

Пятов В. В.

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ХОЛОДНОЙ ЭКСТРУЗИИ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Витебск – 2002

УДК 621.762.4

ББК 34.39

П 76

Автор:

В.В. Пятов — канд. техн. наук, доцент кафедры «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки» УО «Витебский государственный технологический университет»

Рецензенты:

Н.К. Толочко — доктор физико-математических наук, профессор, и.о. директора института технической акустики

В.О. Ситов — зам. директора РУП «Вистан» им. С. Кирова, нач. конструкторского бюро

Рекомендована:

Кафедрой «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки» УО «Витебский государственный технологический университет», протокол № 7 от 28.02.2002 г.

Ученым Советом УО «Витебский государственный технологический университет», протокол № 10 от 26.03.2002 г.

П76

Пятов В.В. Теоретические и технологические основы холодной экструзии порошковых материалов. — Витебск: УО «ВГТУ», 2002 г. — 237 с.

УДК 621.762.4

ББК 34.39

ISBN 985-66-55-47-1

© Пятов В.В., УО «ВГТУ», 2002

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	7
ВВЕДЕНИЕ.....	8
ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ.....	13
1.1. ГОРЯЧАЯ И ХОЛОДНАЯ ЭКСТРУЗИЯ	13
1.2. ЭКСТРУЗИЯ КОМПАКТНЫХ, ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ И ЖИДКИХ МАТЕРИАЛОВ	16
1.3. НЕПРЕРЫВНАЯ ЭКСТРУЗИЯ	17
1.4. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСТРУЗИИ	18
1.4.1. Мундштучное прессование	19
1.4.2. Формование шнеком	24
1.4.3. Инжекционное прессование.....	32
1.4.4. Комбинированные методы экструзии.....	34
ГЛАВА 2. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВ	36
2.1. СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ	36
2.1.1. Пластифицированный порошковый материал	36
2.1.2. Теоретические проблемы экструзии	42
2.1.3. Теория шнекового формования.....	43
2.2. ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСТРУЗИИ	49
2.2.1. Выбор пластификатора.....	50
2.2.2. Пластификация порошка	54
2.2.3. Формование пластифицированных порошков.....	57
2.2.4. Удаление пластификатора и спекание изделий.....	62
2.3. СВОЙСТВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ	67
2.3.1. Триботехнические характеристики.....	68
2.3.2. Боковое давление	71
2.3.3. Пластичность и структурная прочность	73
2.3.4. Реологические характеристики.....	74
ГЛАВА 3. ТЕОРИЯ ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	77
3.1. ДОПУЩЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ	77

3.2. УПЛОТНЕНИЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКА	79
3.2.1. Уплотнение материала в канале	80
3.2.2. Распределение напряжений в поперечном сечении канала	83
3.2.3. Уплотнение пластифицированного порошка в прессформе.....	86
3.3. ЭКСТРУЗИЯ УПЛОТНЕННОГО МАТЕРИАЛА.....	88
3.3.1. Выдавливание изотропных смесей	88
3.3.2. Формование анизотропных материалов	92
ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ШНЕКОВОГО ФОРМОВАНИЯ	98
4.1. РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ КАНАЛА	99
4.2. ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ	112
4.3. ТЕРМОДИНАМИКА ШНЕКОВОГО ФОРМОВАНИЯ	118
4.3.1. Идеальный тепловой режим	118
4.3.2. Расчет температурных полей	120
4.3.3. Анализ влияния различных параметров на тепловой режим	133
4.3.4. Расчет диапазона рабочих скоростей шнека	140
4.4. АНАЛИЗ ПРИЧИН, ПРИВОДЯЩИХ К СРЕЗУ РЕБЕР	142
ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭКСТРУЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	144
5.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ.....	144
5.1.1. Постановка задачи и выбор метода формования	145
5.1.2. Выбор материалов и пластификация порошка	145
5.1.3. Физические и технологические свойства материала	147
5.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ	147
5.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКА	149
5.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА И ОПОР	152
5.5. РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ СКОРОСТЕЙ ШНЕКА И НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ	155

ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	158
6.1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ.....	159
6.1.1. Порошковый трибометр и измерение триботехнических характеристик.....	159
6.1.2. Капиллярный вискозиметр и реологические исследования.....	162
6.1.3. Методика исследования уплотняемости материалов	164
6.1.4. Методика измерения коэффициентов бокового давления	166
6.1.5. Конический пластометр и исследование структурной прочности	168
6.1.6. Материалы для экспериментальных исследований.....	170
6.2. УПЛОТНЯЕМОСТЬ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	172
6.2.1. Уплотняемость при одноосном сжатии	172
6.2.2. Уплотняемость при сложнапряженном состоянии	176
6.3. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	178
6.3.1. Коэффициенты трения и бокового давления	179
6.3.2. Триботехнические константы, инвариантные к напряжениям.....	189
6.3.3. Влияние температуры на триботехнические свойства пластифицированных порошков.....	195
6.4. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ	197
6.4.1. Давление истечения материала.....	198
6.4.2. Структурная прочность пластифицированного материала	200
ГЛАВА 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ.....	202
7.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ.....	202

7.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ СКОРОСТЕЙ ШНЕКА.....	205
7.3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОКРУЖНОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ МАТЕРИАЛА.....	211
7.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ С РЕБРАМИ.....	214
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	216
ЛИТЕРАТУРА.....	218

СОКРАЩЕНИЯ И ОБОЗНАЧЕНИЯ

σ и τ — нормальные и касательные напряжения

σ_{11} , σ_{22} и σ_{33} — главные нормальные напряжения

f и f_m — коэффициенты внешнего и внутреннего (межчастичного) трения;

ξ — коэффициент бокового давления

σ_s — физический предел текучести материала (при сжатии)

τ_0 — физический предел текучести материала (на сдвиг)

ρ — плотность материала

η — пластическая вязкость

t — время

T — температура

a , b и c — инвариантные к напряжениям триботехнические константы

p — давление прессования

q — плотность теплового потока

ПМ — порошковый материал

ППМ — пластифицированный порошковый материал

ВВЕДЕНИЕ

Основная тенденция современного этапа развития научно-технического прогресса заключается в переходе от экстенсивного пути хозяйствования к интенсивному. Интенсификация хозяйственной деятельности осуществляется путем разработки и освоения новых высокопроизводительных, экономичных и экологически безопасных технологий. Особенно остро необходимость экономии ощущается в странах, бедных на энергетические и сырьевые ресурсы. В настоящее время около 80% энергии Беларуси вынуждена приобретать за Рубежом, оплачивая ее твердой валютой.

Прогрессивным направлением, позволяющим создавать высокоэффективные безотходные технологии, является изготовление различных изделий из измельченных материалов. Прессование и спекание порошков и гранул дает возможность получать заготовки, по форме максимально приближенные к готовому изделию и, в некоторых случаях, полностью избежать механической обработки. Различают дискретные и непрерывные методы формования порошковых материалов.

Непрерывные методы формования отличаются повышенной производительностью и легче поддаются автоматизации. Они основаны на прокатке или экструзии материала. Прокаткой получают изделия и заготовки из пластичных металлических порошков, обладающих хорошей прессуемостью.

Экструзию используют для формования длинномерных изделий различного профиля. Основные методы реализации — мундштучное и шнековое прессование — отличаются легкостью автоматизации и высокой производительностью. В зависимости от температуры формуемого материала различают горячую и холодную экструзию. Горячая экструзия осуществляется при температурах, соответствующих максимальной пластичности материала. Этим методом прессуют пластичные металлы, как в литом, так и в измельченном состоянии.

Холодной экструзией формуют пластифицированные измельченные материалы при комнатной температуре или с небольшим нагревом. Перед

спеканием пластификатор удаляют из прессовки. Метод универсален, экономичен и высокопроизводителен. Холодная экструзия позволяет получать изделия сложной формы без механической обработки. Эти достоинства позволяют снизить затраты на изготовление изделий по сравнению с альтернативными методами формования.

Универсальность холодной экструзии заключается в возможности формования любых порошковых материалов. Технологические свойства пластифицированного порошка в основном определяются составом и количеством пластификатора и мало зависят от самого порошка. В результате такие разные по составу изделия, как ферритовые сердечники, твердосплавной инструмент, бронзовые и титановые фильтры, алюминиевые теплообменники и многие другие могут быть получены по сходным технологиям.

Холодная экструзия расширяет возможности порошковой металлургии. Она позволяет получать изделия, изготовление которых другими способами затруднительно или невозможно: трубы сложного профиля (например, с винтовыми поверхностями), тонкостенные фильтры, порошковые шнуры для газотермического нанесения покрытий, длинномерные изделия переменного профиля.

Значительные материальные ресурсы содержатся в промышленных и бытовых отходах, по переработке которых мы заметно отстаем от развитых стран. Только в 1996 году промышленный комплекс Беларуси произвел более 18 миллионов тонн твердых отходов, из которых 85% осталось неиспользованными [1]. Если к этой цифре добавить 2 миллиона тонн бытовых отходов, то можно убедиться, что материальные ресурсы Республики далеко не исчерпаны. Нужны только соответствующие технологии переработки этих отходов.

Эффективным методом переработки многих отходов является их измельчение и экструзия на шнековых прессах, позволяющая получать длинномерные полуфабрикаты различного профиля. В процессе экструзии обычно осуществляется целенаправленное механическое, химическое и

тепловое воздействие на материал, улучшающее его состав и технологические свойства. Таким способом можно перерабатывать металлические и полимерные отходы, причем не только термопластичные.

В разработку методов формования, основанных на холодной экструзии пластифицированных порошковых материалов, весомый вклад внесли представители отечественной науки: П.С. Кислый, Г.В. Самсонов, А.И. Райченко, А.Г. Косторнов, П.А. Корниенко, Г.В. Плющ, О.В. Роман, П.А. Витязь, А.В. Степаненко, С.С. Клименков и другие. Разработаны основы теории деформации порошков, освоены технологии мундштучного и шнекового прессования. Описаны процессы получения фильтрующих материалов, нагревателей из тугоплавких металлов и их химических соединений, теплообменников с развитой поверхностью, керамических изделий. Накоплен большой практический опыт, нуждающийся в обобщении и теоретическом обосновании.

Сегодня экструзию используют в разных отраслях промышленности: пищевой (изготовление колбас), химической (формование термопластов), строительной (керамические трубы), а также в металлургии. Исторически все эти технологии развивались обособленно, изобретения находили ограниченное использование, научные разработки дублировались. Так, многие устройства для экструзии порошковых материалов сильно напоминают шнековые прессы пищевой промышленности или машины для литья термопластов.

Представляется целесообразным объединение технологий, основанных на выдавливании, в единое направление — холодную экструзию высокопластичных материалов. Основанием для такого объединения может стать схожая реология смесей, формуемых экструзией. Публикация достижений в едином реферативном сборнике позволит сократить количество дублирующих друг друга научных исследований в разных отраслях промышленности и, таким образом, сэкономить бюджетные средства и ускорить научно-технический прогресс.

В настоящей работе обобщены результаты теоретических исследований и практических достижений в области холодной экструзии порошковых материалов. Это, в основном, материалы, относящиеся к порошковой металлургии: металлические и твердосплавные порошки, техническая керамика, ферриты, тугоплавкие сплавы и химические соединения. Рассмотрены также некоторые проблемы переработки измельченных металлических и полимерных промышленных отходов методом экструзии.

В первой главе дана классификация основных способов экструзии. Уточнена терминология и приведены некоторые формулировки, используемые в дальнейшем при теоретическом анализе. Предложены определения холодной, горячей и непрерывной экструзии, позволяющие избежать некоторых проблем, возникающих при применении традиционных формулировок к ППМ.

Вторая глава посвящена анализу научных проблем и технических достижений в области экструзии измельченных материалов. Проанализировано состояние теории деформации пластифицированных порошковых материалов, описаны основные технологические приемы получения изделий методом холодной экструзии. Рассмотрены основные свойства пластифицированных порошков, влияющие на процесс выдавливания.

В третьей главе описана разработанная автором теория экструзии порошковых материалов. Исследован процесс деформации уплотняемого пластифицированного порошка и экструзия уплотненного до несжимаемого состояния материала. Изучено формование изотропных смесей и анизотропных (композиционных) материалов.

Четвертая глава содержит анализ теоретических проблем шнекового формования. Проведены расчеты по оптимизации профилей шнековых каналов, найдено распределение напряжений по длине шнека. Выполнены энергосиловые расчеты, позволяющие минимизировать энергопотребление шнекового прессы. Подробно изучена термодинамика шнекового прессования: найден идеальный тепловой режим формования термопластичных материалов, рассчитаны температурные поля в шнеке и цилиндре прессы, про-

анализировано влияние различных параметров процесса формования на тепловой режим. На основе термодинамического анализа найден допустимый диапазон рабочих скоростей шнека. Теоретически проанализированы причины, приводящие к срезу ребер при формовании изделий сложного профиля.

Пятая глава посвящена разработке основ проектирования экструзионного оборудования. На конкретном примере показано, как подготовить материал к формованию и как проконтролировать его физические и технологические свойства. Выполнены образцовые конструкторские расчеты основных параметров шнека и матрицы, привода пресса и опорных узлов. Рассчитан допустимый диапазон скоростей шнека и определена мощность, необходимая для его вращения.

Чтобы провести расчеты, необходимо измерить ряд характеристик материала, определяющих его технологические свойства. В шестой главе описано оборудование и методики, позволяющие измерить все необходимые для расчетов коэффициенты. Экспериментально исследованы уплотняемость материалов, их триботехнические и реологические характеристики. Приведены конструкции капиллярного вискозиметра, конического пластомера, порошкового трибометра, устройства для исследования уплотняемости при разных видах напряженного состояния. Описана оригинальная методика измерения коэффициента бокового давления, не использующая тензометрию.

В седьмой главе содержится экспериментальное исследование процесса экструзии. Измерен диапазон рабочих скоростей шнека и коэффициент окружного проскальзывания материала. Исследован процесс формования изделий с ребрами. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментально полученных значений.

ГЛАВА 1. КЛАССИФИКАЦИЯ И ТЕРМИНОЛОГИЯ

Способы экструзии классифицируют по следующим признакам:

- температуре формования
- структуре и состоянию материала
- степени стационарности процесса
- методу реализации

В зависимости от температуры формования различают горячую и холодную экструзию. Обрабатываемый материал может находиться в компактном (беспористом), измельченном (порошковом, гранулированном) и жидком состояниях. Каждое из этих состояний характеризуется определенными макро- и микроструктурами. По степени стационарности процесс экструзии бывает дискретным, циклическим или непрерывным. Основные методы реализации экструзии: мундштучное прессование, формование на шнековых и дисковых прессах, обработка материалов на узкоспециализированных устройствах.

Комбинация этих признаков позволяет достаточно полно охарактеризовать выбранный способ формования.

1.1. ГОРЯЧАЯ И ХОЛОДНАЯ ЭКСТРУЗИЯ

Традиционно под горячей экструзией понимают деформацию, осуществляемую при нагреве материала выше его температуры рекристаллизации. Холодная экструзия проводится, соответственно, ниже этой температуры.

Разделение на горячую и холодную деформацию удобно, так как косвенно указывает на процессы, протекающие в материале: холодная деформация сопровождается упрочнением металла, а горячая — нет. Соответственно и способы математического описания напряженно-деформированного состояния, возникающего в материале при холодной и горячей деформации, будут различаться.

Использование температуры рекристаллизации в качестве ориентира имеет и недостатки. Процесс рекристаллизации наблюдается только у ме-

таллов, к тому же при выполнении ряда условий (степень деформации выше критической, отсутствие полигонизации, достаточный нагрев). Температура начала рекристаллизации зависит от ряда дополнительных факторов: чистоты металла, его структуры, особенностей деформации. Есть и психологическое неудобство — для легкоплавких металлов горячая деформация может быть проведена при комнатной температуре, без дополнительного нагрева.

При анализе процесса деформации порошковых материалов, особенно пластифицированных, традиционная формулировка неудобна. Уплотнение порошков сопровождается относительным перемещением частиц, из которых состоит материал. В то же время пластическая деформация самих частиц обычно отсутствует. Поэтому механика уплотнения зависит главным образом от величины межчастичного трения, а не от наличия процесса рекристаллизации. Если трение слишком велико и препятствует нормальному течению материала, в порошок добавляют пластификатор. В этом случае пластичность материала определяется в основном свойствами пластификатора.

Таким образом, определения холодной и горячей деформации, основанные на использовании температуры рекристаллизации, удобны лишь для металлических материалов. Эта терминология становится бесполезной при формовании пластифицированных порошков и теряет смысл при формовании неметаллических материалов.

Построение какой-либо теории, например теории экструзии порошковых материалов, связано с нахождением зависимостей, обладающих максимально возможной общностью. Поэтому при теоретических исследованиях стремятся избежать допущений и формулировок, сужающих область применения получаемых результатов. Использование же определений холодной и горячей деформации, основанных на понятии рекристаллизации, сужает эту область, ограничивая ее только металлическими материалами.

В настоящей работе *холодная экструзия — это процесс, осуществляемый без дополнительного нагрева материала*. Соответственно, *горя-*

чая экструзия проводится с дополнительным подводом тепла к материалу. Такие формулировки просты, естественны и, как будет показано ниже, удобны при теоретических исследованиях.

Необходимо отметить, что под дополнительным нагревом подразумевается специальный подвод тепла извне (через поверхности формующего инструмента) или предварительный нагрев самого материала. Процессы внутреннего тепловыделения, всегда сопровождающие деформацию, дополнительным нагревом не считаются, хотя и приводят к разогреву смеси.

Удобство приведенных формулировок при теоретических построениях заключается в следующем. Наличие внутреннего тепловыделения и его влияние на температурные поля в формируемом материале обычно учитывается выбранной термодинамической моделью процесса (заложено в самих уравнениях, описывающих деформацию). А внешние тепловые воздействия задаются граничными (подвод или отвод тепла через контактные поверхности) или начальными (предварительный нагрев материала) условиями.

Таким образом, в соответствии с предложенными определениями, горячая деформация отличается от холодной ненулевыми граничными или измененными начальными условиями. Это помогает в постановке задач нахождения напряженно-деформированного состояния в материале независимо от его физической природы.

