hx2T ^ 2 * (((1 - 2 * AL2T) / (1 + 4 * AL2T)) ^ 2 - 1)
GTFT = a0T * (EET + a1) ^ a2
xx4 = Hx2T ^ 2 * 4 * (1 + AL2T) * BT2T * GTFT ^ 2 / 3 / (1 + 4 * AL2T)
BBC = xx1 ^ 2 * xx2 ^ 2 - (xx1 ^ 2 - xx3) * (xx2 ^ 2 - xx4)
BBC(qws, i) = BBC
If BBC < 0 Then
Px22T = -xx2 / xx1
Else
Px22T = (-xx1 * xx2 + Sqr(BBC)) / (xx1 ^ 2 - xx3)
End If
ABC = Px22T ^ 2 * (((1 - 2 * AL2T) / (1 + 4 * AL2T)) ^ 2 - 1) + 4 * (1 + AL2T) * BT2T * GTFT ^ 2 / 3 / (1 + 4 * AL2T)
If ABC < 0 Then
ABC = 0
Px22T = GTFT * Sqr(4 * (1 + AL2T) * BT2T / 3 / (1 + 4 * AL2T))
End If
ABC(qws, i) = ABC
Gx2T = (1 - 2 * AL2T) * Px22T / (1 + 4 * AL2T) - Sqr(ABC)
EhT = (Hx1T - Hx2T) / Hx1T
If ABC = 0 Then
ExT = 0

```

```

Else
  DeHxT = (Gx22T * (1 + 4 * AL2T) - Px22T * (1 - 2 * AL2T)) / (Px22T * (1 + 4 * AL2T) - Gx2T * (1 -
  2 * AL2T))
  ExT = EhT * DeHxT
End If
Ex(qws, i) = ExT: Eh(qws, i) = EhT
yx1T = yx1T * Hx1T / Hx2T / (1 + ExT)
If yx1T > 1 Then yx1T = 1: znakT = 0
Yx(qws, i) = yx1T
dET = BT2T ^ (1 / 2) * (2 / 9 * ((ExT - EhT) * (ExT - EhT) + ExT * ExT + EhT * EhT)) / yx1T
dEmas(qws, i) = dET
AL2T = aT * (1 - yx1T) ^ mT
If AL2T > 0.5 Then AL2T = 0.5
BT2T = yx1T ^ (2 * nT)
End Sub
'Для мягкого слоя порошка
Sub promM(AI, BT, GTF, ABC)
  Open "prom-M.dat" For Input As 1
  Input #1, H0M, Hx2M, Px11M, Gx2M
  Input #1, AL1M, BT1M, GTF1M, yx1M
  If i > 1 Then
    Input #1, EEM, Px21M, Gx2M, Fx11, Fx21
    Input #1, AI(1, i), BT(1, i), GTF(1, i)
  End If
Close #1
End Sub
'Для твердого слоя порошка
Sub promT(AI, T, GTF, ABC)
  Open "prom-T.dat" For Input As 2
  Input #2, H0T, Hx2T, Px12T, Gx2T
  Input #2, AL2T, BT2T, GTF2T, yx1T
  If i > 1 Then
    Input #2, EET, Px22T, Gx2T, Fx1, Fx21
    Input #2, AI(2, i), BT(2, i), GTTF(2, i)
  End If
Close #2
End Sub

```

Приложение Г . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при вторичной порошковых материалов в закрытой металлической оболочке (VB 6.0)

```

Sub calc(L0, kv2, Rpr)
510:
Pmax = -1E+35
EE = 0
Lop1 = L0 * Sqr(hl1 * (kv2 - 1) / (Hp0 - hl1) + kv2 * (Lop1 / L0) ^ 2)
Lot1 = L0 - Lop1
Lop2 = 0
Lot2 = L0
dx = L0 / Kr
DH = Hp0 - hl1
Hn1 = hl1 + DH * (Lop1 / L0) ^ ah
Hn2 = hl1 + DH * (Lop2 / L0) ^ ah
X1 = L0: Gx1 = 0: Hx1 = Hp0
i = 1
yx1 = Rpu / rpm
Al = a * (1 - yx1) ^ m
If Al > 0.5 Then Al = 0.5
BT = yx1 ^ (2 * n)
GTF = a0 * a1 ^ a2
Px1 = GTF * Sqr(4 * (1 + Al) * BT / 3 / (1 + 4 * Al))
Fx11 = fot1: Fx21 = fot2
'НАЧАЛО ЦИКЛА по разбиению очага деформации
710: X2 = X1 - dx
If X2 < 0 Then X2 = 0.00001
Hx2 = hl1 + DH * (X2 / L0) ^ ah
DHx = Hx1 - Hx2
If X2 > Lop1 Then Fx12 = fot1 * ((X2 - Lop1) / (L0 - Lop1)) ^ af1
If X2 > Lop2 Then Fx22 = fot2 * ((X2 - Lop2) / (L0 - Lop2)) ^ af2
If X2 <= Lop1 Then Fx12 = -fop1 * ((Lop1 - X2) / Lop1) ^ af1
If X2 <= Lop2 Then Fx22 = -fop2 * ((Lop2 - X2) / Lop2) ^ af2
xx1 = (1 - 2 * Al) * Hx2 / (1 + 4 * Al) + 1 / 2 * (Hx1 - Hx2 - (Fx12 + Fx22) * dx)
xx2 = Px1 / 2 * (Hx1 - Hx2 - (Fx11 + Fx21) * dx) - Gx1 * Hx1
xx3 = Hx2 ^ 2 * (((1 - 2 * Al) / (1 + 4 * Al)) ^ 2 - 1)
GTF = a0 * (EE + a1) ^ a2
xx4 = Hx2 ^ 2 * 4 * (1 + Al) * BT * GTF ^ 2 / 3 / (1 + 4 * Al)
BBC = xx1 ^ 2 * xx2 ^ 2 - (xx1 ^ 2 - xx3) * (xx2 ^ 2 - xx4)
BBCm(i) = BBC
If BBC < 0 Then
Px2 = -xx2 / xx1
Else
Px2 = (-xx1 * xx2 + Sqr(BBC)) / (xx1 ^ 2 - xx3)
End If
ABC = Px2 ^ 2 * (((1 - 2 * Al) / (1 + 4 * Al)) ^ 2 - 1) + 4 * (1 + Al) * BT * GTF ^ 2 / 3 / (1 + 4 * Al)
If ABC < 0 Then ABC = 0
ABCm(i) = ABC
Gx2 = (1 - 2 * Al) * Px2 / (1 + 4 * Al) - Sqr(ABC)
If Px2 > Pmax Then Pmax = Px2: imax = i
Eh = (Hx1 - Hx2) / Hx1
If ABC = 0 Then
Ex = 0
Else

```

```

DeHx = (Px2 * (1 + 4 * Al) - Gx2 * (1 - 2 * Al)) / (Gx2 * (1 + 4 * Al) - Px2 * (1 - 2 * Al))
DeHx = Abs(DeHx)
Ex = Eh / DeHx
End If
yx1 = yx1 * Hx1 / Hx2 / (1 + Ex)
Yxm(i) = yx1
dE = BT ^ (1 / 2) * (2 / 9 * ((Ex - Eh) ^ 2 + Eh ^ 2 + Ex ^ 2)) / yx1
EE = EE + dE
tau1vm(i) = Px1 * Fx11
tau1nm(i) = Px1 * Fx21
tau2vm(i) = Px2 * Fx12
tau2nm(i) = Px2 * Fx22
Al = a * (1 - yx1) ^ m
If Al > 0.5 Then Al = 0.5
BT = yx1 ^ (2 * n)
Alm(i) = Al: BTm(i) = BT: GTFm(i) = GTF
Gxm(i) = Gx2: Xm(i) = X2
X1 = X2: Px1 = Px2: Gx1 = Gx2: Fx11 = Fx12: Fx21 = Fx22
Hx1 = Hx2
Xm(i) = X2: Hxm(i) = Hx2: Fx1m(i) = Fx12: Fx2m(i) = Fx22
Px2m(i) = Px2
i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 710
If Px2 > 0 Then
YHL1 = hl1 * Px2 / el
LYP = Sqr(Rpr * YHL1)
Gx2 = Gx2 - 0.5 * LYP * Px2 * (fop1 + fop2) / hl1
If Gx2 > G0 Then kv = kv + 0.001: Print #1, "kv="; kv; "Gx2="; Gx2: GoTo 510
End If
End Sub

```