Здесь есть аналогия с классическими формулировками, «заточенными» под обработку давлением литых металлов. Действительно, горячая деформация, в традиционном ее понимании, предполагает наличие динамической рекристаллизации, протекающей параллельно с упрочнением. Поэтому при построении математической модели процесса горячего деформирования используют уравнения, не учитывающие влияния наклепа. И в том, и в другом случае используемая терминология помогает сориентироваться при построении математической модели процесса холодной или горячей пластической деформации материала.

1.2. ЭКСТРУЗИЯ КОМПАКТНЫХ, ИЗМЕЛЬЧЕННЫХ И ЖИДКИХ МАТЕРИАЛОВ

В зависимости от структуры и состояния материала различают экструзию компактных (литых) металлов, измельченных (порошковых и гранулированных) материалов и жидкостей (расплавов и растворов).

Экструзия литых металлов является перспективным методом обработки, позволяющим наиболее полно использовать явление сверхпластичности [2]. Этот метод все еще не нашел широкого промышленного применения из-за необходимости использования очень мощного прессового оборудования. Обычно для экструзии компактных металлов применяют жидкость высокого давления, из-за чего процесс называют гидроэкструзией [3 – 4]. Литые металлы подвергают горячей экструзии для увеличения пластичности и уменьшения усилия выдавливания. Гидроэкструзией обычно обрабатывают тугоплавкие металлы [5 – 6].

Экструзия измельченных материалов начала применяться для получения изделий сравнительно недавно. В эту группу попадают порошковые и гранулированные материалы, а также, с некоторыми оговорками, любые сыпучие материалы, например измельченные отходы. Такие материалы формуют без пластифицирующих добавок и с ними. В первом случае применяют горячую экструзию, процесс мало отличается от формования компактных материалов [7]. Введение пластификатора позволяет осуществить холодную экструзию. Теория холодной экструзии ППМ практически отсутствует, технология развивается эмпирическим путем. Начать ликвидацию этого пробела, по замыслу автора, должна эта работа.

Экструзия вязких жидкостей — наиболее изученный процесс. Выдавливание расплава через фильеру является основным способом формования длинномерных изделий из термопластичных полимеров и материалов на их основе [8 – 9]. Это технологически и аппаратно очень развитая область промышленности. Горячей экструзией получают листы, трубы, пленки, прокладки, поручни для лестниц и другие профили [10]. Формование гранулированных пластмасс, моноволокон и сеток также основано на экструзии расплавов полимеров.

Как метод переработки полимерных материалов экструзия впервые была применена в середине прошлого столетия для покрытия медных проводов изоляцией из гуттаперчи. Для этой цели использовали плунжерные экструдеры циклического действия: в цилиндр экструдера загружали порцию разогретой гуттаперчи и выдавливали через фильеру, сквозь которую пропускали медный провод. Периодичность действия таких машин сильно ограничивала их производительность.

Сейчас для формования термопластов используют шнековые прессы [11], снабженные специальным экструзионным инструментом [12]. Переработке пластмасс в изделия посвящено множество научных публикаций. Так как термопласты формуют в расплавленном состоянии, этот процесс обычно относят к горячей экструзии. По реологическим и технологическим свойствам растворы и расплавы полимеров сильно отличаются от пластифицированных порошковых материалов. Поэтому непосредственный перенос теоретических и технологических разработок в порошковую металлургию невозможен, однако многие идеи оказываются весьма полезными при разработке новых технологических процессов.

1.3. НЕПРЕРЫВНАЯ ЭКСТРУЗИЯ

Непрерывным методом формования называют процесс, позволяющий изготовить изделие неограниченной длины без периодических остановок и перезагрузок. Соответственно, дискретными методами получают изделия конечной длины. Классическими примерами являются прокатка и формование в закрытой прессформе. Непрерывная экструзия реализуется обычно с помощью шнековых и дисковых прессов.

Мундштучное прессование при такой классификации находится где-то посередине — изделие бесконечной длины этим методом не получить, хотя, выбрав контейнер достаточной емкости, практические нужды удовлетворить удастся. Одни авторы считают этот метод непрерывным, другие — дискретным методом формования. Здесь проявляется недостаток приведенной формулировки — метод экструзии зависит от объема прессформы.

Иногда встречаются такие названия, как дискретно-непрерывный, поступательный [13] или циклический методы. Еще сложнее дело обстоит с многочисленными устройствами, защищенными авторскими свидетельствами. Здесь часто затруднительно определить, какой метод формования используется. Например, некоторые из таких устройств позволяют получать изделия любой длины, но процесс формования носит пульсирующий характер, скорость экструзии непостоянна.

Чтобы избежать терминологических затруднений, предлагается следующая формулировка. ***Непрерывным называется метод формования, имеющий стационарную фазу достаточной продолжительности.*** Процессы, протекающие при таком формовании, описываются стационарными уравнениями (уравнениями, в которых время не фигурирует в качестве переменной). Изделие полностью формируется во время стационарной фазы; начальный и конечный участки, полученные во время входа процесса в стационарную фазу и выхода из нее соответственно, в случае неудовлетворительного качества удаляются.

Согласно этому определению, мундштучное прессование является непрерывным методом, хотя и не позволяет получать изделие бесконечной длины. А вот методы с переменной скоростью экструзии к непрерывным не относятся, даже если длина получаемых изделий ничем не ограничена. Под достаточной продолжительностью понимается время, необходимое для получения хотя бы одного изделия за стационарную фазу. Предложенное определение удобно при теоретических исследованиях, так как указывает на отсутствие времени в уравнениях, описывающих процесс деформации.

1.4. СПОСОБЫ РЕАЛИЗАЦИИ ЭКСТРУЗИИ

Экструзия может быть реализована мундштучным прессованием, формованием материалов на шнековых устройствах и инжекционным прессованием. Кроме того, существует ряд специальных приемов формования, представляющих собой комбинацию упомянутых способов, часто дополненных элементами прокатки. Примером такой комбинации может служить устройство для прокатки порошков [14], позволяющее формировать тонко-

стенные трубы циклическим методом. Вообще говоря, методами прокатки можно получать многие виды длинномерных изделий из металлических порошков. Прокатка и родственные ей методы формования порошковых материалов подробно описаны в монографиях [15 – 16].

Типичным представителем комбинированных способов формования порошков является т.н. клиновое прессование [17]. Это циклический метод формования или, как назвал его автор, периодический. Он имеет ряд разновидностей, некоторые из которых позволяют получать длинномерные изделия (в основном сплошные), схожие с изделиями, получаемыми экструзией или прокаткой. Способ клинового прессования не имеет стационарной фазы и, в соответствии с приведенным определением, к непрерывным методам не относится. В работе основное внимание уделено методам непрерывной экструзии пластифицированных порошковых материалов. Циклические, а тем более дискретные методы формования не рассмотрены.

1.4.1. Мундштучное прессование

Мундштучное прессование представляет собой классический способ формования, основанный на экструзии. Он прост в реализации и хорошо освоен промышленностью. Метод не требует сложного оборудования и применяется как для горячего, так и для холодного формования различных материалов, в том числе и порошковых. Публикации по вопросам холодного выдавливания порошков начали появляться в первой половине 20-го века [18] и были обобщены в работе [19].

Мундштучным прессованием изготавливают изделия из самых разных порошков, но особенно эффективен этот метод при формовании труднопрессуемых материалов: керамики, ферритов, твердых сплавов, тугоплавких металлов и соединений на их основе. Развитие твердосплавной промышленности стимулировало прогресс порошковой металлургии вообще и экструзии пластифицированных порошков в частности. Первые порошковые (или, как тогда говорили, спеченные или металлокерамические) твердые сплавы появились в 20-х годах текущего столетия [20]. Принято считать, что использование этих сплавов для изготовления режущего ин-

струмента произвело подлинную революцию в некоторых областях техники.

В 1931 году в технологию формования твердосплавных изделий группой отечественных ученых было внесено существенное усовершенствование — для облегчения процесса прессования и увеличения прочности прессовок был применен пластификатор [21] — синтетический каучук. Отличные клеящие свойства каучука позволяют получать прессовки сложной формы без предварительного спекания. Каучук все еще применяется в твердосплавной промышленности, несмотря на появление более эффективных пластификаторов.

Начало использования пластификаторов и поверхностно-активных веществ [22] позволило разработать технологию холодного мундштучного прессования длинномерных твердосплавных изделий [23]. Эта технология активно совершенствовалась в 60-х и 70-х годах нашего столетия [24 – 25]. Были исследованы некоторые теоретические аспекты процесса выдавливания [26], а также разработана технология изготовления биметаллических твердосплавных изделий [27], позволяющая экономить дорогие материалы. Заметной вехой в развитии технологии твердых сплавов стала монография [28], обобщившая основные достижения в этой области. Успехи твердосплавной промышленности стимулировали применение методов мундштучного прессования для формования и других труднопрессуемых порошков.

Сходными с твердыми сплавами свойствами обладают многие тугоплавкие соединения. Это предопределило и сходство технологий изготовления изделий из таких порошков. Для большинства материалов этого класса методы порошковой металлургии являются либо наиболее целесообразными, либо вообще единственно возможными. Температуры плавления многих тугоплавких соединений превышают 3000°C , а некоторые из них диссоциируют при высоких температурах без плавления. Поэтому часто только спекание позволяет получать изделия из тугоплавких соединений с заданным составом и свойствами.

Длинномерные изделия из тугоплавких материалов получают обычно методом мундштучного прессования. К таким изделиям, в частности, относятся высокотемпературные нагреватели [29], термопары [30] и наконечники к ним. Из спеченных материалов на основе карбида кремния и дисилицида молибдена делают нагревательные элементы [31], работающие в окислительной атмосфере при температурах до 1600°C. Для работы в вакууме и среде инертных газов разработаны электронагреватели на основе карбида ниобия. С использованием этого материала в электропечах получены температуры до 3000°C.

В электротехнике широко используются резистивные элементы из композиционных материалов на основе металлоподобных тугоплавких соединений с электроизоляционными связками. Такие материалы обладают способностью сохранять свое электросопротивление или незначительно изменять его при различных внешних воздействиях. Формуют резисторы методом мундштучного прессования [32].

На основе тугоплавких соединений разработаны электродные материалы, обладающие низкой температурой выхода электронов. Эта группа материалов представлена такими труднопрессуемыми порошками, как карбиды титана, циркония и гафния [33]. Использование различных связующе-пластифицирующих добавок позволило успешно решить проблему формирования этих порошков.

Выдающуюся роль в решении научных и практических задач материаловедения тугоплавких соединений сыграли работы Г.В. Самсонова. Им подробно исследованы свойства и процессы формирования силицидов [34], нитридов [35], боридов [36] и карбидов [37]. Все эти порошки являются хрупкими и без связующих добавок не прессуются. Длинномерные изделия из таких материалов получают методом мундштучного прессования. Результаты этих исследований обобщены в монографии [38].

Широко используется пластификация порошков с последующим мундштучным прессованием и в технологии производства жаропрочных материалов, как металлических, так и композиционных. Частицы легиро-

ванных порошков жаропрочных сплавов имеют сферическую форму и высокий предел текучести, что затрудняет их компактирование. Поэтому даже значительная пластическая деформация, возникающая при холодном изостатическом прессовании порошков жаропрочных сплавов [39], не позволяет получить прессовку из-за отсутствия поверхностных деформаций сдвига.

Возможность улучшить формуемость этих жестких материалов за счет смешивания их с порошками мягких металлов исследована на сплавах кобальта [40]; удовлетворительных результатов не получено. Поэтому основным способом компактирования порошков жаропрочных сплавов является их прессование вместе с органической связкой, удаляемой перед спеканием путем возгонки [41]. При этом формование осуществляют шликерным литьем, в прессформах или продавливанием через мундштук.

Еще одна группа труднопрессуемых порошков — ферриты. Эти материалы состоят из окислов железа и других металлов, получают их исключительно методами порошковой металлургии. В нашей стране промышленный выпуск ферритов начат в 1955 году. Типовой технологический процесс формования изделий из ферритовых порошков включает их пластификацию. В качестве пластификатора используют обычно поливиниловый спирт или парафин. Формуют ферриты уплотнением порошка в прессформах или методом мундштучного прессования. Некоторые аспекты пластификации ферритовых порошков рассмотрены в работе [42].

Мундштучным прессованием формуют также пластифицированные керамические порошки и композиции на их основе [43]. От многих машин и аппаратов современной техники требуется работа при повышенных температурах, напряжениях и скоростях. Решение этой задачи в значительной мере зависит от создания новых жаропрочных, жаростойких и износостойких материалов. Высокой жаростойкостью обладает керамика, изделия из которой получают порошковыми методами. Керамические порошки относятся к труднопрессуемым материалам, поэтому перед формованием в них вводят связующе-пластифицирующие добавки. Технология строительной и технической керамики хорошо разработана; эти разработки являются базой для порошковой металлургии.

Как известно, главным недостатком керамики, сдерживающим ее широкое распространение, является хрупкость. Попытки избавиться от этого недостатка привели к созданию композиционных материалов на основе керамики и, в первую очередь, керметов — гетерогенных композиций керамических и металлических фаз, объединяющих свойства исходных компонентов. Неметаллические вещества в керметах придают им требуемые эксплуатационные свойства: твердость, жаропрочность и износостойкость; металлическая матрица обеспечивает изделиям необходимую прочность и пластичность.

Изделия из керметов формуют всеми известными в порошковой металлургии способами: прессованием в стальных и эластичных формах, гидростатическим и мундштучным формованием, прокаткой, литьем термопластичных шликеров. В любом случае смесь равномерно распределенных частиц керамической и металлической фаз пластифицируют добавлением органических или неорганических клеящих веществ. В качестве таких материалов чаще всего применяют раствор каучука в бензине, расплав или раствор парафина, крахмальный клейстер, раствор поливинилового спирта в воде, алюмофосфатную связку, жидкое стекло, глину.

Все рассмотренные выше материалы являются жесткими и трудно-прессуемыми. Использование при их формовании связующе-пластифицирующих добавок представляется естественным. Однако в последнее время и при формовании металлических порошков все чаще прибегают к методу экструзии [44].

Выдавливанием получают длинномерные изделия из различных металлических порошков. Описаны технологии формования титановых сварочных электродов [45], алюминиевых [46 – 47] и бронзовых [48] изделий, фильтров из нержавеющей стали [49], псевдосплавов [50]. Есть работы, посвященные теоретическим проблемам холодной экструзии металлов [51]. Затруднений при формовании металлических порошков экструзией обычно не возникает; это более технологичные материалы, чем керамика или фер-

риты. Однако к выбору пластификатора для металлов надо подходить очень ответственно: при спекании возможны нежелательные химические реакции.

Современные устройства для мундштучного прессования иногда настолько сложны, что трудно сразу определить, какой метод формования в них используется. Примером такого агрегата может служить устройство [52], позволяющее совместить операции прессования и спекания. Пуансон этого устройства может вращаться и одновременно совершать колебательные движения, причем частота его колебаний связана с частотой вращения определенным соотношением. Теплота, необходимая для спекания материала, выделяется непосредственно в нем за счет сил трения, причем процесс жестко контролируется.

При всех достоинствах мундштучное прессование имеет существенный недостаток — получаемые этим методом изделия имеют ограниченную длину. Возможность формования бесконечных труб и проблемы, возникающие при этом, рассмотрены в работе [53]. Отмечается, что технически организовать циклическую подачу порошка при непрерывном его выдавливании сравнительно несложно [54 – 55]. Значительно труднее избавиться от стыков, возникающих из-за периодичности подачи материала. Решить эту задачу можно тремя способами: добавить в порошок пластификатор, подвергнуть непластифицированный порошковый материал горячей экструзии [56] или соединять порошковые брикеты в холодном состоянии [57].

1.4.2. Формование шнеком

Шнековое формование применяется в разных отраслях промышленности: пищевой [58], химической [59], легкой [60], строительной [61] и других. Шнековые устройства широко применяются также в качестве вспомогательного оборудования: смесителей, дозаторов, классификаторов, испарителей, реакторов, отжимных устройств [62]. Накоплен огромный научно-технический потенциал, требующий обобщения. В настоящей работе рассмотрена та его часть, которая может быть использована в порошковой металлургии и смежных областях.

Первые промышленные червячные экструдеры появились в конце прошлого столетия в Германии и Англии, где они применялись для переработки гуттаперчи и нитрата целлюлозы [10]. Отличительными чертами их были сравнительно короткий червяк и паровой обогрев цилиндра. Существенные усовершенствования в конструкции шнековых прессов были сделаны в 30-х годах нынешнего столетия в связи с быстрым развитием промышленности пластмасс. Были разработаны конструкции экструдеров с более длинными червяками, с электрообогревом, мощным приводом, позволяющие перерабатывать появившиеся синтетические полимеры — непластифицированный и пластифицированный поливинилхлорид, полистирол, ацетаты целлюлозы. Затем стали использовать двухчервячные, дисковые и червячно-дисковые машины с применением средств автоматики и вычислительной техники.

Наиболее фундаментальным исследованием по теории шнековых устройств является монография [58]. В ней на основе уравнений термодинамики дано математическое описание процессов выдавливания, отжима, смешивания и транспортировки материалов шнеком. Рассмотрена кинематика и энергетика изотермического и адиабатического процессов экструзии в условиях простого и сложного сдвига. К сожалению, полученные соотношения слишком сложны и насыщены коэффициентами, методика измерения которых не описана; это затрудняет практическое использование полученных результатов. Кроме того, реологические модели жидкостей, использованные при построении теории, не отражают поведения деформируемых твердых тел, в частности, пластифицированных порошков. Процесс разогрева материала и элементов шнекового пресса в условиях конвективного теплообмена с окружающей средой не рассмотрен, хотя он наиболее адекватно отражает действительность.

Шнековое формование широко применяется при переработке термопластов. Это основной способ получения труб [8 – 9] различного профиля из таких материалов. Для пластмасс создано разнообразное формующее оборудование [63]. Хотя термопласты засыпают в бункер пресса в измельченном состоянии, перед формованием их обычно нагревают до плавления.