```
Private Sub Command1_Click()
```

```
'Исходные данные
```

```
Hp = Val(Text23.Text) 'толщина оболочки, мм
```

```
Hp0 = Val(Text1.Text) 'исходная толщина порошка, мм
```

```
hl1 = Val(Text2.Text) 'конечная толщина ленты, мм
```

```
b = Val(Text3.Text) 'ширина ленты, мм
```

```
B2 = Val(Text24.Text)
```

```
H = Val(Text25.Text)
```

```
b1 = Val(Text26.Text) 'геометрические размеры сечения оболочек, мм
```

```
H1 = Val(Text28.Text) 'высота сечения прямоугольной оболочки, мм
```

```
R1 = Val(Text4(1).Text)
```

```
R2 = Val(Text4(0).Text) 'радиус рабочих валков, мм
```

```
V1 = Val(Text8.Text) 'скорость прокатки, м/с
```

```
a = Val(Text5.Text)
```

```
m = Val(Text6.Text)
```

```
n = Val(Text7.Text) 'коэффициенты для каждого состава порошка
```

```
kv = Val(Text9.Text) 'коэффициент асимметрии
```

```
Rpu = Val(Text10.Text) 'плотность утрамбовки
```

```
rpm = Val(Text11.Text) 'плотность твердой фазы
```

```
G1 = Val(Text12.Text) 'напряжение переднего натяжения, Н
```

```
fot1 = Val(Text13(0).Text)
```

```
fot2 = Val(Text13(1).Text) 'коэффициенты трения в зоне отставания
```

```
fop1 = Val(Text13(2).Text)
```

```
fop2 = Val(Text13(3).Text) 'коэффициенты трения в зоне опережения
```

```
af1 = Val(Text14(0).Text)
```

```
af2 = Val(Text14(1).Text) 'коэффициенты, характеризующие распределение трения
```

```
ah = Val(Text15.Text) 'степенной показатель, описывающий форму контактной поверхности
```

```
ak = Val(Text16.Text) 'степенной показатель кинематической асимметрии
```

```
ev = Val(Text17(0).Text) 'модуль упругости валка
```

```

el = Val(Text17(1).Text) 'модуль упругости ленты
ep = Val(Text27.Text) 'модуль упругости оболочки
wv = Val(Text18(0).Text) 'коэффициент Пуассона для валка
wl = Val(Text18(1).Text) 'коэффициент Пуассона для ленты
Kr = Val(Text19.Text) 'число разбиений очага деформации
a0 = Val(Text20.Text)
a1 = Val(Text21.Text)
a2 = Val(Text22.Text) 'коэффициенты упрочнения
Open App.Path & "/result.txt" For Output As 1
500:
kv2 = (R2 + Hp) / R1 * kv
Rpr = 2 * R1 * (R2 + Hp) / (R1 + R2 + Hp)
Lmax = Sqr(2 * R1 * (Hp0 - hl1))
Lmin = Sqr(Rpr * (Hp0 - hl1))
800:
L0 = (Lmax + Lmin) / 2
Pmax = -1E+35
EE = 0
Lop1 = L0 * Sqr(hl1 * (kv2 - 1) / (Hp0 - hl1) + kv2 * (Lop1 / L0) ^ 2)
Lot1 = L0 - Lop1
Lop2 = 0
Lot2 = L0
dx = L0 / Kr
DH = Hp0 - hl1
Hn1 = hl1 + DH * (Lop1 / L0) ^ ah
Hn2 = hl1 + DH * (Lop2 / L0) ^ ah
X1 = L0: Gx1 = 0: Hx1 = Hp0
i = 1
yx1 = Rpu / rpm
Al = a * (1 - yx1) ^ m
If Al > 0.5 Then Al = 0.5
BT = yx1 ^ (2 * n)
GTF = a0 * a1 ^ a2
Px1 = GTF * Sqr(4 * (1 + Al) * BT / 3 / (1 + 4 * Al))
Fx11 = fot1: Fx21 = fot2
700: X2 = X1 - dx
If X2 < 0 Then X2 = 0.00001
Hx2 = hl1 + DH * (X2 / L0) ^ ah
DHx = Hx1 - Hx2
If X2 > Lop1 Then Fx12 = fot1 * ((X2 - Lop1) / (L0 - Lop1)) ^ af1
If X2 > Lop2 Then Fx22 = fot2 * ((X2 - Lop2) / (L0 - Lop2)) ^ af2
If X2 <= Lop1 Then Fx12 = -fop1 * ((Lop1 - X2) / Lop1) ^ af1
If X2 <= Lop2 Then Fx22 = -fop2 * ((Lop2 - X2) / Lop2) ^ af2
xx1 = (1 - 2 * Al) * Hx2 / (1 + 4 * Al) + 1 / 2 * (Hx1 - Hx2 - (Fx12 + Fx22) * dx)
xx2 = Px1 / 2 * (Hx1 - Hx2 - (Fx11 + Fx21) * dx) - Gx1 * Hx1
xx3 = Hx2 ^ 2 * (((1 - 2 * Al) / (1 + 4 * Al)) ^ 2 - 1)
GTF = a0 * (EE + a1) ^ a2
xx4 = Hx2 ^ 2 * 4 * (1 + Al) * BT * GTF ^ 2 / 3 / (1 + 4 * Al)
BBC = xx1 ^ 2 * xx2 ^ 2 - (xx1 ^ 2 - xx3) * (xx2 ^ 2 - xx4)
BBCm(i) = BBC
If BBC < 0 Then
Px2 = -xx2 / xx1
Else
Px2 = (-xx1 * xx2 + Sqr(BBC)) / (xx1 ^ 2 - xx3)
End If
ABC = Px2 ^ 2 * (((1 - 2 * Al) / (1 + 4 * Al)) ^ 2 - 1) + 4 * (1 + Al) * BT * GTF ^ 2 / 3 / (1 + 4 * Al)
If ABC < 0 Then ABC = 0
ABCm(i) = ABC
Gx2 = (1 - 2 * Al) * Px2 / (1 + 4 * Al) - Sqr(ABC)
If Px2 > Pmax Then Pmax = Px2: imax = i

```