Оборудование, созданное для формования пластмасс, после модернизации обычно можно использовать и для прессования более жестких пластифицированных порошковых материалов.

Трубы сложной формы прессуют на шнековых прессах из керамики [64 – 65]. ГОСТ 8411-74 предусматривает изготовление цилиндрических, шести- и восьмигранных дренажных труб. По ТУ выпускают трубы с десятигранной поверхностью, а также с одной или двумя опорными поверхностями. Институтом ВНИИСтром разработаны технологии получения керамических труб с рифленой внешней поверхностью, с водоприемными прорезами конической формы и с пористыми стенками. Последние получают введением в глиняную массу отошающих материалов или выгорающих добавок. Широкое распространение шнековых прессов в производстве строительной керамики обусловлено хорошей текучестью глиняных материалов.

С помощью шнековых экструдеров покрывают изоляцией кабеля и провода [66]. Применяют как прямоточные экструдеры, так и прессы с косоугольными головками. Встречаются устройства с одним и двумя шнеками. В последнем случае оси шнеков параллельны, а винтовые нарезки сцеплены между собой — эффективное решение, предотвращающее проворот материала. Все перечисленные материалы формуют в жидком состоянии. Вязкие жидкости — наиболее подходящая среда для переработки на шнековых устройствах.

Шнековое прессование эффективно не только для вязких жидкостей. Этим методом успешно формуют и измельченные твердые тела. Разработаны технологии шнекового формования многих порошковых материалов: керамики, тугоплавких металлов и соединений на их основе, твердых сплавов, ферритов, металлических порошков.

Типичной является технология изготовления высокотемпературных нагревателей из тугоплавких соединений на шнековом прессе [29]. Порошок смешивают с пластификатором, в качестве которого используют бентонитовую глину. Массу высушивают в вакуумной сушилке при температуре 150...160°C и подвергают вальцеванию. После этого материал загру-

жают в бункер и с помощью специального транспортера подают через сетку в вакуумную камеру для откачки излишка газов, способных вызвать проблемы при формовании. Затем материал шнеком проталкивают в головку шприц-машины, на выходе из которой он приобретает форму готового изделия. В процессе формования в камере поддерживают вакуум. Полученные нагреватели имеют форму труб и стержней круглого сечения. Отмечается, что разработанный процесс отличается большей производительностью, чем выдавливание на гидравлических прессах. Аналогичным образом получены многослойные изделия [67] на основе тугоплавких соединений.

На вакуумном червячном экструдере возможно прессование материалов с различной плотностью и удельной поверхностью. Описан процесс формования окиси алюминия и смеси, состоящей из этого порошка и порошков вольфрама и нитрида титана [68 – 69]. В качестве пластификатора использовался крахмальный клейстер. Смесь длительно перемешивали на каландрах с целью гомогенизации, протирали через сито с ячейкой 2 мм, еще раз перемешивали для усреднения содержания пластификатора, затем высушивали в вакуумном сушильном шкафу. Полученные прессовки отличались хорошим качеством поверхности и высокой прочностью.

В последнее время на шнековых прессах стали формовать и металлические порошки. Разработаны технологии получения труб [70] и стержней [71] сложного профиля. Получены также многослойные [72] и пористые [73 – 74] изделия. Технология изготовления изделий из металлических порошков включает пластификацию порошка, гомогенизацию смеси, формование заготовок, удаление пластификатора и спекание изделий.

К экструзии пластифицированных металлических порошков целесообразно прибегать лишь в тех случаях, когда получение изделия другим методом невозможно: порошок жесткий и не прессуется без связки, изделие имеет очень сложную форму или большую длину, необходима высокая пористость и проницаемость и т.д. При выборе технологии необходимо учитывать, что шнековое формование порошковых материалов производительный, но энергоемкий процесс.

Прогрессивным направлением в шнековом формовании является использование двухчервячных машин, которые могут быть с параллельным и последовательным расположением шнеков. Прессы с параллельными шнеками бывают с не зацепляющимися и зацепляющимися червяками, а последние — с однонаправленным и встречным вращением шнеков. Параллельное расположение шнеков обычно используют при формовании термопластов, но есть и конструкции [75], направленные на решение проблем порошковой металлургии. Последовательное расположение шнеков позволяет получить мощный пресс с высокой производительностью и стабильностью работы. Первый шнек в такой машине обычно подающий, а второй — прессующий [76 – 77]. При необходимости между шнеками может быть расположена вакуумная камера.

Шнековые устройства порошковой металлургии должны развивать большие усилия, чем экструдеры для формования термопластов, а также обеспечивать ряд специфических возможностей, обусловленных особенностями пластифицированного порошкового материала. Обычно это достигается использованием дополнительных формующих элементов (например, различных наконечников к шнекам или специальных матриц), а также придания им какого-либо движения (вращательного, поступательного или более сложного).

Наиболее распространенным приемом, улучшающим работу шнека с порошковыми материалами, является использование различных насадок (наконечников) к шнекам. Так, наконечники со спиральной нарезкой [78] способны значительно увеличить усилие, развиваемое прессом. Они также улучшают качество изделий за счет более равномерной их пропрессовки. Более тонко влиять на процесс прессования позволяет использование наконечников с винтовой нарезкой специальной геометрии [79]; в некоторых случаях так удастся формовать даже непластифицированный порошок. Использование более простых в изготовлении гладких конических наконечников к шнекам также способно улучшить качество изделий и снизить энергоемкость процесса прессования. Применяют как неподвижные [80], так и

вращающиеся [81] вместе со шнеком наконечники. Обычно их форма зависит от формы используемой матрицы.

В простейшем шнековом прессе вращается только шнек, а матрица и цилиндр, в котором он установлен, неподвижны. Придав движение и этим элементам пресса, можно значительно расширить его технические возможности. Так, одновременное вращение дорна и матрицы в противоположных направлениях, согласованное определенным образом с вращением шнека [82], способно снизить сопротивление формующего инструмента продавливанию материала. В результате снижается энергоемкость процесса формования и улучшается качество прессовок.

Более того, шнек можно сделать вообще неподвижным [83]. В этом случае материал перемещается по нарезке шнека за счет колебаний корпуса, на внутренней поверхности которого имеется специальный рельеф. Этот микрорельеф обеспечивает анизотропию трения материала о поверхность корпуса. При согласованной частоте продольных и крутильных колебаний возникает усилие, достаточное для экструзии материала.

Большим достоинством шнекового формования является возможность полной автоматизации процесса. Для этого пресс оснащается датчиками, контролирующими основные параметры процесса формования. Сигналы от них поступают на управляющее устройство, работающее по заданной программе. Рабочему остается лишь загружать время от времени материал в бункер, который может быть достаточно объемным.

Прежде всего, контролировать надо коэффициент окружного проскальзывания материала, под которым понимают отношение угловых скоростей порошка и шнека. В идеале это отношение должно стремиться к нулю, то есть порошок должен двигаться вперед без проворота. На практике такой режим встречается крайне редко, если вообще встречается. Коэффициент окружного проскальзывания зависит, главным образом, от соотношения коэффициентов трения материала о цилиндр пресса и шнек. Коэффициенты трения материала с термопластичным наполнителем сильно зависят от температуры, а последняя имеет тенденцию изменяться в зависи-

мости от режима формования и, прежде всего, от частоты вращения шнека. Управляя угловой скоростью шнека, можно стабилизировать процесс формования для разных температурных и силовых режимов.

Коэффициент окружного проскальзывания можно измерять с помощью специального приспособления [84 – 85]. По конструкции датчик напоминает обыкновенный флюгер. Сигнал от него может подаваться на управляющее устройство, а может быть снят визуально. Для этого датчик снабжен шкалой, проградуированной непосредственно в значениях упомянутого коэффициента.

С проворотом материала можно бороться и пассивными средствами. В устройстве для непрерывного формования порошковых материалов [86] цилиндр, в котором установлен шнек, имеет винтовую нарезку с малым углом подъема. Воздействие нарезки на материал компенсирует крутящий момент, передаваемый ему от вращающегося шнека. Это позволяет не только устранить проворот материала, но и заставить его вращаться в противоположную сторону, если это зачем-либо понадобится.

Полезным может оказаться также непосредственный контроль давления в зоне формования. В устройстве [87] датчик давления установлен на выходе шнека, в зоне, где давление прессования максимально. Именно эта зона определяет плотность будущего изделия. Сигналы от датчика поступают в цепь автоматического управления, поддерживающую давление постоянным или изменяющимся по заданному закону. В результате появляется возможность получения изделий заданной плотности и даже управлять ее распределением вдоль изделия.

Решить задачу стабилизации давления в зоне формования отчасти можно более простым способом. В устройстве для экструзии пластифицированных порошковых материалов [88] использована подпружиненная матрица. Нежесткая установка этого ответственного формующего элемента способна гасить случайные колебания давления, возникающие из-за неоднородности материала (равномерного распределения пластификатора достигнуть практически невозможно). Надежность работы всего устройства

при этом увеличивается, срыв (неожиданный проворот материала) наступает заметно реже. Особенно эффективно такое решение при использовании термопластичных добавок в порошок, чувствительных к увеличению трения.

Неожиданные эффекты могут быть получены изменением геометрии таких элементов шнекового пресса, как шнек, цилиндр, в котором он установлен, а также используемых при формовании дорнов и матриц. В устройстве [89] наружная поверхность шнека выполнена винтовой, а внутренняя поверхность цилиндра образована пересечением соосных ему пазов и точечно сопряжена со шнеком. Такая геометрия обеспечивает увеличение усилия пресса без изменения длины шнека. Приведены экспериментальные данные, в которых это усилие возросло до двух раз.

Большое влияние на режим формования оказывает геометрия винтового канала шнека. Так, изменив наклон последнего витка и увеличив его глубину, можно улучшить однородность получаемых изделий [90]. Дело в том, что такой последний виток позволяет устранить стыки между порциями материала, уплотненными в разных витках шнека. В устройстве [91] шнек имеет прямоугольную нарезку, геометрические параметры которой определенным образом связаны с диаметром шнека. В результате увеличивается производительность пресса.

Уменьшить износ шнека помогают продольные пазы, нанесенные на гребнях его винтовой нарезки [92]. Пазы предлагается наносить на загрузочном участке шнека, это улучшает также захват материала. Геометрия пазов строго оговаривается; шнек с такой нарезкой в поперечном сечении делается похожим на фрезу.

Увеличить плотность изделий позволяет использование формующего инструмента со специальными выпукло-вогнутыми участками [93]. На этих участках возникает дополнительное сопротивление движению материала, что увеличивает давление в зоне формования и плотность прессовки. Вогнутый участок предлагается размещать на матрице, а выпуклый — на спе-

циальной оправке, используемой для формования трубчатых изделий. Важна также правильная взаимная ориентация этих участков.

Из краткого обзора видно, что шнековое формование является наиболее эффективным способом реализации экструзии. Легкость автоматизации, непрерывность и высокая производительность являются основными достоинствами этого метода. Главный недостаток — высокая энергоемкость — проявляется обычно при ошибках в конструкторско-технологических решениях. Избежать ошибок в проектировании поможет методика конструкторских расчетов, основанная на теории экструзии пластичных материалов.

1.4.3. Инжекционное прессование

Этот метод формования применяют для изготовления длинномерных изделий малого поперечного сечения, в основном порошковых шнуров и проволоки. Он основан на экструзии и отличается высокой производительностью. Реализуют метод на устройствах, обычно называемых дисковыми экструдерами [94].

Дисковые экструдеры проще и дешевле червячных прессов. Время пребывания и нагрев материала в таких устройствах меньше, что важно при переработке термочувствительных и быстроокисляющихся веществ. Недостатками этих машин являются пульсации скорости и невысокие давления в формующей головке, что ограничивает их применение при работе с жесткими порошковыми материалами. Используются они в основном для переработки термопластов.

Недостатки дисковых экструдеров частично устранены в дисково-червячных машинах. Выдавливаемый из отверстия дискового экструдера расплав попадает в цилиндр с червяком, а уже из него экструдируется в виде профиля. Такие устройства развивают высокие давления и пригодны для формования любых материалов, способных к экструзии.

В последнее время разработан ряд дисковых устройств, предназначенных для формования порошковых материалов. Это более сложные и мощные машины, чем дисковые экструдеры, используемые в химической

промышленности. Они способны формировать низкопластифицированные и, в некоторых случаях, непластифицированные порошковые материалы.

Устройство [95] реализует conform-метод в его классическом виде. Оно состоит из диска, на боковой поверхности которого имеется канал. Диск прижат к неподвижному башмаку с формующим мундштуком на выходе. При вращении диска порошок из бункера попадает в канал и уплотняется под действием сил трения о поверхности канала и башмака. Уплотненный материал приобретает форму шнура, проходя через мундштук. Главным достоинством такой конструкции, по сравнению со шнековым прессом, является отсутствие конической пробки в зоне формования. Параметры канала соответствуют поперечным размерам изделия и радиального обжатия почти не требуется. Отсутствие пробки позволяет значительно снизить усилие формования. Одновременно снижается и энергоемкость процесса.

В устройстве [96] сделана попытка уменьшить размеры пресса и связанные с этим проблемы. От предыдущего оно отличается тем, что канал выполнен извилистым. Это позволяет уменьшить диаметр диска, так как канал такой же длины уместается теперь на меньшем участке боковой поверхности. В результате снижается момент, необходимый для вращения диска.

Для прессования непластифицированных металлических порошков предложено устройство [97], в котором неподвижный башмак отсутствует, а порошковый материал уплотняется между двумя вращающимися дисками, слегка наклоненными по отношению к оси мундштука. Такое решение позволяет увеличить давление прессования и плотность изделий за счет интенсификации касательных напряжений в формуемом материале. Плотность и однородность получаемых изделий можно увеличить за счет создания в порошковом материале сложного напряженно-деформированного состояния [98], а улучшить геометрию прессовок помогает противоположное вращение дисков [99].

Дисковые прессы не нашли пока широкого применения в порошковой металлургии. Возможно, причиной этого является отсутствие теории деформации смеси в таких устройствах, а также методики их проектирования. Обычно для формования длинномерных изделий выбирают более простое и менее производительное мундштучное прессование.

1.4.4. Комбинированные методы экструзии

Есть способы экструзии, которые трудно отнести к какому-либо из трех основных методов. Обычно они представляют комбинацию рассмотренных способов выдавливания материала.

Так, сочетание элементов экструзии и прокатки использовано в устройстве [100], где порошковый материал под действием сил трения продавливается через зазор, образованный специальным стержнем и эластичным вкладышем, имеющим форму тора. Вкладыш в процессе формования проворачивается, обеспечивая равномерное уплотнение материала. В способе получения изделий из труднодеформируемых порошковых материалов [101] тоже сочетаются экструзия и прокатка, но эти приемы формования чередуются друг с другом. В результате после сложных манипуляций получают длинные изделия из твердосплавных порошков.

Комбинация шнекового и мундштучного формования реализована в способе экструзии порошковых материалов [102], где материал продавливается шнеком через матрицу, совершающую возвратно-поступательные движения. Давление подпора при формовании с помощью автоматики изменяется по определенному закону, что позволяет получать изделия повышенной однородности. Совместить шнековое и мундштучное прессование можно и без пульсаций, присущих предыдущему способу. Для этого предложен способ прессования порошков сферическим шнеком [103], совершающим в процессе формования прецессионное движение.

Иногда, при изготовлении трубчатых изделий, экструзия используется как одна из операций. Так, в способе изготовления тепловых труб [104] сначала экструзией формируют наружное покрытие на специальной оправке, а затем переносят его на трубу с одновременной пропрессовкой. Необ-

ходимую капиллярно-пористую структуру фитиля получают введением в порошок специального наполнителя. Для обработки внутренних поверхностей труб малого диаметра дополнительно используют магнитные силы [105].

Метод ротационного прессования [106] представляет собой формирование на дисковом экструдере, усиленном специальными лопастями. Хотя внешне это устройство похоже на дисковый пресс, его возможности значительно шире. Большие усилия, развиваемые таким устройством, часто достаточны для прессования низкопластифицированных и непластифицированных порошков. Возможности этого метода формования еще достаточно не изучены.

Вообще говоря, комбинация известных методов формования открывает широкие перспективы перед изобретателями; некоторые решения оказываются полезными для производства.

ГЛАВА 2. НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВ

В этой небольшой главе содержится краткий обзор теоретических и технологических проблем, которые возникают обычно при экструзии порошковых материалов. Основное внимание уделено проблемам экструзии пластифицированных порошков.

Многие технологические свойства порошков и, в первую очередь, их текучесть, могут быть улучшены введением в материал связующе-пластифицирующих добавок. К такому приему прибегают и при формовании изделий сложной формы, и при экструзии порошковых материалов. Некоторые расходы, связанные с введением и удалением пластификатора, компенсируются высокой точностью размеров и формы прессовок, что позволяет избежать затрат на их механическую обработку. Кроме того, пластификатор значительно уменьшает усилие прессования и износ инструмента, что также снижает себестоимость изделий.

2.1. СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ

В порошковой металлургии высокопластифицированные композиции применяют сравнительно недавно, теория их деформации разработана слабо. Такие материалы сильно отличаются по свойствам от классических порошков, их поведение не описывается уравнениями, используемыми в порошковой металлургии. По реологическим и триботехническим свойствам они ближе к термопластам, хотя и от них отличаются значительно.

2.1.1. Пластифицированный порошковый материал

Пластифицированный порошок состоит из двух существенно различающихся по своим свойствам составляющих: твердых частиц и мягкого пластификатора. Обычно присутствует также газовая фаза. На сегодняшний день предприняты следующие попытки математического описания деформации такого материала.

1. Гидродинамическая аналогия. Пластифицированный порошковый материал ассоциируется с очень вязкой жидкостью. Так как это явно не

ньютоновская жидкость [107], то рассматривают различные реологические модели: от простого тела Бингама-Шведова до весьма сложных тел [108 – 109].

Наиболее простую классификацию вязких жидкостных систем предложил Додж [110]. Согласно этой классификации жидкости бывают вязкими, с нестационарными реологическими характеристиками и упруго-вязкими. К первой группе относятся ньютоновские жидкости с линейной кривой течения, бингамовские вязкопластичные среды (например, масляные краски) и аномально-вязкие системы с нелинейной кривой течения. Высокопластичные порошковые композиции по своим реологическим характеристикам ближе всего к аномально-вязким телам. Вторая и третья группы по свойствам далеки от пластифицированных порошков.