```

Eh = (Hx1 - Hx2) / Hx1
If ABC = 0 Then
Ex = 0
Else
DeHx = (Px2 * (1 + 4 * Al) - Gx2 * (1 - 2 * Al)) / (Gx2 * (1 + 4 * Al) - Px2 * (1 - 2 * Al))
DeHx = Abs(DeHx)
Ex = Eh / DeHx
End If
yx1 = yx1 * Hx1 / Hx2 / (1 + Ex)
Yxm(i) = yx1
dE = BT ^ (1 / 2) * (2 / 9 * ((Ex - Eh) ^ 2 + Eh ^ 2 + Ex ^ 2)) / yx1
EE = EE + dE
tau1vm(i) = Px1 * Fx11
tau1nm(i) = Px1 * Fx21
tau2vm(i) = Px2 * Fx12
tau2nm(i) = Px2 * Fx22
Al = a * (1 - yx1) ^ m
If Al > 0.5 Then Al = 0.5
BT = yx1 ^ (2 * n)
Alm(i) = Al: BTm(i) = BT: GTFm(i) = GTF
Gxm(i) = Gx2: Xm(i) = X2
X1 = X2: Px1 = Px2: Gx1 = Gx2: Fx11 = Fx12: Fx21 = Fx22
Hx1 = Hx2
Xm(i) = X2: Hxm(i) = Hx2: Fx1m(i) = Fx12: Fx2m(i) = Fx22
Px2m(i) = Px2
i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 700
If Px2 < 0 Then GoTo 1000
YHL1 = hl1 * Px2 / el
LYP = Sqr(Rpr * YHL1)
Gx2 = Gx2 - 0.5 * LYP * Px2 * (fop1 + fop2) / hl1
If Gx2 > G0 Then kv2 = kv2 + 0.001: Print #1, "kv2="; kv2; "Gx2="; Gx2: GoTo 800
kv = 1
1000:
i = Kr
1001:
Wx1 = 4 - 5 * (L0 - Xm(i - 1)) / (L0 - Xm(i)) + ((L0 - Xm(i - 1)) ^ 5 / (L0 - Xm(i)) ^ 5)
'коробчатая оболочка
'MI = ((B2 + 2 * b1) * H ^ 3 - b * (H - Hp) ^ 3 - 2 * b1 * (H - Hp) ^ 3) / 12
'Wx2 = Px2m(i) * b * (L0 - Xm(i)) ^ 5 / 120 / ep / MI
'прямоугольная оболочка
'MI = (B2 * H1 ^ 3 - b * (H1 - Hp) ^ 3) / 12
'Wx2 = Px2m(i) * b * (L0 - Xm(i)) ^ 5 / 120 / ep / MI
'подложка
Wx2 = Px2m(i) * (L0 - Xm(i)) ^ 4 / 10 / ep / Hp ^ 3
Wx = Abs(Wx1 * Wx2)
Wxm(i) = Wx
Y2 = Sqr((R2 + Hp) ^ 2 - Xm(i) ^ 2) - Sqr((R2 + Hp) ^ 2 - Xm(i - 1) ^ 2)
arcs = Xm(i) / (R2 + Hp): arcs1 = arcs ^ 2 / (1 - arcs ^ 2)
Y1 = (Xm(i - 1) - Xm(i)) * (Tan(Atn(Sqr(arcs1)))) + Wx
Y1m(i) = Y1: Y2m(i) = Y2
If Y2 > Y1 Then
xotr = Xm(i): Potr = Px2m(i)
Else
i = i - 1
If i = 1 Then
arcs2 = L0 / R1: arcs3 = arcs2 ^ 2 / (1 - arcs2 ^ 2)
arcs4 = L0 / (R2 + Hp): arcs5 = arcs4 ^ 2 / (1 - arcs4 ^ 2)
H0r = hl1 + R1 * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs3)))) + (R2 + Hp) * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs5))))
GoTo 3000

```



```

End If
GoTo 1001
End If
dH01 = R1 * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs3))))
'WH0 = Potr * b * (L0 - xotr) ^ 5 * 4 / (120 * ep * MI)
' подложка
WH0 = Potr * (L0 - xotr) ^ 4 * 4 / (10 * ep * Hp ^ 3)
arcs6 = xotr / (R2 + Hp): arcs7 = arcs6 ^ 2 / (1 - arcs6 ^ 2)
dH02 = (R2 + Hp) * (1 - Cos(Atn(Sqr(arcs7)))) + (L0 - xotr) * Tan(Atn(Sqr(arcs7))) + WH0
Ldyg = Sqr(R2 ^ 2 - (R2 - dH02) ^ 2)
Ldygm(i) = Ldyg
H0r = hl1 + dH01 + dH02
3000:
dLL = 2 * (Lmax - Lmin) / (Lmax + Lmin) * 100
If dLL < 5 Then GoTo 2000
If H0r > Hp0 Then Lmax = L0
If H0r < Hp0 Then Lmin = L0
GoTo 800
2000:
'ПЕРЕХОД НА ПОДПРОГРАММУ ОКОНЧАТЕЛЬНОГО РАСЧЕТА
L0 = Ldyg
Call calc(L0, kv2, Rpr)
'РАСЧЕТ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
rpl = Yxm(Kr)
i = 1: SP = 0
1150: SP = SP + Px2m(i)
i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 1150
Rpr = L0 ^ 2 / (Hp0 - hl1)
PSR = SP / Kr
i = 1
SP = Px2m(1) * dx / 2: SM1 = Px2m(1) * Fx1m(1) * dx * R1 / 2: SM2 = Px2m(1) * Fx2m(1) * dx * R2 / 2
If i < 1.5 Then GoTo 1310
1280: SP = SP + 0.5 * (Px2m(i) + Px2m(i - 1)) * dx
SM1 = SM1 + 0.5 * (Px2m(i) + Fx1m(i) + Px2m(i - 1) * Fx1m(i - 1)) * dx * R1
SM2 = SM2 + 0.5 * (Px2m(i) + Fx2m(i) + Px2m(i - 1) * Fx2m(i - 1)) * dx * R2
1310: i = i + 1
If i <= Kr Then GoTo 1280
PPL = SP * b / 1000: MPL1 = SM1 * b / 1000: MPL2 = SM2 * b / 1000
PYP = Px2m(Kr) * LYP * b / 2000
PPR = PPL + PYP
MM1 = MPL1 - 0.5 * Px2m(Kr) * LYP * fop1 * R1 / 1000
MM2 = MPL2 - 0.5 * Px2m(Kr) * LYP * fop2 * R2 / 1000
T0 = G0 * Hp0 * b
T1 = Gx2 * hl1 * b
Sop1 = (Hn1 / hl1 - 1) * 100
Sop2 = (Hn2 / hl1 - 1) * 100
N1 = (MM1 / R1) * V1 * hl1 / Hn1
N2 = (MM2 / R2) * V1 * hl1 / Hn2
Ns = N1 + N2
rpl = rpl * rpm
AYD = (MM1 * hl1 / R2 / Hn1 + MM2 * hl1 / R1 / Hn2) / (b * hl1 * rpl)
For i = 1 To Kr
Print #1, "i="; i; "Xi="; Xm(i); "Hxi="; Hxm(i); "Yxi="; Yxm(i); "Pxi="; Px2m(i); "Gxi="; Gxm(i); "Wxi=";
Wxm(i); "tau1vi="; tau1vm(i); "tau2vi="; tau2vm(i); "tau1ni="; tau1nm(i); "tau2ni="; tau2nm(i); xotr;
"Ldygi="; Ldygm(i)
Next
End
End Sub

```

Приложение Д . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при волочении порошковой проволоки (QBX 7.0)

```
'Программа по расчету НДС при волочении порошковой проволоки
'с учетом пластической деформации оболочки и уточненного условия пластичности
OPEN "po-local.txt" FOR OUTPUT AS 1
OPEN "po-int.txt" FOR OUTPUT AS 2
CLS
CONST pi = 3.1416
'===== исходные данные =====
D00 = 5: d00p = 4.5
D0 = 5'исходный общий диаметр проволоки
D1 = 3: 'конечный общий диаметр проволоки d0p = D0 - .5 'исходный диаметр порошка
y0 = .24 'исходная отн. плотность порошкового сердечника alfa = 5 'град, угол наклона
образующей волоки
alfa = pi * alfa / 180
T0 = .2 'кН, заднее натяжение
T0 = T0 * 1000
f0 = .2'коэффициент трения на входе в ОД
f1 = .25'коэффициент трения на выходе в ОД
a0 = 241.2: a1 = 1133.4: a2 = -1195.2: a3 = 525.6
'a0 = 75: a1 = 885: a2 = -828: a3 = 286
ad = 1' степенной показатель, хар-щий форму контактной поверхности
af = 1' степенной показатель, хар-щий форму эпюры трения
Beta = 1.155' коэффициент Лодэ
Kr = 100'количество разбиений очага деформации
'--- powder ---
AA = .44: TT = 1: NN = 2.5
v1 = .03: kv = 1:
rpu = .25
rpm = 1: 'G1 = 0
a0p = 458: a1p = 1: a2p = 0
y0 = rpu / rpm
'===== calculation =====
L = (D0 - D1) / 2 / TAN(alfa)'протяженность очага деформации dx = L / Kr
'Начальные условия
x1 = L: Dx1 = D0: dx1p = d0p: Tx1 = T0: Px1m = 0: fx1 = f0
K2x1 = a0: Gx1 = -Tx1 / pi / (Dx1 ^ 2 - dx1p ^ 2) * 4
'--- powder ---
Al = AA * (1 - y0) ^ TT
IF Al > .5 THEN COLOR 11: PRINT "al="; Al: Al = .5: SOUND 1000, 2: SLEEP Bt = y0 ^ (2 * NN)
Gsx = a0p * a1p ^ a2p
Gx1p = 0: Px1p = 0 yx1 = y0: EE = 0
PRINT USING "i=### Dx=##.### dx=##.### S=##.### Px=###.# Gxp=###.# Gxm=###.#
yx=##.### K2=###"; i; Dx1; dx1p; Dx1 - dx1p; Px1p; Gx1p; Gx1; yx1; a0 * 1.155
PRINT #1, USING "i=### x/l=#.### Dx=##.### dx=##.### S=##.### Px=###.# Gxp=###.#
Gxm=###.# yx=##.### K2=###"; i; x1 / L; Dx1; dx1p; Dx1 - dx1p; Px1p; Gx1p; Gx1; yx1; a0 * 1.155
FlagK2 = 0
FOR i = 1 TO Kr
FlagReduce = 0
x2 = x1 - dx: IF x2 < 0 THEN x2 = 0
Dx2 = D1 + (D0 - D1) * (x2 / L) ^ ad
fx2 = f1 + (f0 - f1) * (x2 / L) ^ af
'==== P O W D E R ====
dx2p = Dx2 - (D0 - d0p)
fx2p = f1 + (f0 - f1) * (x2 / L) ^ af
```

```

10 :
Px2p = Gsx * SQR(Bt * (1 + 4 * Al) / Al) / 3
Gx2p = (1 - 2 * Al) * Px2p / (1 + 4 * Al) '- SQR(ABC)
'==== M E T A L L =====
Fx0m = pi * (D0 ^ 2 - d0p ^ 2) / 4
IF FlagK2 = 0 THEN Fx0m = pi * (Dx1 ^ 2 - dx1p ^ 2) / 4
IF FlagK2 = 1 THEN Fx0m = pi * (Dx0K2 ^ 2 - dx0pK2 ^ 2) / 4
IF FlagReduce = 0 THEN dx2p = dx2p + .001
15 : Fx2m = pi * (Dx2 ^ 2 - dx2p ^ 2) / 4
ex2 = (Fx0m - Fx2m) / Fx0m
Fx00m = pi * (D00 ^ 2 - d00p ^ 2) / 4 e0 = (Fx00m - Fx2m) / Fx00m
GT01 = a0 + a1 * e0 + a2 * e0 ^ 2 + a3 * e0 ^ 3
GT02 = 2 / 3 * (a1 + 2 * a2 * e0 + 3 * a3 * e0 ^ 2) * ex2
GT03 = 8 / 15 * (1 - e0) ^ 2 * (a2 + 3 * a3 * e0) * ex2 ^ 2
GT04 = 16 / 35 * (1 - e0) ^ 3 * a3 * ex2 ^ 3
K2x2 = Beta * (GT01 + GT02 + GT03 + GT04)
Px2m = K2x2 * (Dx2 ^ 2 - dx2p ^ 2) + Gx1 * (Dx1 ^ 2 - dx1p ^ 2)
Px2m = Px2m + Px1m * ((dx1p + dx2p) * dx * (TAN(alfa) - fx1p) - (Dx1 + Dx2) * dx * (TAN(alfa) -
fx1))
Px2m = Px2m / ((Dx2 ^ 2 - dx2p ^ 2) + dx * (Dx1 + Dx2) * (TAN(alfa) + fx2) - dx * (dx1p + dx2p) *
(TAN(alfa) + fx2p))
Gx2 = Px2m - K2x2
'==== P E R E H O D =====
IF FlagReduce= 0 THEN dx2p = dx2p - .001
IF FlagReduce= 0 AND Px2m > Px2p THEN Px2m = 1.155 * a0 + Gx1: Gx2 = Gx1: K2x2 = 1.155 * a0
PRINT USING "i=### Px2p=###.## Px2m=###.##"; i; Px2p; Px2m: SLEEP 1
DO WHILE Px2m< Px2p
dx2p = dx2p + .0001: FlagReduce = 1:
IF dx2p >= dx1p THEN dx2p = dx1p - .0001: Px2p = 0: GOTO 15 zzz = zzz + 1
COLOR 2
GOTO 10
LOOP
IF Px2m >= Px2p THEN COLOR 12: Px2p = Px2m: Gx2p = (1 - 2 * Al) * Px2p / (1 + 4 * Al) '- SQR(ABC)
IF FlagReduce = 1 AND FlagK2 = 0 THEN FlagK2 = 1: Dx0K2 = Dx1: dx0pK2 = dx1p
zzz = 0
25 :
'==== P O W D E R =====
Fdx1p = pi * dx1p ^ 2 / 4: Fdx2p = pi * dx2p ^ 2 / 4
Eh = (Fdx1p - Fdx2p) / Fdx1p
DeHx = (Px2p * (1 + 4 * Al) - Gx2p * (1 - 2 * Al)) / (2 * Gx2p * (1 + Al) - 2 * Px2p * (1 - 2 * Al))
Ex = Eh / DeHx
yx2 = yx1 * Fdx1p / Fdx2p / (1 + Ex)
dE = Bt ^ (1 / 2) * (2 / 9 * ((Ex - Eh) ^ 2 + Ex ^ 2 + Eh ^ 2)) / yx2
Al = AA * (1 - yx2) ^ TT
IF Al > .5 THEN Al = .5
Bt = yx2 ^ (2 * NN)
EE = EE + dE
'==== yslovia svyazi =====
x1 = x2: dx1p = dx2p: Dx1 = Dx2: fx1 = fx2: fx1p = fx2p
Px1m = Px2m: Px1p = Px2p: Gx1 = Gx2: Gx1p = Gx2p: yx1 = yx2
taux2(i) = Px2(i) * fx2(i)
Gsx(i) = a0p * (EE + a1p) ^ a2p
IF i = 1 OR CINT(i / 10) = i / 10 THEN PRINT USING "i=### Dx=###.### dx=###.### S=#.###
Px=###.## Gxp=###.## Gxm=###.## yx=#.### K2=###"; i; Dx2; dx2p; Dx2 - dx2p; Px2p; Gx2p;
Gx2; yx2; K2x2
IF i = 1 OR CINT(i / 10) = i / 10 OR i > 80 THEN PRINT #1, USING "i=### x/l=#.### Dx=###.###
dx=###.### S=#.### Px=###.## Gxp=###.## Gxm=###.## yx=#.### K2=###"; i; x1 / L; Dx2;
dx2p; Dx2 - dx2p; Px2p; Gx2p; Gx2; yx2; K2x2 NEXT
Tx2 = ABS(Gx2 * Fx2m)
Kz = 680 / K2x2 * 1.155

```