Различают два вида аномально-вязких сред: псевдопластичные и дилатантные. Псевдопластичностью обладают суспензии с асимметричными частицами; дилатансия характерна для паст и суспензий с большим содержанием твердой фазы. Для аномально-вязких псевдопластичных систем предложено большое количество реологических моделей, но наибольшее распространение получила степенная модель Оствальда-Рейнера [111].

Большим недостатком этой модели является зависимость ее основных коэффициентов от температуры [112]. Принцип температурной инвариантности реологических характеристик был впервые предложен А. Александровым и Ю. Лазуркиным [113], затем подробно изучен Г. Виноградовым, А. Малкиным [114] и В. Каргиным [115]. Пластифицированные порошковые материалы также подвергались реологическим исследованиям. Установлено, что с точки зрения реологии такие материалы являются пластично-вязкими телами [116].

Измерены вязкость и предел текучести, а также поведение шихты в условиях сдвига и закономерности ее выдавливания. Сделан вывод о неприменимости гидродинамической аналогии при описании течения пластифицированных порошковых материалов. Получено удовлетворительное совпадение теории с экспериментальными данными лишь для материалов,

содержащих жидкие растворы неорганических пластификаторов, например бентонитовой глины с водой. Изучение таких смесей представляет чисто теоретический интерес, так как столь мягкие прессовки не сохраняют форму.

В работе [117] сделана попытка подобрать математическую модель, адекватно описывающую течение необратимо уплотняемых сред. Порошковые материалы предложено считать жестковязкопластичными, лишенными упругих свойств. Состояние таких тел определяется температурой, пористостью и параметрами упрочнения. Течение пластифицированных порошков эта модель не отражает, так как они упрочнению не подвержены, а влияние температуры на пластификатор совсем не такое, как на металлический порошковый материал.

Теория может оперировать лишь коэффициентами, инвариантными к основным параметрам процесса деформации (давление, скорость течения, их производные). Только в этом случае возможно проведение аналитических преобразований. Для традиционных жидкостей таким коэффициентом, в известных пределах, является вязкость. В гидродинамической же *аналогии* вязкость зависит от многих параметров процесса течения: давления, скорости приложения нагрузки и др. Это не позволяет решать уравнения деформации аналитически, а при численном решении требуется вводить зависимость вязкости от упомянутых величин для каждого конкретного случая.

Математический аппарат гидродинамики хорошо развит лишь для несжимаемых жидкостей, а пластифицированный порошок способен сжиматься, по крайней мере, до тех пор, пока пластификатор не займет в нем все межчастичное пространство. Поэтому гидродинамическая аналогия для описания процесса деформации пластифицированных порошков, вообще говоря, неприменима.

2. Аналогия с компактным материалом. Известны попытки применения уравнений механики деформируемого твердого тела для описания течения пластифицированных порошков. Основанием для этого является

наличие у пластифицированного материала некоторой прочности, что объясняется связующими свойствами пластификатора. Подобный эффект отсутствует как в жидкостях, так и в традиционных порошковых материалах.

Математическое описание в этом случае строится в терминах: предел текучести, коэффициент Пуассона, коэффициент трения. Эти параметры, оставаясь постоянными в известных пределах для компактных материалов, являются сложными функциями напряженного состояния для сжимаемых тел. Возникает такая же ситуация, как и в гидродинамике: проведение аналитических преобразований при переменных коэффициентах невозможно [118].

Следует выделить случай, когда пластифицированный порошковый материал становится несжимаемым. Для высокопластифицированных композиций такое состояние наступает при сравнительно небольших давлениях, в отличие от классических порошков. Свойства несжимаемого материала во многом стабилизируются: предел текучести перестает зависеть от напряжений, исчезает способность к упрочнению (которая при уплотнении связана не с наклепом частиц, а с ростом плотности материала, то есть понимается в расширенном смысле). Связь между нормальными и касательными напряжениями на поверхности контакта с инструментом становится линейной. Для такого материала применимы уравнения деформации компактного неупрочняемого тела, но со специфическими граничными условиями [119].

В теории обработки металлов давлением касательные напряжения на поверхности деформации обычно считают не зависящими от нормальных напряжений (их задают как часть предела текучести) или зависящими линейно (в этом случае пользуются коэффициентом трения). Иногда даже удается получить удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными, вовсе пренебрегая внешним трением. Это объясняется тем, что при прессовании компактных металлов большая часть энергии деформации затрачивается на изменение формы, на внутреннее трение. Поэтому закон внешнего трения не особенно важен.

Пластифицированный порошок в неуплотняемом (сжатом) состоянии, принципиально не отличаясь от литого неупрочняемого металла, имеет предел текучести на несколько порядков меньше. Это приводит к значительному снижению затрат энергии на формоизменение и увеличению доли энергопотерь на внешнее трение. В такой ситуации малейшая неточность в задании граничных условий приводит к большому расхождению результатов теории и эксперимента. Наконец, об этой аналогии можно сказать то же, что и о гидродинамической: ее теория хорошо развита лишь для несжимаемых материалов.

3. Порошковая аналогия. Общей теории уплотнения порошковых материалов пока не существует. В основе такой теории должна лежать зависимость плотности порошкового тела от вида напряженного состояния [120], опирающаяся на инвариантные к напряжениям коэффициенты. Большое разнообразие порошковых материалов, используемых в технике, делает построение общей теории чрезвычайно сложной задачей [121].

Предприняты многочисленные попытки решения более простой задачи по отысканию связи между плотностью и давлением при всестороннем сжатии порошка [122 – 123]. Получены многочисленные уравнения прессования [124 – 125], имеющие ограниченные области применения. Универсальной зависимости даже для простейшего вида напряженного состояния не обнаружено. Причины этого следующие.

Во-первых, реальный объект, рассматриваемый различными теориями прессования — металлический порошок — и его расчетная модель не тождественны. К. Кнопицкий, Н. Кунин, Б. Юрченко и А. Николаев [126 – 127] за основу своих разработок приняли гипотезу о сплошности [128 – 129] прессуемого тела. М.Ю. Бальшин [130], Г.М. Жданович [131, 132, 133], О.В. Роман и Н.И. Щербань [134 – 135] принимают в качестве модели дискретную среду, представляя ее либо в виде шероховатых шаров, либо в виде обособленных физических тел, материал которых подчинен только закону Гука.

Во-вторых, основные задачи пластичности и контактной прочности из-за серьезных математических трудностей только сформулированы и в общем случае не решены, что приводит к необходимости использования гипотез, с той или иной степенью точности отражающих процессы, происходящие в действительности. И, наконец, при выводе уравнений прессования часто не учитываются отдельные факторы: скорость деформации, внешнее и внутреннее трение и др.

Давление прессования зависит главным образом от следующих параметров: пределов текучести и прочности материала, модулей упругости, коэффициента Пуассона. Нельзя пренебрегать также влиянием геометрии зоны формования и трения. С одной стороны, часть упомянутых величин дублируют друг друга, а с другой — в уравнениях прессования не все факторы, влияющие на плотность, учтены (скорость прессования, размер и форма частиц и т.д.). Самое же главное, что большинство из этих параметров являются функциями напряженно-деформированного состояния, а при проведении аналитических преобразований их приходится считать постоянными величинами.

Экспериментально легко убедиться, что ни одно из уравнений прессования не описывает процесса уплотнения высокопластифицированного порошкового материала. Как отмечалось, такой материал уже при небольших (по меркам порошковой металлургии) давлениях становится несжимаемым — даже это явление пока не смоделировано.

В порошковой металлургии математическое описание обычно использует коэффициенты внешнего и межчастичного трения, коэффициент бокового давления. Эти величины даже для непластифицированных порошков зависят от действующих напряжений. Известно, что для пластифицированного порошка упомянутые коэффициенты не только зависят от давления, но и зависят нелинейно [73], а, следовательно, для построения теории непригодны. Необходимо найти инвариантные к давлению характеристики.

Таким образом, пластифицированный порошок по своим свойствам существенно отличается от вязких жидкостей, компактных высокопластичных металлов и чистых (непластифицированных) порошков. Теория, описывающая поведение ППМ при его деформации, отсутствует. Внешнее трение пластифицированного порошка не может быть описано с помощью закона Кулона-Амонтона из-за сильной зависимости коэффициента трения от напряжения.

2.1.2. Теоретические проблемы экструзии

Процесс горячей экструзии непластифицированных порошковых материалов исследован Ю.Г. Дорофеевым [136 – 137] и М.С. Ковальченко [138]. Отмечается, что при анализе энергетических затрат процесс горячей экструзии целесообразно разбить на четыре этапа [139]: выдавливание недоуплотненного материала из контейнера, уплотнение основного материала, этап установившейся экструзии и перемещение материала относительно стенок контейнера. Сделан вывод о том, что на начальном этапе прессования работа в основном затрачивается на уплотнение порошка, а после завершения этого процесса — на экструзию материала. Несмотря на сильное отличие свойств ППМ и непластифицированных порошков, такая постановка задачи представляется перспективной для любых неупрочняемых сред.

Выдавливание спеченного пористого материала через коническую матрицу удобно исследовать методом конечных элементов. Решены задачи для неустановившегося [140] и установившегося [141 – 142] процессов экструзии. Кроме того, приближенное решение для установившегося процесса деформации получено методом тонких сечений [143]. Эти расчеты основаны на теории пластичности пористых тел [144 – 145], не учитывающей особенностей деформации пластифицированных порошков.

Альтернативный подход к решению этой задачи основан на концепции поверхности нагружения и ассоциированном законе течения [146]. Разработан алгоритм и составлен пакет прикладных программ для осуществления численных вычислений. Проведена экспериментальная проверка рас-

четов, совпадение результатов признано удовлетворительным. Полученные результаты вряд ли могут представлять интерес для исследования течения пластифицированных порошковых материалов — слишком сильно они отличаются от пористых спеченных тел.

Экструзия пластично-вязкой порошковой смеси через пространство цилиндр — конфузор — цилиндр исследована в работе [147]. Найдена зависимость между расходом Q и перепадом давления Δp :

$$\Delta p = a + bQ^{1/2} + cQ + dQ^{3/2} + \dots \quad [2.1]$$

где коэффициенты зависят от геометрических параметров и реологических свойств смеси.

В предположении несжимаемости материала решена стационарная задача [148 – 149] о выдавливании труб. Рассмотрены следующие варианты:

- шихта перемещается между двумя коаксиальными цилиндрами без перепада и с перепадом давления, неподвижен внешний или внутренний цилиндр
- перепад давлений отсутствует, внешний цилиндр неподвижен, а внутренний движется с постоянной скоростью и отделен от материала слоем смазки
- оба цилиндра неподвижны и отделены от шихты смазкой
- шихта движется между коаксиальными цилиндрами, переходящими в кольцевой конфузор, перепад давлений есть, оба цилиндра неподвижны.

По существу, это единственное исследование, результаты которого с большой осторожностью можно применять для прогнозирования поведения некоторых полужидких ППМ.

2.1.3. Теория шнекового формования

Теоретических работ, посвященных шнековому формованию пластифицированных порошковых материалов, мало. Вероятно, это связано с отсутствием адекватной реологической модели для таких тел.

Наиболее полно теория деформации материала, проходящего по каналу шнека, изложена в монографии [58]. Однако в этом исследовании, в

связи с большими математическими трудностями, возникающими при анализе процессов выдавливания и уплотнения материала, постановка задач сделана с такими допущениями, которые ставят под сомнение адекватность полученных результатов. Так как особенности течения материала сильно зависят от наряженного состояния, анализ процесса деформации шихты в канале шнека разбит на два этапа: уплотнение и выдавливание. Это позволяет аналитически решить задачу выдавливания несжимаемого и неупрочняемого тела, а процесс изменения плотности материала исследовать на этапе его уплотнения, предшествующем процессу выдавливания.

Процесс выдавливания рассмотрен при следующих допущениях.

1. Зазор между гребнем винта и корпусом отсутствует, глубина канала меньше его ширины и значительно меньше радиуса винта, а угол подъема винтовой линии мал. Эти допущения позволяют пренебречь циркуляционной составляющей скорости (составляющая скорости в поперечном к оси канала направлении) и влиянием боковых ребер. Решается плоская задача, получающаяся после развертки винтовых поверхностей шнека и цилиндрической поверхности корпуса.

2. Предполагается, что перерабатываемая масса подчиняется обобщенному реологическому уравнению [150]:

$$\tau = B \left| \frac{\partial V_x}{\partial z} \right|^{-m} \frac{\partial V_x}{\partial z} \quad [2.2]$$

3. Обрабатываемый продукт несжимаем и полностью занимает рабочую зону межвиткового пространства; он движется сплошным потоком, без образования разрывов.

4. Режим течения ламинарный, силы трения о поверхность могут быть меньше внутренних сил трения. Силы инерции и ускорения пренебрежимо малы.

5. Теплообмен продукта с окружающей средой отсутствует, его температура изменяется только вдоль винтового канала, оставаясь постоянной в двух других направлениях.

6. Аналитическое исследование адиабатического течения возможно только в том случае, если константы реологического уравнения не зависят от температуры продукта. Этому требованию отвечает обобщенный степенной закон, который можно представить в виде

$$\tau = B |\dot{\gamma}|^{-m} \dot{\gamma} = \frac{B_1}{e^{n_0 T}} |\dot{\gamma}|^{-m} \dot{\gamma} \quad [2.3]$$

где B_1 , n_0 и m — реологические константы и индекс течения, не зависящие от температуры T продукта.

Сделанные допущения позволили аналитически исследовать кинематику и энергетику изотермического и адиабатического процессов выдавливания в условиях простого и сложного сдвига. Столь глобальный подход привел к весьма сложным соотношениям, опирающимся на многочисленные эмпирические коэффициенты, процедура измерения которых не описана. Полученные результаты вряд ли могут быть использованы на практике, хотя с теоретической точки зрения они, несомненно, представляют интерес.

Еще более сложны процессы уплотнения и отжима материала в канале шнека. Постановка задачи в этом случае отличается от рассмотренной за счет изменения плотности формуемой шихты и концентрации компонент в ней. Непостоянство плотности и состава значительно усложняет задачу. В этом случае необходимо выводить уравнения состояния продукта в зависимости от перепада давления при движении его в шнековом устройстве.

Формально для этого необходимо знать один из термодинамических потенциалов системы как функцию всех своих параметров. Обычно в качестве такого потенциала используется свободная энергия. Однако, поскольку термодинамика не занимается микроструктурой систем, она не может дать четкого представления о потенциале взаимодействия между отдельными дискретными составляющими системы.

Эта задача приближенно решается в рамках статистической механики, но удовлетворительных количественных результатов получить таким путем пока не удастся. Поэтому представляется целесообразным рассматривать процесс уплотнения как изменение фазового соотношения на макро-

скопическом уровне, характеризуя его массовыми и объемными соотношениями [151].

В случае изменения концентрации при аналитической постановке задачи необходимо учитывать две характерные особенности: изменение концентрации за счет нелинейной фильтрации и стохастические процессы изменения концентрации. При этом необходимо учитывать возможность образования скелета твердой фазы в процессе отжима. К сожалению, такая задача не решена.

Течение воздухом наполненной смеси исследовано в диссертации [152]. В условиях ламинарного течения и отсутствия инерционных сил уравнение течения сжимаемого материала (содержащего газовую фазу) имеет вид

$$\rho_c = \frac{D\bar{v}}{Dt} = \Delta\bar{P} \quad [2.4]$$

где ρ_c — осредненная плотность материала, Dv/Dt — субстанциальная производная, P — тензор напряжений.

Это уравнение течения получено при следующих допущениях: винтовой канал заменен призматическим каналом с прямоугольным сечением, а поверхность цилиндра — горизонтальной плоскостью; поверхность цилиндра движется под углом к направлению оси канала; жидкость смачивает поверхности канала и движется под действием напряжений сдвига, которые возникают при относительном перемещении цилиндра и канала; концевые эффекты и наличие вертикальной компоненты скорости не учитываются. Такие допущения сводят задачу к одномерной.

Даже при столь сильных упрощениях в результате математических преобразований получено уравнение, аналитическое решение которого невозможно. Для продолжения анализа автор делает допущение чисто математического характера (о независимости функции от некоторых аргументов), причем физический смысл этого допущения не выясняется. Вряд ли после такого приема можно рассчитывать на адекватность полученных ре-

зультатов. Однако с методической точки зрения, особенно в части постановки задачи, этот анализ, безусловно, представляет интерес.

Обычно, анализируя деформацию материала в канале шнека, ограничиваются рассмотрением процессов уплотнения и выдавливания. Некоторые исследователи отмечают [58], что не менее важны процессы загрузки шнека и транспортировки материала в его первых витках. Именно здесь создаются начальные условия, используемые затем в уравнениях течения и деформации. Действительно, давление в зоне загрузки очень мало по сравнению с давлением прессования, но им нельзя пренебрегать: задав в качестве начального условия нулевое давление на входе канала, большинство моделей выдаст нуль и на выходе устройства!

Свободная транспортировка сыпучего материала в канале шнека — весьма сложный процесс. Идеализированному описанию движения материальной частицы по винтовой линии посвящены труды многих ученых [153 – 154] и технологов [155 – 156].

Основным недостатком идеализированных физических моделей является отсутствие учета стесненного движения частиц в ограниченном пространстве канала шнека, их взаимодействия и наличия противодействия. Это порождает путаницу между коэффициентами заполнения канала и производительности, которые совпадают лишь при отсутствии противодействия [157].

Материал будет перемещаться шнеком лишь в том случае, когда сила трения его частиц о поверхность цилиндра, возникающая из-за центробежной силы, вызывает окружное проскальзывание частиц. Кроме этих сил на частицу действуют сила тяжести и т.н. сила положения. Последняя представляет собой силу инерции и направлена вдоль канала шнека в направлении, противоположном направлению перемещения материала. Решение задачи о транспортировке материала шнеком описано в монографии [58] и из-за громоздкости здесь не приведено. Оно пригодно для любых сыпучих материалов, в том числе и для пластифицированных порошков после операции гранулирования.

Процесс заполнения канала шнека материалом существенно зависит от вида применяемого в устройстве дозирования. Различают весовое и объемное дозирование; первое точнее, а второе проще и потому применяется чаще [158]. При объемном дозировании продукт подается из загрузочного устройства в приемную зону шнека под действием собственного веса. Продолжительность операции заполнения канала зависит от подвижности материала и геометрических особенностей канала, а также геометрии зоны загрузки. Последний фактор формализуется особенно трудно.

Истечение сыпучего материала через отверстие в днище бункера представляет собой процесс выпадения отдельных частиц из свода, образующегося над отверстием; этот свод иногда называют «динамическим разгружающим сводом». При этом предполагается, что выпадение частиц из свода происходит только под действием сил тяжести, поэтому высота столба продукта не влияет на скорость истечения. Подобный подход к решению задачи для пластифицированных порошков надо применять с большой осторожностью.

Усилие червячного пресса, необходимое для формования пластифицированных порошковых материалов, может быть рассчитано при следующих допущениях [159]:

- напряжения сдвига в пластифицированной порошковой массе по всему сечению канала червяка превышают ее предел текучести (т.е. смесь достаточно жидкая)
- вязкость массы не зависит от давления и, следовательно, постоянна по всей длине канала; авторы делают оговорку, что такое упрощение допустимо только для зоны дозировки (а затем применяют его для всего шнека)
- переработка массы осуществляется в изотермических условиях, что, по утверждению авторов, соответствует принудительному охлаждению пресса и малой глубине канала шнека (ниже будет показано, что условия, в которых находится материал в канале шнека, очень далеки как от изотермических, так и от адиабатических)
- материал полностью прилипает к поверхностям цилиндра и канала шнека (справедливо только для жидкостей)

Такие допущения сводят задачу решения уравнения неизотермического движения неньютоновской жидкости

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial V_z}{\partial x} \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\partial V_z}{\partial y} \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad [2.5]$$

к решению более простого уравнения

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \eta \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2} \quad [2.6]$$

Мощность, потребляемая червяком при переработке пластифицированных порошковых материалов, может быть определена как сумма мощностей тепловыделения и потенциальной энергии потока. Такой подход применен в работе [160]. В случае вязкоупругого тела функция диссипации усложняется, что приводит к весьма громоздким уравнениям. В монографии [30] использован более простой подход, основанный на составлении уравнения равновесия сил, действующих на шнек и корпус пресса.

Слабым местом шнекового формования является высокая энергоемкость процесса. Теоретически обоснованная конструкция шнека, оптимизированная по энергосиловым показателям, способна решить некоторые проблемы [161 – 162].

Как видно из приведенного обзора, теория деформации ППМ в настоящее время отсутствует. Решены лишь некоторые частные задачи; прямой перенос этих решений в порошковую металлургию невозможен из-за больших различий в реологии исследованных смесей и пластифицированных порошков.

2.2. ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСТРУЗИИ

Технология холодной экструзии мало зависит от химического состава и свойств исходного порошкового материала. Она заключается в пластификации порошка, подготовке материала к формованию, экструзии, удалении пластификатора и спекании изделий. Перед экструзией в порошковый материал вводят много пластификатора, количество и состав которого полностью определяют технологические свойства шихты.

Так можно формовать самые разные порошки [163]: керамику, тугоплавкие металлы, нержавеющие и инструментальные стали, железоникелевые сплавы, карбид вольфрама. Экструзией пластифицированных порошков получают изделия сложной формы с хорошими механическими свойствами: корпуса часов, детали вычислительной и медицинской техники. Несмотря на большую усадку, возможно получение точных размеров при плотности изделий 95...99% [164].

2.2.1. Выбор пластификатора

К пластификатору предъявляются довольно жесткие требования. Кроме связующих, пластифицирующих и смазывающих свойств он должен быть дешевым и недефицитным, легко перемешиваться с порошком и легко извлекаться из прессовок, не препятствовать процессу спекания и не загрязнять готовых изделий. Применяют неорганические и органические пластификаторы.

Неорганические пластификаторы используют при формовании тугоплавких соединений. Описан процесс мундштучного прессования порошка дисилицида молибдена, пластифицированного бентонитовой глиной [165]. Такая глина состоит из 65% SiO_2 , 20% Al_2O_3 и 15% H_2O ; ее концентрация в материале составляет 4...10%. Главным недостатком неорганических пластификаторов является невозможность их удаления из прессовки. Они сильно загрязняют изделие, что ограничивает область применения таких добавок. К тому же надо считаться с химической активностью некоторых неорганических составляющих. Неорганические пластификаторы в порошковой металлургии широкого распространения не нашли. Значительно удобнее работать с органическими наполнителями.

Изучены и описаны различные органические пластификаторы [166 – 167]: воск, парафин, поливиниловый спирт, раствор синтетического каучука в бензине, полиэтилен, оксид полиэтилена, раствор поливинилацетата в ацетоне, метакрилат в виде раствора в трихлорэтаноле, полиэтиленгликоль, раствор диатанагаминоэтилового эфира, алкилен янтарной кислоты, крахмальный клейстер, тефгон и стеарат, этиленстеарамид, поливинилбутирол,

сульфитно-спиртовая барда, препарированная каменноугольная смола, меласса и многие другие.

Выбор основы для шликера или пластификатора чрезвычайно важен, поскольку эти вещества могут сильно загрязнить материал газами (кислородом, водородом, азотом) и углеродом при спекании. Описано [168] влияние трех наиболее распространенных пластификаторов на газосодержание никелевых сплавов. Установлено, что поливиниловый спирт и полиизобутилен в меньшей степени загрязняют материал, чем камфара, которая позволяет получать более прочные заготовки. Другие исследователи отмечают [169], что поливиниловый спирт не приводит к увеличению содержания кислорода в никелевых сплавах при спекании в вакууме и лишь незначительно загрязняет сплав углеродом. К сожалению, весьма распространенный в твердосплавной промышленности пластификатор — парафин — в этих сравнениях не участвовал.

Отмечается [170], что пластификаторы могут вносить в материал загрязнения, поэтому при их выборе следует соблюдать ряд условий. Так, пластификатор не должен реагировать с керамической и металлической фазами в процессе спекания, должен легко удаляться, не вносить вредных примесей и способствовать получению более плотных изделий. Вследствие этого исключается применение какого-либо универсального пластификатора, пригодного для всех материалов.

Таблица 2.1 содержит составы наиболее эффективных термопластичных связок для шликеров, состоящих из порошков металлов и керамики. Это касторовое масло, олеиновая и стеариновая кислоты, а также пчелиный воск. Добавка пчелиного воска обеспечивает наибольшее снижение вязкости шликера и улучшает его литейные свойства [29].

Таблица 2.1

Рекомендуемые составы термопластичных связок для шликеров из порошков металлов и керамики (массовая доля, %)

Парафин	Олеиновая кислота	Пчелиный воск	Стеариновая кислота
95	5	0	0
97	0	0	3
94	0	6	0

Свойства шликера существенно влияют на упаковку частиц в прессовке. Таблица 2.2 содержит данные о влиянии количества и состава пластификатора на величину коэффициента упаковки шликера, приготовленного из порошка с размером частиц менее 1 мкм.

Таблица 2.2

Значения объемной доли пластификатора в шликере и коэффициента упаковки керамических частиц в заготовках

Пластификатор	Объемная доля пластификатора, %	K_y
Парафин — канифоль	48	0,26
Парафин	44	0,28
Парафин — олеиновая кислота	43	0,29
Парафин — касторовое масло	40	0,30
Парафин — воск	34	0,39

Для получения заготовок методом литья термопластичных шликеров используют состав, содержащий 4,5...7,0% мас. пластификатора, состоящего из парафина (85% мас.) и пчелиного воска (15% мас.). Заготовки формуют при температуре шликера 70...80 °С и температуре пресс-формы 20...30 °С (давление 0,7 МПа).

Долгое время в порошковой металлургии при мундштучном прессовании использовался в качестве пластификатора пищевой продукт — крахмал [171]. Сейчас ему найдена замена — полиакриламид [172]. Восьмипроцентный раствор этого вещества по свойствам близок к крахмальному клейстеру, а по цене — вдвое дешевле. Применять полиакриламид можно не для всех порошков. В смесителе он окисляет порошки на основе железа, а протекающая при этом химическая реакция лишает его пластифициру-

щей способности. Перспективно также применение поливинилового спирта, карбоксилметилцеллюлозы и сульфата целлюлозы.

Из органических пластификаторов наиболее универсальным является парафин. Он не дефицитен и обладает хорошей связующей, пластифицирующей и смазывающей способностями. Парафин легко удаляется из прессовки и почти не загрязняет изделие углеродом. Парафиновый пластификатор широко используют в твердосплавной промышленности, при производстве изделий из металлических порошков и других сыпучих материалов. На основе парафина создано множество пластифицирующих и связующих композиций. Формовать с парафином можно любые порошковые материалы, так как он химически инертен. Технологические свойства смеси можно изменять в широких пределах, изменяя количество вводимого пластификатора и температурный режим формования.

Введение в порошок 7...15% мас. парафина [73] позволяет уменьшить коэффициенты внешнего и межчастичного трения в 5...10 раз, а плотность материала увеличить с 62 % до 100 % (при давлении 100 МПа). Отмечается, что по достижении определенной концентрации пластификатора в порошке давление выдавливания резко уменьшается и становится возможной холодная экструзия материала. Даны рекомендации, основанные на многочисленных экспериментах, по нахождению этой концентрации, однако теоретические обоснования отсутствуют.

Эффективность использования парафина можно заметно увеличить применением поверхностно-активных веществ [173]. Исследовано влияние олеиновой $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{15}\text{COOH}$, пальмитиновой $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{14}\text{COOH}$ и стеариновой $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{16}\text{COOH}$ кислот. Отмечается, что добавка 1% любой из этих кислот на каждые 5% парафина снижает давление прессования на 10 МПа. Другими словами, 1% поверхностно активных веществ заменяет 2...3% пластификатора (в известных пределах, конечно). Количество ПАВ, необходимое для плакирования всех частиц порошка мономолекулярным слоем, найдено в работе [174].

2.2.2. Пластификация порошка

Подготовка смесей к прессованию — важная операция, без которой невозможно получение качественных заготовок. Пластичность материала зависит не только от выбранного пластификатора и его концентрации в материале, но также от способа введения добавки и влажности смеси [175]. Количество пластификатора в порошке может достигать по объему 50%, на качестве изделий это не отражается. Дополнительное брикетирование и вакуумирование шихты позволяют еще более увеличить ее пластичность.

При производстве твердосплавных спиральных изделий (сверл, фрез, разверток) методом мундштучного прессования порошок пластифицируют следующим образом [176]. В него добавляют 6...15% мас. парафина в виде мелкой стружки, затем массу нагревают до температуры 80...120 °С и тщательно перемешивают. После этого ее продавливают через мундштук или многоканальную фильеру для гомогенизации (этой операции можно избежать [173] за счет применения ПАВ) и спрессовывают в цилиндрические брикеты. При формовании прессформу нагревают до 35...40 °С; экструзию осуществляют со степенью обжата 94...99% и скоростью истечения материала 2...3 мм/с. Отмечается, что при использовании в качестве пластификатора парафина давление истечения минимально.

Пластификация тугоплавких соединений перед мундштучным прессованием подробно исследована [177] на примере порошка карбида циркония. Использовался пластификатор, состоящий из 40% парафина, 40% воска и 20% олеиновой кислоты (по массе). Содержание пластификатора варьировалось в пределах 34...45% (по объему). Отмечается, что при меньшем содержании пластификатора экструзия не идет, а при большем возникают проблемы с его удалением и спеканием изделий. Для получения более однородной массы ее многократно продавливали на прессе через мундштук (весьма эффективная операция). После введения пластификатора и гомогенизации смеси получался материал, пригодный для холодной экструзии.

Другой распространенный пластификатор — крахмальный клейстер — вводят в порошок следующим образом [68]. Клейстер заливают в по-

рошковый материал и смесь длительно перемешивают на каландрах. Полученную шихту протирают через сито с ячейкой 2 мм и перемешивают для усреднения содержания пластификатора, затем сушат в вакуумном шкафу в течении двух часов при температуре 120 °С. Качество приготовления материала контролируют на капиллярном вискозиметре (измеряют вязкость).

Свойства ППМ во многом зависят не только от количества и состава пластификатора, но также от способа его введения в порошок и качества перемешивания шихты. Дело в том, что пластификатор, даже при равномерном его распределении в материале, может по разному располагаться между частицами порошка. Наилучшим считается случай, когда каждая частица оказывается покрытой тонкой пленкой пластификатора.

Для получения такого материала предложен способ пластификации [178], заключающийся в плакировании частиц порошка пленкой термопластичного материала. Плакирование осуществляют в камере, наполненной парами нагретого пластификатора. Холодные частицы порошка, попадая в такую камеру, конденсируют на себе пленку этого вещества и падают в поддон уже с нанесенным покрытием. После такой обработки порошок приобретает максимально возможную пластичность при фиксированном количестве пластифицирующей добавки.

Более простой способ пластификации порошков предложен в статье [179]. Железный порошок марки ПЖ2М4 со средним размером частиц 100 мкм смешивали со стеаратом цинка непосредственно в процессе размола. Качество пластификации оказалось выше, чем при введении наполнителя в предварительно размолотый порошок. Исследования, однако, ограничились введением всего 2% пластификатора. Вероятно, при большем количестве органической добавки процесс размола затрудняется.

Иногда удобнее иметь дело не с порошковым, а с гранулированным материалом. Такой материал легче транспортируется шнеком, лучше поступает из бункера, стабильнее при хранении. Для гранулирования пластифицированных порошков предложено устройство [180], содержащее сферический шнек и неподвижный нож-сетку. Размер получаемых гранул ре-

гулируется выбором необходимой сетки. Работа устройства напоминает работу мясорубки, лишенной подвижного ножа; нарезка материала осуществляется за счет движения шнека.

Для получения проницаемых пористых изделий в порошок или прессовку вводят специальный наполнитель. Так, при изготовлении стальных фильтров [181], осуществляют пропитку материала синтетическим церезином в вакууме. Обработанные заготовки подвергают обезжириванию и последующему травлению в смеси кислот. Возможна также пропитка материала жидким легкоплавким металлом, что способствует сохранению открытой пористости при обработке резанием; после обработки металл удаляют испарением в вакууме.

Пластификация порошка для последующей холодной экструзии имеет свои особенности. В результате этой операции необходимо получить максимально пластичный материал. Отличительной особенностью такого материала является исчезновение в нем газовой фазы при сравнительно небольших давлениях. Другими словами, высокопластифицированная композиция легко уплотняется до компактного состояния без пластической деформации частиц, ее образующих.

Количество пластификатора, которое необходимо ввести в порошок для получения высокопластифицированной композиции, можно рассчитать по формуле [182]:

$$c_n = \frac{\rho_{nl}(\rho_n - \rho)}{\rho_{nl}(\rho_n - \rho) + \rho_n \rho} \quad [2.7]$$

где ρ_{nl} , ρ_n и ρ — плотность пластификатора, пикнометрическая и насыпная плотности порошка соответственно.

Это соотношение получено из расчета, что в пластифицированной композиции пластификатор должен занимать все межчастичное пространство порошка, находящегося в состоянии свободной насыпки.

2.2.3. Формование пластифицированных порошков

Пластифицированные порошки формуют дискретными и непрерывными способами. В дискретных способах число циклов подачи шихты в прессформу соответствует числу циклов прессования [183] и размеры изделий ограничены в трех измерениях. В непрерывных способах подача шихты в зону формования осуществляется независимо от числа циклов прессования и размеры изделий ограничены только в двух измерениях.

В современной технике постоянно растет потребность в изделиях сложных форм [184], обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками. Прежде всего, это детали из пористых материалов с развитой поверхностью: фильтрующие элементы обыкновенные [185 – 186] и повышенной прочности [187 – 188], детали теплообменных устройств [189 – 190], фитили тепловых труб [191], смесители и загустители [192], пламепреградители [193].

Применение пористых покрытий в теплообменных устройствах позволяет повысить коэффициент теплопередачи до 35% [194] и тепловой поток до 1.12 МВт/м^2 [195]. Выполнен расчет параметров винтового оребрения, обеспечивающего максимальную теплопередачу [196]. Такую сложную поверхность можно получить лишь экструзией пластифицированных порошков. Более простые кольцевые ребра могут быть получены накаткой [197].

Высокопористые электроды с оребрением [198] используют в электрохимии. Изготавливают их из нитрида титана, а продольные ребра увеличивают прочность электродов, плотность которых не превышает 50%. Трубы и стержни с развитой поверхностью используют в пилотируемых космических кораблях в качестве топливных элементов, работающих на водороде и кислороде [199]. Получают такие изделия холодной экструзией порошковых материалов.

До сих пор самым распространенным способом изготовления порошковых изделий сложной формы является обработка резанием [200]. Резание пористых порошковых заготовок имеет ряд особенностей [201 – 202],

связанных с их низкой прочностью и закрытием пор при обработке. Порошковые изделия относят к труднообрабатываемым, причем, чем выше пористость, тем труднее их резать [203 – 204]. Заготовки для обработки резанием обычно получают экструзией пластифицированных порошков.

Актуальной задачей является формование спеченных проницаемых материалов [205 – 206]. Для получения изделий сложной формы из таких материалов иногда применяют следующий способ [176]. В порошок специальными приемами вводят повышенное количество парафина для увеличения прочности прессовок. После экструзии заготовки обрабатывают резанием и лишь затем спекают. Такая технология позволяет получать изделия практически любой формы, поверхностные поры при резании не закрываются, отсутствуют отходы и износ инструмента. Изделия, полученные резанием пластифицированных заготовок, имеют точность размеров и шероховатость поверхностей, недоступные для традиционных методов порошковой металлургии. Возможно получение изделий практически любой формы. Однако такая технология трудоемка, непроизводительна, плохо поддается автоматизации.