```
PRINT USING "D0=##.## dop=##.## D1=##.## d1p=##.## e=##.## y1=##.## Kz=##.##  
T1=#####.##"; D0; d0p; D1; dx2p; ex2; yx2; Kz; Tx2  
PRINT #2, USING "D0=##.## dop=##.## D1=##.## d1p=##.## e=##.## y1=##.##  
Kz=##.## T1=#####.##"; D0; d0p; D1; dx2p; ex2; yx2; Kz; Tx2
```

Приложение Е . Программные средства по расчету напряженно-деформированного состояния и энергосиловых параметров при плющении порошковой проволоки (VB 6.0)

```

Const MassMax = 55
'Public d0 As Single
Private Amas(MassMax) As Single, Hmas(MassMax) As Single
Private Lmas As Single, Krmas As Integer
Private Sub Command1_Click()

'Двухмерная математическая модель процесса плющения порошковой проволоки
Dim F(MassMax, MassMax), Pz(MassMax, MassMax), Pzz(MassMax), K2(MassMax, MassMax)
Dim Gz(MassMax, MassMax), By(MassMax), dx(MassMax), K2mas(MassMax), Ng(MassMax, MassMax)
Dim bh(MassMax, MassMax), Hy(MassMax), igrek(MassMax)
Dim PPx2(MassMax, MassMax), Yx2(MassMax), GGx2(MassMax, MassMax)
Dim Fxx(MassMax)

k = 20: n = 20
Krmas = k
f0 = 0.2: F1 = 0.2: e0 = 0.3
Epp = 210000: nu = 0.3: Rv = 100 / 2
d0 = Val(Text2.Text)
h = Val(Text3.Text)
hS = Val(Text1.Text)
d0 = d0 - 2 * hS
h = h - hS * 2
AA = 0.44
TT = 1
NN = 2.5
v1 = 0.03
kv = 1

rpu = Val(Text4.Text)
Rpm = 10
G1 = 0
a0 = 595.5: a1 = 1: a2 = 0
y0 = rpu / Rpm
Pn = 0
L = Sqr(Rv * (d0 - h)) * 1.05
Lmas = L
Rv = L ^ 2 / (d0 - h)
dy = L / k
YY = rpu / Rpm
AL = AA * (1 - YY) ^ TT
If AL > 0.5 Then AL = 0.5
BT = YY ^ (2 * NN)
GTTF = a0 * a1 ^ a2
EE = 0
For j = 1 To k
igrek(j) = dy * (j - 0.5)
'Hy(j) = h1 + 2 * (Rv - SQR(Rv ^ 2 - igrek(j) ^ 2))
Hy(j) = d0 - 2 * (Rv - Sqr(Rv ^ 2 - igrek(j) ^ 2))
By(j) = 3.1416 * (d0 ^ 2 - Hy(j) ^ 2) / Hy(j) / 4
dx(j) = By(j) / n
Fhh = 3.1416 * Hy(j) ^ 2 / 8
a = 0.9
YYYYx = rpu / Rpm * d0 / Hy(j)

```

```

AaL = AA * (1 - YYYx) ^ TT
BBT = YYYx ^ (2 * NN)
Pz(j, 0) = GTTF * Sqr(4 * (1 + AL) * BT / 3 / (1 + 4 * AL))
'f(j, 0) = f0 + (f1 - f0) * ( * / By(j)) ^ .5
'f(j, 0) = .2
Pznn = 0: Gznn = 0
Amas(j) = Hy(j): Hmas(j) = Hy(j)
For i = 1 To n / 2
  Fhh = Fhh + dx(j) * Hy(j)
  Fxx(j) = Fhh
  xh = By(j) / 2 - dx(j) * (i - 0.5)
  R = d0 / 2
10 S = 2 * a * (R - Sqr(R ^ 2 - a ^ 2 / 4)) / 3
  ab = 1 - Fhh / S
  If ab > 0 Then GoTo 20
  a = a + 0.001
  If a > d0 Then a = d0: GoTo 20
  GoTo 10
20 H1x = a
  F(j, i) = f0 + (F1 - f0) * (2 * xh / By(j)) ^ 0.5
  bh(j, i) = By(j) / Hy(j)
  PPx2x = GTTF * Sqr(BBT * (1 + 4 * AaL) / AaL) / 3
  GGx2x = PPx2x * (1 - 2 * AaL) / (1 + 4 * AaL)
  PPx2(j, i) = PPx2x: GGx2(j, i) = GGx2x
  GTTF = a0 * (EE + a1) ^ a2
  xx1 = (1 - 2 * AL) * Hy(j) / (1 + 4 * AL) - F(j, i) * dx(j)
  'Old xx2 = -Pz(j, i - 1) * f(j, i) * dx(j) - Gz(j, i - 1) * Hy(j) 'Hx1
  xx2 = Pz(j, i - 1) * F(j, i - 1) * dx(j) + Gz(j, i - 1) * Hy(j)
  xx3 = Hy(j) ^ 2 * (((1 - 2 * AL) / (1 + 4 * AL)) ^ 2 - 1)
  xx4 = Hy(j) ^ 2 * 4 * (1 + AL) * BT * GTTF ^ 2 / 3 / (1 + 4 * AL)
  BBC = xx1 ^ 2 * xx2 ^ 2 - (xx1 ^ 2 - xx3) * (xx2 ^ 2 - xx4)
  If BBC < 0 Then
    Pz(j, i) = -xx2 / xx1
  Else
    Pz(j, i) = (-xx1 * xx2 + Sqr(BBC)) / (xx1 ^ 2 - xx3)
  End If
  ABC = Pz(j, i) ^ 2 * (((1 - 2 * AL) / (1 + 4 * AL)) ^ 2 - 1) + 4 * (1 + AL) * BT * GTTF ^ 2 / 3 / (1 +
4 * AL)
  If ABC < 0 Then
    ABC = 0
    Pz(j, i) = GTTF * Sqr(BT * (1 + 4 * AL) / AL) / 3
  End If
  Gz(j, i) = (1 - 2 * AL) * Pz(j, i) / (1 + 4 * AL) - Sqr(ABC)
  Pn = Pn + Pz(j, i)
  Pznn = Pznn + Pz(j, i): Gznn = Gznn + Gz(j, i):
51
Next:
If j = 1 Then Hy(0) = H1x
  Eh = (Hy(j - 1) - Hy(j)) / Hy(j - 1)
If ABC = 0 Then
  Ex = 0
Else
  Pznn = Pznn / n * 2: Gznn = Gznn / n * 2
  DeHx = (Pznn * (1 + 4 * AL) - Gznn * (1 - 2 * AL)) / (Gznn * (1 + 4 * AL) - Pznn * (1 - 2 * AL))
  Ex = Eh / DeHx
End If
  Yx2(j) = YY
  YY = YY * Hy(j - 1) / Hy(j) / (1 + Ex)
  'Yx2(j) = YY
  dE = BT ^ (1 / 2) * (2 / 9 * ((Ex - Eh) ^ 2 + Ex ^ 2 + Eh ^ 2)) / YY

```