Наиболее распространенный способ соединения пористых металлов — сварка. Применяется аргонно-дуговая сварка с плавящимся электродом, а также диффузионная и контактная сварка. Проблемы изготовления сварных фильтров методом контактной сварки из листов коррозионностойкой стали, титана и никеля [207] подробно исследованы. Технология изготовления труб с винтовыми ребрами из САПа описана в статье [208]. Она заключается в прессовании брикетов на гидравлическом прессе, обтачивании их на токарном станке, экструзии этих брикетов, вакуумном отжиге и допрессовке. Полученные короткие трубы сваривают, получая изделие необходимой длины.

Простые заготовки, полученные экструзией, можно склеить и получить весьма сложное изделие [209]. Склеивание обеспечивает герметичность соединения при незначительном увеличении массы изделия. Однако клеевые соединения обладают низкой теплоустойчивостью (до 300 °С) и

подвержены старению. Кроме того, клей затекает в поры, ухудшая свойства изделий. Этим же недостаткам подвержены и паяные соединения.

Близким к экструзии является формование изделий шликерным литьем, особенно если литье осуществляют под давлением [210 – 211]. Этот метод издавна широко используется в керамической промышленности, в последнее время его стали применять и в порошковой металлургии. Так получают изделия особо сложной формы из дисперсных порошков. Формование проводят без нагрузок или с небольшими нагрузками. Обычно применяют гипсовые формы; перспективными представляются пористые разъемные формы, изготовленные из металлических порошков.

Процесс экструзии может быть активизирован вибрацией. Иногда виброуплотнение используют как самостоятельный метод формования труднопрессуемых порошков [212]. Вибрация облегчает выдавливание и улучшает равномерность загрузки материала из бункера. При использовании шнековых устройств экструзия становится стабильнее, количество аварийных остановок пресса уменьшается.

Во многих областях техники используются трубчатые изделия с развитой поверхностью. Они нужны, прежде всего, в теплообменных устройствах и фильтрах. Если одновременно с развитой поверхностью требуется высокая пористость и проницаемость, то получение таких изделий возможно лишь методом экструзии пластифицированного порошкового материала.

Формуют трубы с оребрением на сложных шнековых устройствах. Трубчатые изделия с наружными винтовыми ребрами можно формовать на двухшнековом прессе [213], шнеки в котором установлены соосно. Это устройство позволяет также получать армированные трубы, причем арматура в них расположена винтом. Такая ориентация волокон эффективна в устройствах, работающих под давлением. Еще шире технические возможности у устройства с гибким шнеком [214] — оно позволяет получать трубы как с наружным, так и с внутренним оребрением. Более того, в нем предусмотрена возможность формования изделий с закрытой винтовой полостью (по которой может прокачиваться, например, охлаждающая жид-

кость). Это устройство позволяет регулировать шаг винтовых ребер прямо в процессе формования. Принципиально решена также задача изготовления проницаемых гофрированных труб [215], хотя реализация ее представляется непростым делом.

Технически сложную задачу представляет собой формование покрытий на внутренних поверхностях трубчатых изделий. Такая необходимость может возникнуть в процессе изготовления тепловых труб, теплообменников, фильтров и некоторых других устройств. При большой длине трубы ее внутренняя поверхность становится относительно недоступной.

Традиционно в порошковой металлургии покрытия получают припеканием свободнонасыпанных порошков [216 – 217], напрессовкой с последующим припеканием [218], накаткой роликом-электродом с одновременным привариванием [219], обмазкой шликерами [220], центробежным формованием [221 – 222]. Все эти методы дискретны и позволяют получать либо гладкие покрытия, либо покрытия с незначительно развитой поверхностью. Значительно больше возможностей предоставляет использование пластифицированных порошков.

Нанесение покрытий на внутренние поверхности труб удобнее проводить в два этапа [223]. Сначала осуществляют формование наружного покрытия на специальной оправке методом экструзии. Оправка, представляющая собой стержень с дорном на конце, пропускается сквозь осевое отверстие шнека и выдавливается вместе с материалом. Затем ее помещают внутрь обрабатываемой трубы и протягивают. Дорн, расположенный на одном из концов оправки, напрессовывает покрытие на внутреннюю поверхность трубы. Операции нанесения покрытия на оправку и трубу можно совместить [224].

Если наносимое покрытие должно иметь развитую поверхность (например, в теплообменниках или фильтрах с большой грязеемкостью), эффективно использование двухшнекового устройства [225]. Оно обеспечивает нанесение внутренних покрытий с продольными и винтовыми реб-

рами. В устройстве предусмотрена обработка поверхностей различного профиля.

Технически сложной задачей является и формование изделий переменного по длине профиля. Решается она обычно экструзией материала через матрицу, образованную подвижными элементами, способными к синхронному перемещению. Например, материал можно непрерывно продавливать через матрицу, выполненную в виде четырех сопрягаемых внутренними поверхностями кулачков [226], связанных между собой механизмом перемещения. В процессе экструзии кулачки движутся в соответствии с заданной программой, образуя изделие переменного профиля. Вместо кулачков могут быть использованы подвижные ролики [227 – 228]. Известны и альтернативные решения [229], обеспечивающие получение изделий переменного профиля с повышенной плотностью и прочностью.

Метод формования материалов с органическими добавками идеально подходит для получения пористых изделий. После отгонки наполнителя остается проницаемая капиллярно-пористая структура, которая сохраняется и после спекания. Более сложные проницаемые изделия с большим количеством сквозных отверстий, необходимых для стока конденсата (например, в фитилях тепловых труб), можно получить методом центробежного формования [230].

Из пластифицированных порошков можно формовать и многослойные проницаемые изделия, используемые иногда в качестве фильтрующих элементов повышенной грязеемкости. Для этого удобно использовать многозаходный шнек с раздельной загрузкой витков разными материалами [231]. Специальная форма винтовой нарезки на выходе шнека обеспечивает надежное соединение слоев в биметаллическое изделие. Принципиально возможно получение изделий, состоящих более чем из двух слоев. Многослойные трубчатые изделия можно формовать также с помощью ступенчатого шнека [232]. Каждая ступень шнека в таком устройстве загружается принудительно своим порошковым материалом. Матрица изготовлена та-

ким образом, чтобы не нарушать сформированную на шнеке многослойную структуру.

На шнековых прессах формируют композиционные материалы, армированные как непрерывными, так и дискретными волокнами. Дискретные волокна могут быть дополнительно ориентированы мощным магнитным полем [233], подобно тому, как это имеет место при производстве постоянных магнитов с большой коэрцитивной силой. Естественно, волокна должны быть ферромагнитными; желательно также, чтобы они обладали магнитной анизотропией.

2.2.4. Удаление пластификатора и спекание изделий

Обычно процедуру удаления термопластичных органических наполнителей совмещают со спеканием, что приводит к экономии электроэнергии и снижению трудоемкости изготовления изделий по сравнению с разделением этих процессов. Режим спекания при этом несколько усложняется за счет добавления изотермических выдержек и ограничения скорости нагрева на начальном этапе термической обработки [234 – 235].

Теоретические проблемы спекания порошковых смесей с наполнителями подробно исследованы [236]. Описаны диффузионные модели порошковых смесей и количественные критерии степени их гомогенизации. Рассмотрены феноменологические явления объемного диффузионного роста при спекании смешанных порошковых объектов. Однако особенности спекания пластифицированных порошковых материалов не объяснены.

В процессе спекания пластификаторы могут выгорать, коксоваться, возгоняться либо оставаться без изменений [237]. Таблица 2.3 показывает содержание золы и кокса в органических пластификаторах. Видно, что и в этом случае парафин оказывается вне конкуренции.

Таблица 2.3

Содержание золы и кокса в органических пластификаторах

Пластификатор	Массовая доля, %		Отношение растворителя к растворяемому веществу
	Зола	Кокс	
Крахмальный клейстер	2,45	6,7	4:1
Раствор поливинилового спирта в воде	0,58	1,1	4:1
Парафин	0	0	—
Раствор парафина в бензине	0	0	2:1
Раствор парафина в бензоле	0	0	2:1
Раствор каучука в бензине	0,94	1,5	10:1
Раствор бакелита в спирте	...	50	10:1

Загрязнение изделий углеродом зависит не только от используемого пластификатора, но и от режима спекания. Минимальное загрязнение наблюдается при нагреве изделий до 400...450 °С на воздухе — пластификатор выгорает. Если прессовки сразу нагревают в защитной атмосфере, то количество вносимого в изделия углерода равно содержанию кокса в сухом пластификаторе.

Широко распространенный пластификатор — синтетический каучук — удаляют следующим образом [238 – 239]. Изделия помещают в графитовую лодочку и засыпают графитовой крупкой. Садка в печь производится при температуре 500...600 °С и дается тридцатиминутная выдержка. За это время пластификатор полностью выгорает. Затем печь продувают инертным газом, дальнейшее спекание производят в атмосфере водорода. Спеченные изделия имеют пористость 20...25%.

Термообработка прессовок, полученных методом мундштучного прессования из порошков тугоплавких соединений, пластифицированных смесью воска с парафином [177], проходит в два этапа. На первом этапе удаляют пластификатор в вакуумной печи, которую нагревают до 350 °С и делают двухчасовую выдержку. На втором этапе спекают изделие в печи с графитовым нагревателем в среде аргона. Использование вакуумной печи

обеспечивает удаление пластификатора из прессовок, что предохраняет печь для спекания от загрязнения продуктами термического разложения пластификатора. Это дорогое решение гарантирует высокое качество получаемых изделий.

Оборудование для совмещения операций удаления пластификатора и спекания изделий выпускается в промышленных масштабах. Современные печи для депарафинизации и предварительного спекания снабжены вакуумноцеребриновым насосом и графитовым нагревателем [240].

При исследовании процесса удаления пластификатора обычно контролируют массу образцов [241], что связано с рядом неудобств. Термопластичные пластификаторы при нагреве разжижаются, прессовка теряет прочность и ее трудно взвешивать. Кроме того, такая методика не позволяет изучить процесс миграции жидкого пластификатора в дисперсную засыпку.

Перспективна методика контроля за процессом удаления пластификатора по изменению электропроводности материала [242 – 243]. В экспериментах использовался пластификатор, состоящий из парафина с добавкой полиэтилена (5...7%, против седиментации). В железный порошок ПЖ6М вводили 15...20% мас. такого пластификатора и прессовали брикеты. При нагреве брикетов до 50...55 °C наблюдалось уменьшение металлических контактов, а при температуре 55...130 °C происходило удаление жидкого пластификатора в дисперсную засыпку (каленный оксид алюминия). При нагреве до 150 °C в течение двух часов удалялось 70% органики. Затем заготовки нагревали со скоростью 200 °C в час до температуры спекания (1000...1100 °C). Усадка составила всего 1...1.5%, а пористость изделий — 50...60%. Сделан вывод: основная часть пластификатора удаляется в адсорбент в жидком состоянии.

Влияние органических пластификаторов — крахмала и полиакриламида — на процесс спекания железных и стальных порошков хорошо изучено [172]. Установлено, что крахмал не оказывает заметного влияния на процесс спекания железа и сталей. Полиакриламид увеличивает усадку и

прочность изделий; это лучший пластификатор для нержавеющей стали. Однако применение его для порошков железа и обыкновенных сталей чревато чрезмерным их окислением. Удаляются эти пластификаторы относительно безболезненно.

Иногда совмещение операций спекания и удаления пластификатора нежелательно, так как требует специального оборудования, защищающего внутреннее пространство печи от продуктов разложения органики. Кроме того, при совмещении операций пластификатор безвозвратно теряется, а выделяющиеся газы загрязняют атмосферу. Избежать неприятностей позволяет предварительное удаление пластификатора перед спеканием. Для этого можно использовать высокочастотное электрическое поле и действие капиллярных сил [244]. Собранный пластификатор может быть использован повторно.

Частичное удаление пластификатора иногда возможно уже на завершающем этапе формования. Так, при изготовлении фильтрующих элементов с переменной пористостью по сечению, удаление пластификатора из периферийных слоев заготовки совмещено с процессом формования [245]. Отгонка идет по наружной поверхности тонкостенного изделия, поэтому удается удалить практически весь пластификатор. В каком-то смысле это идеальный процесс формования пластифицированных порошков: после прессования пластификатор тут же удаляется и на выходе оказывается заготовка без посторонних добавок. Получить изделия переменной пористости возможно и принципиально другим способом [246].

Спекание крупногабаритных прессовок с термопластичной связкой затруднено резким уменьшением прочности изделия при нагреве. Это приводит к изменению формы заготовки и даже ее разрушению под действием собственного веса. Если порошок, из которого сделано изделие, ферромагнитен, проблема деформации может быть решена использованием поддерживающего магнитного поля [247]. Так как магнитные свойства материала по мере его нагрева изменяются, предусмотрено плавное увеличение

напряженности поддерживающего магнитного поля вплоть до точки Кюри, непосредственно перед которой делают изотермическую выдержку.

При формировании порошков на шнековом прессе выделяется большое количество теплоты, которая обычно уходит в окружающую среду без ощутимой пользы. Из-за этого увеличивается энергоемкость экструзии, делая ее неконкурентоспособной по экономическим показателям. Высокая энергоемкость процесса формирования — главный недостаток шнековых устройств. Оказывается, этот недостаток иногда можно превратить в достоинство [248]. Если трение материала о формообразующие поверхности усилить искусственно, то выделяющейся теплоты может хватить для спекания пресовки непосредственно после ее формирования — из пресса выходит готовое изделие. Более того, тепловыделение на разных участках можно регулировать, обеспечив возможность вращения не только шнеку, но и цилиндру, в котором он установлен. Матрица устройства, реализующего этот способ, также может вращаться, что регулирует тепловыделение на самом ответственном участке.

Формующий инструмент может двигаться весьма сложно [249]. Это также приводит к дополнительному тепловыделению и спеканию материала. Возможность регулировки температуры обеспечивается путем изменения режимов формирования. Получено соотношение, которое, по замыслу авторов, поможет правильно рассчитать скорость движения инструмента. Дополнительным источником тепла может быть также специальный роторно-нож [250], разрезающий полуфабрикат на пластины перед экструзией. Изделия, полученные таким способом, имеют повышенную плотность. Вращение матрицы еще более расширяет его технические возможности [251].

Совмещение операций формирования и спекания возможно и на дисковых экструдерах, где в результате интенсивного трения материала об инструмент выделяется много тепла. Впервые это использовали японцы при производстве порошковой проволоки [252]. Температура материала в процессе прессования достигает 300...700 °С, этого достаточно для спекания

некоторых порошков. На выходе изделие быстро охлаждают, и материал не успевает окислиться.

При совмещении операций формования и спекания время, необходимое для спекания, значительно сокращается. Процесс диффузии интенсифицируется высоким давлением и касательными напряжениями в материале, как при сварке трением. Время спекания и окисление материала минимальны, к тому же зона спекания изолирована от окружающей среды и может быть насыщена газами-восстановителями, выделяющимися из органических наполнителей.

Подводя итог, можно отметить, что основные этапы технологии формования и спекания пластифицированных порошков проработаны достаточно хорошо. И все-таки в промышленном производстве ППМ используют неоправданно редко. Вероятно, причиной этого является не только консерватизм, но и отсутствие хороших конструкторско-технологических методик, позволяющих грамотно проектировать новые технологические процессы и оборудование. А для создания таких методик необходима теория экструзии порошковых материалов.

2.3. СВОЙСТВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВ

Свойства ППМ сильно отличаются от свойств чистых порошков — сказывается влияние пластификатора. Поэтому многие методики измерения, разработанные для порошковых материалов, не годятся для пластифицированных порошков. Более того, пластифицированный материал часто удобнее характеризовать совсем другими параметрами. Например, для ППМ такое свойство, как текучесть, не может быть измерено по стандартной методике. В то же время, для пластифицированных порошков весьма полезной характеристикой оказывается предел текучести, так как они при приложении нагрузки приобретают некоторую прочность.

Теоретические построения неразрывно связаны со свойствами материалов. Формулы и уравнения содержат параметры, которые надо измерять экспериментально, иначе проведение численных расчетов окажется невоз-

возможным. Примером таких параметров могут служить коэффициенты и трения, вязкость, предел текучести и т.д.

Как указывалось выше, многие теоретики поступают не вполне корректно. Они получают решения уравнений, содержащие множество коэффициентов, и на этом останавливаются, оставляя проблемы измерения этих коэффициентов экспериментаторам. Очень часто методики необходимых измерений отсутствуют вообще. В итоге невозможно воспользоваться результатами теоретических исследований, так как нельзя провести вычисления.

В этом разделе дан обзор известных методик, применяемых при исследовании физических и технологических свойств пластифицированных порошковых материалов. Кроме того, способы измерения некоторых коэффициентов, входящих в расчетные соотношения, приведены в шестой главе. В результате суммарной информации будет достаточно, чтобы измерить все необходимые характеристики материала и провести теоретические и проектно-конструкторские расчеты.

2.3.1. Триботехнические характеристики

Под триботехническими характеристиками понимают коэффициенты, описывающие внешнее и внутреннее трение. К ним относятся коэффициент сцепления, коэффициенты внутреннего и внешнего трения (скольжения и покоя), а также коэффициенты, используемые в более сложных нелинейных законах трения.

Рассчитать теоретически коэффициенты трения порошкового материала довольно сложно [253]. Связано это с сильной их зависимостью от удельного давления. Для коэффициента внешнего трения получено расчетное соотношение [254]

$$\mu = \frac{\tau_0 \xi}{p} + \beta + \operatorname{tg} \theta \quad [2.8]$$

где τ_0 — прочность на срез молекулярных связей; p — удельное давление прессования; ξ — относительная фактическая площадь контактов порошка

с шероховатой поверхностью; β — пьезокоэффициент, характеризующий увеличение прочности на срез молекулярных связей с увеличением нормального давления; θ — параметр, характеризующий геометрию поверхности трения.

Расчеты, произведенные по этой формуле, хорошо совпали с экспериментальными результатами [255]. Для пластифицированных порошковых материалов ни расчетов, ни экспериментальных исследований не проводилось. Так как при выводе соотношения (2.8) смазывающий эффект пластификатора не учитывался, вряд ли оно пригодно для описания поведения таких материалов.