```

    AL = AA * (1 - YY) ^ TT
    If AL > 0.5 Then AL = 0.5
    BT = YY ^ (2 * NN)
    'AL(j) = AL: BT(j) = BT: GTTF(j) = GTTF
  'END IF
  EE = EE + dE
Next
Pn = Pn / n * 2
dU = (Pn * h * (1 - nu ^ 2)) / Epp
Lup = Sqr(Rv * dU)
Pu = Lup * By(1) * Pn
Ppl = P + Pu
  alf = Atn(Hy(n) / By(n)) * 180 / 3.1416: Rv = Rv: Rg = a / 2 + h ^ 2 / 8 / a
  Call ProfileK(hS, alf, Rv, Rg, a0, a1, a2, a3, RostU, Pp, Tsum)
  FileOUT$ = "prob.txt"
  Open App.Path & "\" & FileOUT$ For Output As 5
  Pall = 0: Ppob = 0: Mall = 0
  Print #5, USING; "j=### Pz=##### Yx2=#.###"
  For j = 1 To k
    For i = 1 To n / 2
      Ppob1 = 2 * Pz(j, i) * dy * dx(j): Ppob = Ppob + Ppob1
    Next i
    Pall = Pall + Ppob
    Print #5, j; Ppob; Yx2(j)
    Mjj = Ppob * igrek(j) * 2
    Mall = Mall + Mjj
    Ppob = 0
  Next j
  Close 5
  Pall = Int(Pall): Mall = Int(Mall * 10) / 10
  Label1.Caption = "P=" & CStr(Pall) & " M=" & CStr(Mall / 1000)
  P = Pall + Pu
  Mupr = Pu * Lup / 2
  M = Mall - Mupr
  P = Int(P): M = Int(M / 100) / 10
  Label2.Caption = "powder - P=" & CStr(P) & " M=" & CStr(M)
  Pp = Int(Pp): Tsum = Int(Tsum * 10) / 10
  Label3.Caption = "shell - P=" & CStr(Pp) & " M=" & CStr(Tsum)
  Pl = P + Pp: Ml = M + Tsum
  Label1.Caption = "P=" & CStr(Pl) & " M=" & CStr(Ml) & " b=" & CStr(By(k) * 2 + a)
  Label8.Caption = "y1=" & CStr(YY)
  FileOUT$ = "res.txt"
  Open App.Path & "\" & FileOUT$ For Output As 1
  Print #1, "Результаты расчета энерго-силовых параметров"
  Print #1, "      процесса плющения"
  For j = 1 To k
    Print #1, " By   i   Pz(j,i)   Gz(j,i)   Yx2"
    For i = 1 To n / 2
      Print #1, By(j) / n / 2 * i; j; Pz(j, i); Gz(j, i); Yx2(j)
    Next:
  Next
  Print #1, "Плотность порошка y1"; YY
  Close #1
  FileOUT$ = "res2.txt"
  Open App.Path & "\" & FileOUT$ For Output As 2
  Print #2, "d0=##.# h1=##.## b1=##.## P=##.# M=##.# y1=##.###";
  Print #2, d0; h1; By(k); P; M; YY
  Close 2

End Sub

```

Public Sub ProfileK(hS, alf, Rv, Rg, a0, a1, a2, a3, RostU, Pp, Tsum)

Const n = 101, Em = 210000

Dim i As Integer

Dim St, R0, R1, w, T1, deltah, X0, X1, stepen As Single

Dim y(n), ty(n), e(n), Gt(n), G(n), east(n) As Single

Dim y1(n), ty1(n), e1(n), Em1(n), Gt1(n), G1(n), east1(n) As Single

Dim def(n), def1(n), def2(n), def3(n) As Single

Dim def11(n), def111(n), def211(n), def311(n) As Single

Dim ec, T1kon, m1, T, M, Xost, Rost, ostnagr, DTM, F, Z, F1, Z1 As Single

Krx = 100 ' разбиение по длине очага деформации

T1 = 10000 'натяжение ? не участвует, сразу обнуляется

R0 = d0 / 2 'исходная кривизна листа, сейчас как-бы ровный

alf = alf / 180 * 3.1416

Krx = Krmass

Open App.Path & "\ & "res.txt" For Output As 1

R1 = Rg

h1 = hS

Cg = 2 * Rg * Sin(alf / 2)

Beta = (3.1415 - alf) / 2

dh = Cg * Cos(Beta)

L0 = Lmas

dx = L0 / Krx

x = 0

Dim Ppr(100), Ccb(100), Ccg(100) As Single

If Rg <= 0 Then GoTo 100

R0 = Rg

h1 = hS

x = 0

dh = d0 / 2 - Rg

dWx = dh

For j = 1 To Krx 'цикл по длине ОД

If j > 1 Then R0 = R1

Rg = Amas(j) + hS ^ 2 / 8 / Amas(j)

x = x + dx

Wx = dWx * (x / L0) ^ 2

w = Wx

deltah = hS / n:

R1 = Rg

ddy = dWx * R1 - Wx

xx = (ddy + Rg) / (Rg)

xx3 = (Rg - Amas(j)) / Rg

xx3 = 1 / Sqr(1 + xx3 ^ 3)

alfa = 2 * Atn(xx3)

Cg = Amas(j)

hg = Hmas(j)

CCg(j) = Cg

deltah = hS / n

X0 = -1 / R0:

X1 = 1 / Rg:

ec = 0: T1kon = 0: m1 = 0: Xost = 0:

'{Nagruzka}

east(1) = 0:

For i = 1 To n

y(i) = 0.5 * hS - deltah * (i - 0.5):

e(i) = ((1 + X1 * y(i)) * ec + (X1 - X0) * y(i)) / (1 + X0 * y(i)):

Gt(i) = a0 + a1 * e(i):

F = east(i) + Gt(i) / Em:

Z = east(i) - Gt(i) / Em:

If e(i) > F Then


```

        G(i) = Gt(i)
    Else
        If (e(i) < F) And (e(i) > Z) Then G(i) = Em * (e(i) - eost(i)) Else G(i) = -Gt(i):
    End If
    T1kon = T1kon + G(i) * deltah:
    m1 = m1 + G(i) * y(i) * deltah:
    eost(i) = e(i) - G(i) / Em:
Next
Call galtel(alfa, Rg, h1, Cg, Wxg, Ix, Fx)
Xost = X1 - m1 / Em / Ix
ec = ec - (T1kon / (Fx * Em)):
eost1(n) = eost(n)
If j = Krx Then
    '{Razgruzka}
    DTM = 1: schet = 1
    While DTM > 100 Or schet < 300
        T = 0: Tsum = 0
        M = 0:
        For i = 1 To n
            y1(i) = 0.5 * hS - deltah * (i - 0.5):
            e1(i) = ((1 + Xost * y1(i)) * ec + (Xost - X1) * y1(i)) / (1 + X1 * y1(i)):
            Gt1(i) = a0 + a1 * e1(i):
            F1 = eost1(i) + Gt1(i) / Em:
            Z1 = eost1(i) - Gt1(i) / Em:
            If e1(i) > F1 Then
                G1(i) = Gt1(i)
            Else
                If (e1(i) < F1) And (e1(i) > Z1) Then G1(i) = Em * (e1(i) - eost1(i)) Else G1(i) = -Gt1(i)
            End If
            T = T + G1(i) * deltah:
            Tsum = Tsum + Abs(G1(i) * deltah)
            M = M + G1(i) * y(i) * deltah:
            eost1(i) = e1(i) - G1(i) / Em:
        Next
        Call galtel(alfa, Rg, h1, Cg, Wxg, Ix, Fx)
        Xost = Xost - M / (Wxg * Em)
        ec = ec - (T / (Fx * Em))
        DTM = Abs(T / Fx) + Abs(M / Wxg):
        schet = schet + 1
    Wend
End If
Rost = 1 / Xost:
Ppr(j) = 0
For i = 1 To n
    Print #1, "i="; i; "eost="; eost1(i); "g1="; G(i)
    Ppr(j) = Ppr(j) + (Abs(G(i)) * deltah / Rost) * 2 '2 galtel
Next
Print #1, "w="; w; "R="; Rost; " Ppr="; Ppr(j)
Print #1, "T="; T
Print #1, "M="; M / 1000#
Print #1, "w="; w
Print #1, "Rost="; Rost
Next
Pp = 0
For ii = 1 To Krx
    Pp = Pp + Ppr(ii) * dx * CCg(ii)
Next
Pp = Pp + PpU
Pp = Int(Pp * 10) / 10
Tsum = Int(Tsum * Cg * 10) / 10

```