Обычно триботехнические характеристики порошковых материалов измеряют на трибометрах с цилиндрическим пуансоном [122, 256]. Порошок сжимают в прессформе, один из пуансонов которой может вращаться (для этого используют опорный подшипник). Измеряя вращающий момент, необходимый для проворота пуансона, вычисляют коэффициенты внешнего и внутреннего трения. В последнем случае используют пуансоны с рифленным торцом.

На таких приборах можно исследовать и пластифицированные порошки, если позаботиться о герметичности посадок. Измерения, проведенные на разных металлических порошках, пластифицированных парафином [257], дали следующие результаты. Коэффициенты внешнего и внутреннего трения ППМ сильно зависят от приложенного давления во всем диапазоне исследованных давлений (0...100 МПа); нет такого участка на кривой $f = f(\sigma)$, где этой зависимостью можно было бы пренебречь. Количественно коэффициенты трения пластифицированных порошков при очень малых давлениях больше, а при больших давлениях значительно меньше, чем у порошков без наполнителей.

Недостатком трибометра с цилиндрическим пуансоном является неравномерность распределения скоростей скольжения в радиальном направлении: на оси прибора она равна нулю, а на краях пуансона имеет максимальное значение. При вычислении коэффициентов трения проводят инте-

гирование по радиусу пуансона, что ведет к осреднению скоростей скольжения. Такой прием дает методическую погрешность измерения, особенно заметную при исследовании сил трения покоя.

Избавиться от этого недостатка можно с помощью кольцевого трибометра [258 – 259]. В нем рабочая зона представляет собой кольцо, что позволяет исключить влияние центральной части. Неравномерность скоростей остается, но она значительно уменьшается. Однако такое устройство не нашло широкого применения из-за сложности изготовления и эксплуатации. Для успешной работы с прибором необходима огромная точность изготовления (соосность поверхностей, точность форм и посадок). Малейшее отклонение формы кольцевых пуансона или матрицы приводит к появлению дополнительных сил трения на боковых поверхностях этих элементов, что искажает полученный результат.

Трибометры используют в основном для измерения коэффициентов трения. Коэффициенты сцепления, требующие измерений при очень малых давлениях, удобнее исследовать на приборе с параллельными пластинами, одна из которых подвижна [260]. Такие устройства часто используются для изучения особенностей пластической деформации. Замена гладких пластин на пластины с рифлеными поверхностями позволяет исследовать также внутреннее трение в порошковом материале.

Сильная зависимость коэффициентов трения от напряжений не позволяет проводить математические преобразования: операции аналитического интегрирования и дифференцирования возможны лишь для инвариантных к напряжениям триботехнических характеристик. Поиск закона трения, использующего такие характеристики, сделан в работах [261 – 262].

Предложено соотношение, связывающее касательные напряжения τ на поверхности трения с нормальными напряжениями σ .

$$\tau = a + b\sigma + c\sigma^2 \quad [2.9]$$

где a , b и c — инвариантные к напряжениям коэффициенты.

Показано, что такой закон трения одинаково хорошо описывает поведение как пластифицированных, так и обычных порошковых материалов. Разработана и методика измерения триботехнических характеристик a , b и c [263].

Для расчетов процессов экструзии ППМ лучше всего подходит способ измерения триботехнических характеристик [264]. В этом способе измерения производятся косвенным методом непосредственно в процессе выдавливания материала через коническую матрицу, что позволяет смоделировать напряженно-деформированное состояние, присущее процессу экструзии. Дополнительно возможно определение предела текучести материала.

2.3.2. Боковое давление

Как известно, порошковый материал передает приложенное к нему давление в разных направлениях по-разному. Так, при одноосном нагружении порошка в прессформе, давление на боковой поверхности формы будет меньше, чем под пуансоном. Количественно это явление характеризует коэффициент бокового давления.

Коэффициент бокового давления представляет собой отношение наименьшего и наибольшего главных нормальных напряжений (σ_{33}/σ_{11}) при одноосном прессовании материала. Он широко используется в технических расчетах на прочность и износостойкость формирующего инструмента, а также при анализе напряженно-деформированного состояния, возникающего в порошковых материалах при деформации.

Значение коэффициента бокового давления даже для непластифицированных порошков достаточно велико и обычно составляет 0,2 – 0,5; причем чем пластичнее материал, тем это значение больше: для вольфрама 0,2, для железа 0,39, для олова 0,49, для меди 0,54, для серебра 0,72, для свинца 0,79. Для высокопластифицированных композиций этот коэффициент может достигать значений, близких к единице [73].

Коэффициент бокового давления растет с увеличением плотности прессовки [265], но для разных материалов по-разному: чем пластичнее металл, тем в большей степени его величина связана с давлением прессования. Объясняется это относительным уменьшением сопротивляемости межчастичных контактов сдвигу, что наблюдается с возрастанием как давления прессования, так и пластичности прессуемого материала. Для малопластичных металлов (например, вольфрама) и хрупких материалов (например, карбида вольфрама) значение коэффициента бокового давления растет в области низких давлений прессования, а выше 200 МПа остается постоянным.

Экструзия сопровождается интенсивным трением материала о поверхность инструмента. Теоретический анализ процесса деформации порошка требует задания граничных условий, представляющих собой касательные напряжения, действующие на боковой поверхности материала. Эти напряжения определяются силами трения, зависящими от коэффициента трения порошка об инструмент и коэффициента бокового давления.

Попытки вычислить коэффициент бокового давления исходя из физических свойств порошка и технологических параметров процесса уплотнения [266] представляют чисто теоретический интерес, так как сводят проблему измерения одного параметра к ряду других.

Измеряют коэффициент бокового давления с использованием тензометрии [122]. Такой подход имеет существенные недостатки, главные из которых — низкая точность измерения и плохая воспроизводимость результатов. Связано это со сложностью тарирования тензодатчика и юстировки передающего усилия штифта. Малейшее смещение последнего приводит к изменению показаний. Можно сказать, что положение передающего штифта сильнее влияет на результаты измерений, чем сама величина бокового давления. Точно установить штифт на одном уровне с поверхностью прессформы практически невозможно; к тому же при приложении нагрузки наблюдаются неконтролируемые перемещения штифта, приводящие, мягко говоря, к потере точности измерений.

Если для непластифицированных порошков существует широкий интервал давлений, в котором произведение коэффициентов трения и бокового давления остается практически постоянным [256], то для пластифицированных порошковых материалов такого интервала не существует [73]. Поэтому задать граничные условия, используя относительную стабильность такого произведения коэффициентов, также невозможно.

Таким образом, необходима простая и надежная методика измерения коэффициентов бокового давления. Она описана в шестой главе.

2.3.3. Пластичность и структурная прочность

Механические свойства материалов — прочность, пластичность, вязкость — определяют их способность сопротивляться деформации и разрушению под воздействием внешних сил. Механические свойства зависят не только от состава, но также от структуры материала. Если для литых металлов под структурой понимают форму, размер и характер взаимного расположения фаз, то для порошковых тел на первое место выходят особенности их дисперсной структуры. Структура сыпучего материала зависит от размера и формы его частиц, а также от добавок, вводимых в материал для улучшения технологических свойств.

Стандартные методики определения критериев прочности и пластичности применимы лишь для спеченных порошковых материалов, и то с некоторыми оговорками. Разработаны также нестандартные устройства и методики исследования механических свойств спеченных материалов [267], учитывающие особенности таких тел.

В механике грунтов для их характеристики издавна используют пенетрометры — приборы, позволяющие по глубине проникновения стального конуса в грунт судить о его структурной прочности. Аналогичные исследования оказываются полезными и для порошковых материалов.

Структурную характеристику сыпуче-пластичных тел изучает физико-химическая механика [268 – 269]. Появилась она задолго до порошковой металлургии, однако ее методы как нельзя лучше подходят для характеристики порошковых структур, в том числе и пластифицированных. Наиболее

полезной характеристикой оказалась пластическая прочность структуры, впервые введенная в употребление академиком П.А. Ребиндером [270]. Само название этой величины революционно: в классической механике твердых тел пластичность и прочность являются понятиями-антагонистами.

По Ребиндеру пластическая прочность структуры представляет собой максимальное из возможных касательных напряжений в материале. Для пластифицированных порошков она зависит от состава пластификатора и его концентрации в смеси, способа пластификации порошка и его влажности [175]. Измеряют эту технологическую характеристику методом погружения конуса в исследуемый материал на коническом пластомере [271]:

$$\tau_m = k_\alpha \frac{P}{H^2} \quad (2.10)$$

где P — нагрузка, приложенная к конусу; H — глубина погружения конуса; α — угол при вершине конуса; k_α — постоянная конуса.

Пластическая прочность структуры оказалась полезной характеристикой при исследовании пластифицированных порошков. Она измерена для многих материалов, как со скелетной фазой (порошки с пластичными добавками), так и без нее [272]. Некоторые исследователи отмечают [175], что эта характеристика *равна* сопротивлению материала пластической деформации.

Упомянутая методика позволяет измерять прочность структуры лишь на свободной поверхности. Подстановка этих значений в формулы, описывающие какой либо процесс деформации порошкового материала, будет приводить к ошибкам, так как в реальных устройствах материал обычно находится под нагрузкой. Этот недостаток устранен в устройстве [273], позволяющем создавать в исследуемом материале практически любое напряженно-деформированное состояние. Более подробно методика и результаты ее применения описаны в шестой главе.

2.3.4. Реологические характеристики

Реологические свойства чистых пластификаторов неплохо изучены [274]. Исследованы водные растворы крахмала, карбоксилметилцеллюлозы,

этансульфанатцеллюлозы и поливинилового спирта; бензиновый раствор синтетического каучука и восьмипроцентный раствор полиакриламида. Сделан вывод: реологические свойства таких материалов лучше всего описывают модели Максвелла-Шведова и Кельвина. Реология пластифицированных порошков не исследовалась.

Основные реологические характеристики пластификаторов могут быть найдены и расчетным путем [275]. Получены соотношения для расчета эластичности, пластичности по Воларовичу и периода истинной релаксации. Реологические характеристики пластифицированных порошков не рассчитаны. Течение композиции, состоящей из жесткой скелетной фазы и пластичного наполнителя, вряд ли может быть описано теоретически с приемлемой точностью.

Реология смеси, состоящей из порошка дисилицида молибдена (90...96%) и бентонитовой глины исследована в работе [165] с помощью капиллярного вискозиметра. Отмечается, что такая смесь хорошо подчиняется закону Бингама-Шведова

$$p = p_0 + \eta \frac{\partial V}{\partial r} = 4 \frac{l}{d} p_k + \eta \frac{\partial V}{\partial r} \quad [2.11]$$

где p и p_0 — действующее и предельное давление, при котором возникает движение смеси; η — пластическая вязкость; $\partial V / \partial r$ — градиент скорости в цилиндрическом капилляре длиной l и диаметром d ; p_k — условный динамический предел текучести.

Таблица 2.4 содержит результаты измерения реологических характеристик η и p_k .

Таблица 2.4

Вязкость и предел текучести порошка дисилицида молибдена,
пластифицированного бентонитовой глиной

MoSi ₂ , %	96	94	92	90
Глина, %	4	6	8	10
η , кНс/м ²	9	26	30	32
p_k , кН/м ²	110	440	2000	3800

Исследована также реология порошкового материала [68], пластифицированного крахмальным клейстером. Для измерения предела текучести и бингамовской вязкости использовался капиллярный вискозиметр, достоинствами которого являются простота конструкции и удобство моделирования процесса экструзии. Установлено, что при содержании крахмала 2.65% и влажности смеси 0.8% течение материала через цилиндрический капилляр хорошо описывается уравнением Бингама-Шведова, интегральная форма которого в данном случае имеет вид

$$\eta = \frac{\pi r^4}{8lq} \left(p - \frac{4}{3} p_0 + \frac{p_0^4}{3p^3} \right) \quad [2.12]$$

где r и l — радиус и длина капилляра соответственно; q — секундный расход; p и p_0 — действующее и предельное напряжения соответственно.

При больших давлениях третьим членом в правой части уравнения можно пренебречь, тогда оно становится линейным. В этом случае предел текучести определяется из простого соотношения

$$\tau_0 = \frac{p_0 r}{2l} \quad [2.13]$$

К сожалению, течение смесей с пластификаторами на органической основе не описывается столь простым реологическим законом. Однако при повышенных температурах, когда термопластичный пластификатор становится достаточно жидким, такая методика исследования реологических характеристик может оказаться полезной и для ППМ.

ГЛАВА 3. ТЕОРИЯ ЭКСТРУЗИИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс деформации материала в экструдерах, можно разделить на две фазы: предварительное его уплотнение и выдавливание через коническую матрицу. Эти фазы технологически могут быть реализованы как раздельно, так и совместно. В первом случае сначала прессуют заготовки, которые впоследствии подвергают экструзии. Во втором случае формуют непосредственно порошковый материал.

Свойства и поведение высокопластифицированного порошкового материала, подвергаемого экструзии, сильно зависят от его плотности. Поэтому целесообразно каждую фазу деформации рассматривать раздельно, независимо от того, как они взаимосвязаны в конкретной технологии. Если уплотнение и экструзия производятся совместно, то уравнения, описывающие их деформацию, будут иметь общее граничное условие. Например, напряженное состояние в материале, выходящем из канала шнека, является граничным условием при исследовании процесса выдавливания его через коническую матрицу.

Анализ процесса экструзии проведен в два этапа. На первом этапе рассмотрен процесс уплотнения материала, предшествующий его выдавливанию. Эта часть анализа для каждого метода экструзии имеет свои особенности. Так, при мундштучном прессовании уплотнение материала осуществляется в прессформе, при шнековом формовании — в канале шнека.. На втором этапе рассмотрена экструзия уплотненного до компактного состояния материала. Эта часть анализа является общей для всех способов и устройств, реализующих экструзию.

3.1. ДОПУЩЕНИЯ И ОГРАНИЧЕНИЯ

- 1. Пластифицированный порошковый материал может быть уплотнен до компактного состояния без пластической деформации его частиц.**

Другими словами, пластификатора в порошке должно быть достаточно много. Выше приведены соображения, показывающие, что в противном случае экструзия пластифицированного материала невозможна. Количество пластификатора, обеспечивающее выполнение этого условия, может быть найдено из соотношения (2.7).

Деформация материала осуществляется за счет течения пластичной фазы. Пластификатор, заполняющий межчастичное пространство, препятствует образованию «скелета» из твердых частиц. Динамический свод ни при каких условиях не образуется, арочный эффект отсутствует. Отсутствие пластической деформации частиц порошка предохраняет металлические фазы от упрочнения.

2. Связь между касательными и нормальными напряжениями на поверхности трения задается соотношением

$$\tau = a + b\sigma - c\sigma^2 \quad (3.1)$$

если деформация сопровождается уплотнением материала и соотношением

$$\tau = f\sigma \quad (3.2)$$

если деформируется спрессованный до компактного состояния материал.

В этих выражениях коэффициенты a , b , c и f не зависят от действующих напряжений. Это позволяет проводить аналитические преобразования, вынося их за знаки интегрирования и дифференцирования. Соотношения (3.1) – (3.2) прошли хорошую экспериментальную проверку [261 – 264]. Методика их измерения описана в шестой главе.

3. Инерционные силы пренебрежимо малы.

Это допущение позволяет анализировать плоские модели, получающиеся разверткой некоторых сложных пространственных поверхностей (например, поверхностей винтового канала). Его надо применять с большой осторожностью в зоне загрузки материала, где инерционные силы и сила тяжести создают условия, принимаемые в качестве граничных при решении краевых задач.

3.2. УПЛОТНЕНИЕ ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ПОРОШКА

Особенности процесса уплотнения пластифицированного порошка зависят как от выбранного способа экструзии, так и от конкретного устройства, его реализующего. Уплотнение всегда осуществляется в замкнутой полости, ограниченной, в общем случае, как подвижными, так и неподвижными поверхностями. Геометрия этой полости в совокупности с наличием подвижных и неподвижных поверхностей определяют метод формования.

Все устройства для непрерывной экструзии материалов имеют канал, соединяющий загрузочный бункер с конической матрицей. Такой канал необходим для транспортировки и уплотнения порошкового материала. Форма канала, наличие подвижных и неподвижных поверхностей, его образующих, являются удобными параметрами при классификации экструдеров.

В дисковых экструдерах канал может быть расположен на цилиндрической или торцовой поверхности диска. Канал на торцовой поверхности свернут по спирали, а на цилиндрической поверхности он может быть извилистым [96] или кольцевым. Неподвижная поверхность канала принадлежит обычно прижимному башмаку, хотя и здесь возможны варианты. В шнековых прессах канал свернут по винтовой линии и расположен на внешней или внутренней поверхности цилиндрического шнека. Используют также конические и даже сферические [103] шнеки. Часто каналом снабжены разнообразные по форме наконечники шнеков.

Несмотря на многообразие каналов, после их развертки остаются только три существенных признака: длина, профиль и наличие подвижных и неподвижных поверхностей. На подвижных поверхностях действуют активные силы трения, способствующие перемещению материала, а неподвижные поверхности тормозят его, создавая необходимый для уплотнения подпор.

Так как процессы деформации материала, рассматриваемые в этом разделе, сопровождаются изменением плотности, в качестве граничного условия выбран параболический закон трения (3.1).

3.2.1. Уплотнение материала в канале

Расчетная схема процесса уплотнения материала в канале изображена на Рис. 3.1. Канал имеет постоянное по длине сечение и, в соответствии со сделанными допущениями, считается прямолинейным. Порошковый материал перемещается вдоль канала. Движущая сила возникает в результате трения о подвижную поверхность и давления, действующего на входе в канал (если оно есть). Эта поверхность может принадлежать шнеку, диску экструдера или любой другой подвижной детали.

Ось z направлена от выхода канала к его входу, то есть от матрицы к бункеру. Начало отсчета совпадает с границей раздела между каналом и матрицей, давление в этой точке p_0 . Как будет показано, это давление определяется только свойствами материала и геометрией матрицы. Ось x направлена по ширине канала, а ось y — по его высоте.