```

xi = L0: Fxc = 0: xc = 0
For ii = 1 To Krx
  xi = xi - dx / 2
  xc = xc + Abs(Ppr(ii) * dx * xi)
  Fxc = Fxc + Abs(Ppr(ii) * dx)
Next
Mpr = Pp * (L0 - xc / Fxc)
Tsum = (2 * Tsum + Tsum1) * Rv / 1000 * 2 '2 galteli *2 valka
Print #1, "Psum="; Pp; "Ts="; Abs(Tsum)
Rost = Int(Rost * 10) / 10
100:
Tsum = Mpr / 1000
Close
End Sub
Public Sub galtel(alfa, Rg, hS, Cg, Wxg, Ix, Fx)
'определение параметров сечения
'входные - alfa,Rg,h,Cg
'выходные - Wx,Ix
Fx = Rg * hS * alfa
R = Rg + hS / 2: r2 = Rg - hS / 2
V0 = 4 / 3 * (R ^ 3 - r2 ^ 3) / (R ^ 2 - r2 ^ 2) / alfa * Sin(alfa / 2)
Ix = (R ^ 4 - r2 ^ 4) / 8 * (alfa - Sin(alfa)) - Fx * V0 ^ 2
Iy = (R ^ 4 - r2 ^ 4) / 8 * (alfa - Sin(alfa))
Wxg = Ix / 2 / Cg
End Sub
Public Sub Uprofil(alfa, R1, hS, Wy, Iy, Fy)
'вход - alfa,R1,h
'выход - Wy,Iy
Fy = R1 * hS * alfa
R = R1 + hS / 2: r2 = R1 - hS / 2
Iy = (R ^ 4 - r2 ^ 4) / 8 * (alfa - Sin(alfa))
V0 = 4 / 3 * (R ^ 3 - r2 ^ 3) / (R ^ 2 - r2 ^ 2) / alfa * Sin(alfa / 2)
If V0 > R Then Wy = Iy / V0 Else Wy = Iy / (R - V0)
End Sub

```

Приложение Ж. Акты использования

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ПАО «НИИПТМаш»

г. Краматорск



В. В. Тимченко

2013 г.

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты докторской диссертационной работы Грибкова Эдуарда Петровича, а именно, численные математические модели напряженно-деформированного состояния при реализации процессов волочения, плющени и прокатки порошковой проволоки, а также программные средства по автоматизированному расчету технологических режимов и оборудования для производства порошковых электродов были использованы в ПАО «Научно-исследовательском и проектно-технологическом институте машиностроения» при проектировании технологии и оборудования для производства композиционных материалов методами порошковой металлургии, что позволило снизить трудоемкость проектно-конструкторских и проектно-технологических работ при одновременном повышении качества готовой металлопродукции. Экономический эффект составил 218 тыс. грн. по уровню цен на начало 2013 года. Расчеты экономического эффекта не прилагаются, т.к. содержат элементы коммерческой тайны ПАО «Научно-исследовательского и проектно-технологического института машиностроения».

Главный инженер проекта

В. И. Ромашов

УТВЕРЖДАЮ:

Директор

ЧАО «Финпрофиль»

пгт. Печенег

Башкова В.В.


«26» декабря 2014 г.

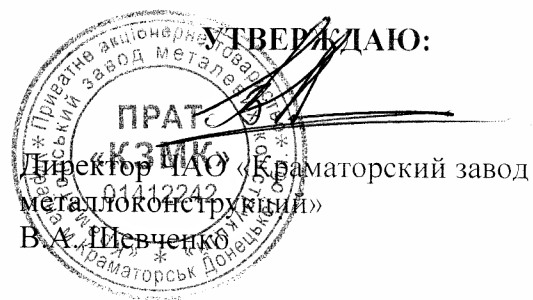


АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты докторской диссертационной работы Грибкова Эдуарда Петровича, а именно, численные математические модели энергосиловых параметров при реализации процессов профилирования, а также соответствующие программные средства по автоматизированному расчету технологических режимов и оборудования использованы в ЧАО «Финпрофиль» при проектировании технологии и оборудования для производства профилей различного сортамента, что позволило снизить трудоемкость проектно-конструкторских и проектно-технологических работ. Экономический эффект за счёт уточнения научно обоснованных требований к мощности приводов профилегибочных агрегатов составил 15 тыс. грн. по уровню цен на конец 2014 года. Ожидаемый эффект составляет 210 тыс. грн. По уровню цен на конец 2014 года. Расчеты экономического эффекта не прилагаются, т.к. содержат элементы коммерческой тайны ЧАО «Финпрофиль». Данный акт не является основанием для предъявления, каких либо экономических претензий.

Технический директор
ЧАО «Финпрофиль»
Горохов В.А.





г. Краматорск

АКТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Результаты докторской диссертационной работы Грибкова Эдуарда Петровича, а именно, математические модели напряженно-деформированного состояния при реализации процессов изготовления порошковых электродов, а также соответствующие им программные средства по автоматизированному расчету технологических режимов и параметров оборудования были использованы в ЧАО «Краматорский завод металлоконструкций» при проектировании технологии и оборудования для производства порошковых проволок и лент, что позволило снизить трудоемкость проектно-конструкторских и проектно-технологических работ. Экономический эффект составил 620 тыс. грн. по уровню цен 2015 года. Расчеты экономического эффекта не прилагаются, т.к. содержат элементы коммерческой тайны ЧАО «Краматорский завод металлоконструкций».

Заместитель директора
по подготовке производства
ЧАО «Краматорский завод
металлоконструкций»,
кандидат технических наук



А. В. Шевченко

УТВЕРЖДАЮ:

Директор производства

металлургического и шахтно-

проходческого оборудования

ПАО «Новокраматорский

машиностроительный завод»

А. И. Сигаренко



АКТ

использования результатов комплекса научно-исследовательских работ по совершенствованию технологий и оборудования для производства горячекатаных и холоднокатаных листов и полос, выполненных совместно ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод» и Донбасской государственной машиностроительной академией в рамках договора о совместном сотрудничестве, а также в рамках филиала кафедры «Автоматизированные металлургические машины и оборудование» (ДГМА) на ПАО «НПКМЗ» и ряда хоздоговорных научно-исследовательских работ.

Основные результаты данного комплекса научно-исследовательских работ, а именно:

- уточненные инженерные, численные и регрессионные математические модели напряженно-деформированного состояния металла и основных показателей качества при реализации процессов горячей и холодной прокатки, правки, резки и отделки листов и полос;
- программные средства по автоматизированному расчету и проектированию технологических режимов процессов горячей и холодной прокатки на толстолистовых, широкополосных и реверсивных станах;
- практические рекомендации по выбору состава основного и вспомогательного оборудования толстолистовых, широкополосных и реверсивных станов горячей и холодной прокатки, а также уточненные исходные данные на их проектирование;

- уточненные методы расчета и рекомендации по выбору электроприводов основного и вспомогательного оборудования толстолистовых и широкополосных станов горячей прокатки;

- уточненные методы автоматизированного расчета и проектирования, а также практические рекомендации по совершенствованию состава и конструктивных параметров механического оборудования приводов, узлов рабочих и опорных валков, нажимных механизмов, устройств уравнивания, узлов станин и других механизмов рабочих клетей станов горячей и холодной прокатки.

Положенные в основу результаты данного комплекса научно-исследовательских работ были использованы в течение 2009–2012 гг. на ПАО «НКМЗ» при проектировании, изготовлении и вводе в эксплуатацию целого ряда прокатного оборудования.

Использование данных материалов позволило снизить себестоимость поставляемой продукции для Изготовителя и, как следствие, снизить цену продукции для Заказчиков.

За счет снижения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технологических работ, а также за счет расширения сортамента, повышения качества и увеличения выхода годной металлопродукции, экономический эффект составил 18800 тыс. (восемнадцать миллионов восемьсот тысяч) грн. по ценам 2012 года.

Настоящий акт предназначен для предъявления в специализированные ученые советы по защите кандидатских и докторских диссертаций и не является основанием для предъявления финансовых требований.

Расчет экономического эффекта не прилагается, так как содержит элементы коммерческой тайны ПАО «НКМЗ».

Главный конструктор производства
металлургического и
шахтно-проходческого оборудования



Ю. В. Сусь

Справка

о долевом участии доцента, канд. техн. наук Грибкова Эдуарда Петровича в экономическом эффекте, полученном при использовании результатов комплекса научно-исследовательских работ в области совершенствования технологий и оборудования для производства листов и полос, выполненных совместно с ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод»

Результаты диссертационной работы Грибкова Эдуарда Петровича на тему «Развитие научных основ и совершенствование оборудования и технологий деформирования длинномерных металлопорошковых изделий в оболочке», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением», а именно

- численные математические модели напряженно-деформированного состояния и основных показателей качества при производстве композиционного металлопроката, включающего порошковые материалы;
- программные средства по автоматизированному расчету и проектированию технологических режимов процессов прокатки;
- практические рекомендации по выбору состава и конструктивных параметров оборудования прокатных станов

были использованы в рамках комплекса научно-исследовательских работ по совершенствованию технологий и оборудования для производства проката на ПАО «Новокраматорский машиностроительный завод».

Суммарный экономический эффект при выполнении данного комплекса научно-исследовательских работ за счёт снижения трудоемкости проектно-конструкторских и проектно-технических работ, а также за счет расширения сортамента, повышения качества и увеличения выхода годной металлопродукции составил 18 800 000 (восемнадцать миллионов восемьсот тысяч) гривен (по уровню цен на конец 2012 г.).

Долевое участие доцента, канд. техн. наук Грибкова Эдуарда Петровича, при выполнении данных работ в качестве ответственного исполнителя составил 10%, что соответствует экономическому эффекту от внедрения результатов его диссертационной работы, представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.05 «Процессы и машины обработки давлением», в объеме 1 800 000 (один миллион восемьсот тысяч) гривен (по уровню цен на конец 2012 г.).

Научный руководитель комплекса
научно-исследовательских работ
по совершенствованию технологий
и оборудования для производства
листов и полос, выполненных совместно
с ПАО «НКМЗ»,
зав. каф. АММ,
канд. техн. наук, профессор



В.А. Федоринов

Подпись профессора Федоринова В. А. заверяю:

проректор по научной работе, управлению развитием
и международным связям ДУМА,
докт. хим. наук, профессор




М.А. Турчанин

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи
управління розвитком та
міжнародних зв'язків

Донбаської державної
машинобудівної академії,
професор

 М. А. Турчанін

«15» березня 2016 р.



АКТ ВИКОРИСТАННЯ

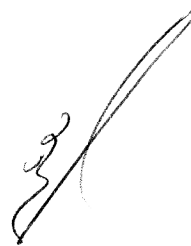
Матеріали дисертаційної роботи Грибкова Едуарда Петровича на тему: «Розвиток наукових основ і вдосконалення обладнання та технологій деформування довгомірних металопорошкових виробів в оболонці», а саме:

- комплекс математичних моделей і програмних засобів з автоматизованого розрахунку напружено-деформованого стану матеріалу при виготовленні довгомірних виробів з металопорошків в металевій оболонці;
- методика розрахунку і програмні засоби з автоматизованого розрахунку основних показників якості при виробництві порошкових матеріалів в металевих оболонках;
- алгоритми автоматизованого проектування технологічних режимів процесів виготовлення порошкових матеріалів в металевій оболонці;
- практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору матеріалу, форми і товщини оболонки, співвідношення товщини двошарової порошкової композиції, призначення режимів обтиснень, радіусів валків і коефіцієнта асиметрії для реалізації процесів прокатки порошкових матеріалів в металевій оболонці;
- практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору матеріалу і товщини оболонки, призначення кількості переходів

і режимів обтиснень, призначення рівня натяжінь для реалізації процесів волочіння і плющення порошкового дроту в металевій оболонці використовуються на кафедрі «Автоматизовані металургійні машини та обладнання» Донбаської державної машинобудівної академії в межах викладання наступних дисциплін:

- «Комп'ютерне моделювання і проектування обладнання та технологій»;
- «Основи наукових досліджень, техніка експерименту»;
- «Механічне обладнання металургійних заводів»;
- «Надійність, ремонт та монтаж обладнання»;
- «Математичні моделі в розрахунках на ЕОМ»;
- «Основи автоматизованого проектування технологічного обладнання»;
- «Учбова науково-дослідна робота студентів», а також під час виконання курсових і дипломних проектів студентами спеціальності 7, 8.05050311 «Металургійне обладнання».


Завідуючий кафедрою
«Автоматизовані металургійні
машини та обладнання»,
канд. техн. наук, проф.



В.А. Федорінов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи,
управління розвитком та
міжнародних зв'язків
Донбаської державної
машинобудівної академії,
професор



_____ М. А. Турчанін

« 15 » березня 2016 р.

АКТ ВИКОРИСТАННЯ

Матеріали дисертаційної роботи Грибкова Едуарда Петровича на тему: «Розвиток наукових основ і удосконалення обладнання та технологій деформування довгомірних металопорошкових виробів в оболонці», а саме:

- комплекс математичних моделей напружено-деформованого стану матеріалу при прокатці порошкових стрічок, волочінні та плющенні порошкового дроту;
- алгоритми та програмні засоби з автоматизованого проектування технологічних режимів процесів виготовлення порошкових стрічок та дроту;
- методики розрахунку і програмні засоби з розрахунку основних показників якості при виробництві довгомірних металопорошкових виробів в оболонці;
- практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору матеріалу, форми і товщини оболонки, співвідношення товщини двохшарової порошкової композиції, призначення режимів обтиснень, радіусів валків і коефіцієнта асиметрії для реалізації процесів прокатки порошкових матеріалів в металевій оболонці;
- практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору матеріалу і товщини оболонки, призначення кількості переходів

і режимів обтиснень, призначення рівня натяжінь для реалізації процесів волочіння порошкового дроту в металевій оболонці;

– практичні рекомендації та науково-обґрунтовані технічні рішення щодо вибору матеріалу і товщини оболонки, призначення режимів обтиснень для реалізації процесів плющення порошкового дроту в металевій оболонці були використані в Донбаській державній машинобудівній академії при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і науки України (№ держ. реєстрації 0104U004039 наказ № 746 від 7.11.2003, № держ. реєстрації 0110U006160, № держ. реєстрації 0113U000611 наказ № 1193 від 25.10.2012, № держ. реєстрації 0113U003979, № держ. реєстрації 0114U002537 наказ № 1611 від 22.11.2013 р., № держ. реєстрації 0115U003125 наказ № 1243 від 31.10.2014 р.), а також в рамках госпдоговірних науково-дослідних робіт з ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» (м. Краматорськ) (№ держ. реєстрації 0108U005803, 0113U004776).

Завідуючий кафедрою
«Автоматизовані металургійні
машини та обладнання»,
канд. техн. наук, проф.



В.А. Федорінов