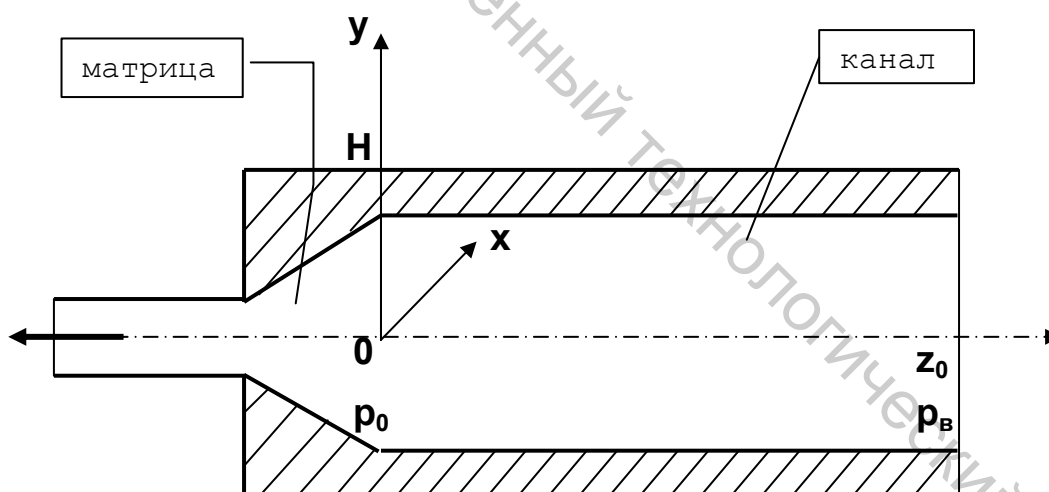


Рис. 3.1. Схема процесса уплотнения материала в канале

По мере продвижения материала от бункера к матрице плотность его возрастает. Поэтому касательные напряжения, действующие на границах канала, определяются законом трения (3.1):(3.2)

$$\tau_1 = a_1 + b_1 p + c_1 p^2; \quad \tau_0 = a_0 + b_0 + c_0 p^2 \quad (3.3)$$

где τ_1 и τ_0 — касательные напряжения на подвижной и неподвижной поверхностях канала соответственно; p — давление материала на стенки канала, являющееся функцией координаты z ; a_1 , b_1 , c_1 и a_0 , b_0 , c_0 —

инвариантные к напряжениям коэффициенты, характеризующие трение материала о подвижные и неподвижные поверхности канала соответственно.

Приращение силы трения dF_{mp} материала о стенки канала при увеличении координаты z на величину dz связано с приращением давления dp следующим соотношением:

$$dF_{mp} = -2Sdp = 2(\tau_1 l_1 - \tau_0 l_0)dz \quad [3.4]$$

где $2S$ — площадь поперечного сечения канала; $2l_1$ и $2l_0$ — части профиля, принадлежащие подвижной и неподвижной поверхностям канала соответственно.

Таким образом, задача о нахождении распределения давления вдоль канала сводится к решению обыкновенного дифференциального уравнения с разделяющимися переменными

$$dp = (a + bp + cp^2)dz \quad [3.5]$$

где безразмерные коэффициенты a , b и c определяются внешним трением и геометрией канала:

$$a = \frac{1}{S}(a_0 l_0 - a_1 l_1); \quad b = \frac{1}{S}(b_0 l_0 - b_1 l_1); \quad c = \frac{1}{S}(c_0 l_0 - c_1 l_1) \quad [3.6]$$

Решение уравнения (3.5) имеет вид

$$z = d \ln \frac{p-e}{f-p} + A \quad [3.7]$$

где

$$d = \frac{1}{2c} \sqrt{\frac{b^2}{4c^2} - \frac{a}{c}} \quad [3.8]$$

а e и f — корни квадратного уравнения $a + bp + cp^2 = 0$:

$$e = -\sqrt{\frac{b^2}{4c^2} - \frac{a}{c}} - \frac{b}{2c}; \quad f = \sqrt{\frac{b^2}{4c^2} - \frac{a}{c}} - \frac{b}{2c} \quad [3.9]$$

Постоянная интегрирования A находится из граничного условия $p(0) = p_0$

$$A = d \ln \frac{p_0 - e}{f - p_0} \quad (3.10)$$

Таким образом, распределение давления по длине канала имеет вид:

$$z = d \ln \frac{(p_0 - e)(f - p)}{(f - p_0)(p - e)} \quad (3.11)$$

Найденное соотношение позволяет определить важную характеристику любого устройства для непрерывной экструзии — длину канала z_0 , необходимую для создания давления прессования p_0 . Эта длина находится при подстановке в (3.11) граничного условия

$$p(z_0) = p_\varepsilon \quad (3.12)$$

где p_ε — давление на выходе из канала (канал направлен от матрицы к бункеру). Если дополнительное давление не приложено, то оно создается только силой тяжести

$$p_\varepsilon = \rho g H \quad (3.13)$$

где ρ — плотность свободнонасыпанного материала; g — ускорение свободного падения; H — глубина канала.

Итак, длина канала, необходимая для создания в матрице давления p_0

$$z_0 = d \ln \frac{(p_0 - e)(f - \rho g H)}{(f - p_0)(\rho g H - e)} \quad (3.14)$$

Формула (3.11) может быть использована при расчете любых устройств, имеющих канал: шнековых и дисковых экструдеров, специальных машин для непрерывного прессования. Она успешно прошла экспериментальную проверку и неоднократно применялась при проектировании экструзионного оборудования. Подробнее эта часть анализа описана в статьях [276 – 277].

Найденная зависимость (3.11) давления от координаты позволяет определить усредненную по сечению канала плотность материала в любой его точке. Для этого необходимо взять какое-либо подходящее уравнение прессования (зависимость плотности материала от давления) и подставить в него плотность. Однако для поставленной цели — составления методики проектно-конструкторских расчетов экструзионного оборудования — этого не потребуется.

Полученные соотношения не позволяют определить распределение напряжений и плотностей в поперечном сечении канала. Эта задача решается ниже.

3.2.2. Распределение напряжений в поперечном сечении канала

Здесь найдено распределение напряжений в поперечном сечении материала, находящегося в канале устройства для непрерывной экструзии. Решение этой задачи позволит, в частности, провести расчет и оптимизацию профилей каналов для формования различных материалов..

На Рис. 3.2 изображена расчетная схема. Линия HAx_0 — половина профиля подвижной поверхности канала; отрезок Ox_0 — половина ширины канала по его неподвижной поверхности; $x(H)$ — половина ширины канала по его внутренней (подвижной) поверхности; H — глубина канала; τ_0 и τ_1 — касательные напряжения на неподвижной и подвижной поверхностях канала соответственно; $A(x,y)$ — произвольно выбранная точка на подвижной поверхности с координатами x и y ; $\tau(y)$ — касательные напряжения на площадке, параллельной неподвижной поверхности и проходящей через точку A .

На элементарный объем материала толщиной dz со стороны неподвижной поверхности действует сила трения, направленная противоположно перемещению материала и тормозящая его движение

$$dF_{mp0} = \tau_0 x_0 dz \quad [3.15]$$

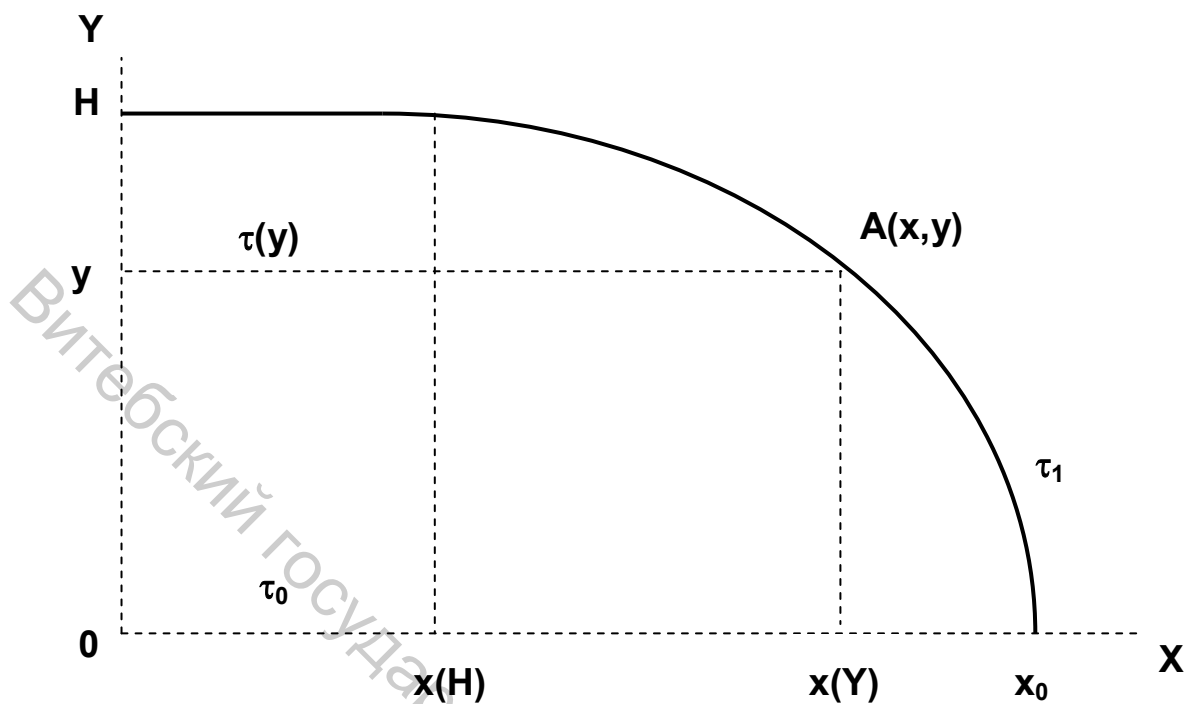


Рис. 3.2. Расчетная схема для расчета профиля канала

Эта сила уравнивается силой трения материала о подвижную поверхность, действующей в направлении перемещения порошка и способствующей его движению

$$dF_{мп1} = -\tau_1 l dz \quad [3.16]$$

где l — длина кривой HAx_0 .

Сила трения порошка о подвижную поверхность должна быть больше, чем о неподвижную поверхность (иначе перемещения материала не будет), то есть

$$\tau_1 l > \tau_0 x_0 \quad [3.17]$$

Силы трения уравновешены:

$$\tau_0 x_0 = \tau_1 l \quad [3.18]$$

На элементарный объем материала, ограниченный поверхностью, проходящей через произвольно выбранную точку A , частью подвижной по-

верхности Ax_0 и неподвижной поверхностью Ox_0 действуют следующие силы трения:

- со стороны материала, ограниченного объемом yHA в направлении движения — $\tau(y)x(y)dz$
- со стороны подвижной поверхности Ax_0 с длиной профиля $l(y)$, в направлении движения — $\tau_1 l(y)dz$
- сила трения о неподвижную поверхность, направленная против движения — $\tau_0 x_0 dz$

Из условия равновесия рассматриваемого элемента следует

$$\tau_0 x_0 = \tau(y)x(y) + \tau_1 l(y) \quad [3.19]$$

С учетом (3.18) уравнение (3.19) приобретает вид

$$\tau_0 x_0 = \tau(y)x(y) + \tau_0 x_0 \frac{l(y)}{l} \quad [3.20]$$

где

$$l(y) = \int_0^y \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2} dy; \quad l = \int_0^H \sqrt{1 + \left(\frac{dx}{dy}\right)^2} dy + x(H) \quad [3.21]$$

Таким образом, задача сведена к решению интегродифференциального уравнения (3.20) – (3.21) относительно неизвестной функции $x(y)$ в зависимости от заданного распределения напряжений по глубине канала $\tau(y)$. Ниже это уравнение будет решено численно, однако для некоторых простых распределений $\tau(y)$ удастся найти и аналитическое решение.

Так, важным для практики является случай, когда касательные напряжения остаются постоянными по глубине канала:

$$\tau(y) = \tau_0 \quad [3.22]$$

Такое распределение напряжений позволяет получать изделия с равномерной плотностью по сечению. В этом случае уравнение (3.20) приобретает простой вид

$$x_0 = x(y) + x_0 \frac{l(y)}{l} \quad (3.23)$$

Решением этого уравнения является функция

$$x(y) = x_0 \left(1 + \frac{y}{H} \right) \quad (3.24)$$

то есть график зависимости $x(y)$ есть прямая линия, проходящая через точки $(0, H)$ и $(x_0, 0)$.

Действительно, в этом случае

$$\frac{dx}{dy} = -\frac{x_0}{H}; \quad x(H) = 0; \quad l(y) = \sqrt{1 + \frac{x_0^2}{H^2}} y; \quad l = \sqrt{1 + \frac{x_0^2}{H^2}} H \quad (3.25)$$

и подстановка (3.24) и (3.25) в (3.23) приводит к тождеству.

Таким образом, треугольная форма канала позволяет получать изделий с равномерным распределением плотности по сечению.

3.2.3. Уплотнение пластифицированного порошка в прессформе

При мундштучном прессовании порошок сначала уплотняется в контейнере пуансоном, а затем выдавливается через коническую матрицу. Контейнер представляет собой цилиндрическую прессформу диаметром $2R$ и длиной L . Активные силы трения, действующие между материалом и поверхностью канала, отсутствуют, так как контейнер неподвижен. Поэтому можно написать

$$l_2 = 0; \quad l_1 = \pi R; \quad 2S = \pi R^2 \quad (3.26)$$

Тогда соотношения (3.6) примут вид

$$a = \frac{2a_0 l_0}{\pi R^2}; \quad b = \frac{2b_0 l_0}{\pi R^2}; \quad c = \frac{2c_0 l_0}{\pi R^2} \quad [3.27]$$

а коэффициенты (3.8) – (3.9) превратятся в

$$d = \frac{\pi R^2}{4c_0 l_0} \sqrt{\frac{b_0^2}{4c_0^2} - \frac{a_0}{c_0}} \quad [3.28]$$

$$e = -\sqrt{\frac{b_0^2}{4c_0^2} - \frac{a_0}{c_0}} - \frac{b_0}{2c_0}; \quad f = \sqrt{\frac{b_0^2}{4c_0^2} - \frac{a_0}{c_0}} - \frac{b_0}{2c_0} \quad [3.29]$$

Граничное условие, определяющее постоянную интегрирования (3.10), остается тем же: $p(0)=p_0$; соответственно сохраняется и характер распределения давления (3.11) по высоте контейнера. Давление истечения материала через очко матрицы p_0 зависит только от геометрии формирующего инструмента и технологических свойств материала.

Выражение (3.11) позволяет определить усилие, которое необходимо приложить к пуансону, чтобы обеспечить выдавливание материала (экструзия начинается, когда давление в матрице достигает величины p_0). Для этого необходимо подставить в него вместо z высоту L_0 , занимаемую материалом в контейнере к моменту начала экструзии и решить получающееся уравнение относительно давления под пуансоном p . Решение уравнения имеет вид

$$p = \frac{f + ke}{1 + k} \quad [3.30]$$

где

$$k = \frac{f - p_0}{p_0 - e} \exp\left\{\frac{L_0}{d}\right\} \quad [3.31]$$

Теперь можно провести все расчеты по проектированию установки для мундштучного формования: определить максимальное усилие прессования и выбрать пресс, найти усилие, разрывающее контейнер в радиальном направлении и рассчитать толщину его стенки, определить геометрию матрицы и т.д.

3.3. ЭКСТРУЗИЯ УПЛОТНЕННОГО МАТЕРИАЛА

В этом разделе теоретически исследована экструзия изотропного и анизотропного (композиционного) материалов. Обе задачи заключаются в анализе процесса деформации несжимаемых сред в конической матрице.

Выше отмечалось, что экструзии подвергают материалы, предварительно уплотненные до компактного состояния. Все межчастичное пространство в таком материале занимает пластификатор, газовая фаза отсутствует. Контакт между твердыми частицами мало, динамический свод не образуется, арочный эффект не проявляется, пластической деформации и связанного с ней упрочнения нет. Он обладает высокой пластичностью, зависящей главным образом от свойств пластификатора. Закон трения задается соотношением (3.2).

3.3.1. Выдавливание изотропных смесей

Здесь рассмотрен процесс деформации порошкового материала при выдавливании его через коническую матрицу. Схематически зона деформации изображена на Рис. 3.3.

Пластифицированный порошковый материал выдавливается через зазор, образованный внутренней поверхностью матрицы 1 и наружной поверхностью дорна 2. Матрица имеет коническую часть длиной z_1 и цилиндрическую (калибрующую) часть длиной $z_2 - z_1$. Радиусы входного и выходного сечений матрицы r_2 и r_1 соответственно. Угол наклона образующей конической части матрицы α . Дорн, необходимый для формования трубчатых изделий, представляет собой цилиндрический стержень радиусом r_0 . Дорн не закреплен и перемещается в процессе экструзии вместе с материалом. При формовании изделий трубчатой формы после выдавливания дорн

Рис. 3.3. Схема



В цилиндрической части матрицы материал находится в состоянии упругой разгрузки с элементами пластического течения, то есть в критическом состоянии. Связано это с большими упругими деформациями в радиальном направлении, возникающими в результате обжатия в конической части. Поэтому для цилиндрической части

$$\sigma_r > \sigma_z \quad (3.32)$$

что особенно очевидно в выходном сечении ($z = z_2$), где $\sigma_z = 0$, а $\sigma_r > 0$.

Соотношение (3.32) справедливо и для конической части, так как там происходит обжатие в радиальном направлении, поэтому условие пластичности для всей зоны формования имеет вид

$$\sigma_r - \sigma_z = \sigma_s \quad (3.33)$$

Уравнение равновесия сил, действующих на кольцевой элемент толщиной dz :

$$\sigma_z(r^2 - r_0^2) - (\sigma_z + d\sigma_z)[(r - \operatorname{tg} \alpha dz)^2 - r_0^2] + (\tau - \sigma \operatorname{tg} \alpha)(2r - \operatorname{tg} \alpha dz)dz = 0 \quad (3.34)$$

или, после удаления бесконечно малых высших порядков

$$(r_0^2 - r^2) \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + 2r\sigma_z \operatorname{tg} \alpha - 2r(\sigma \operatorname{tg} \alpha + \tau) = 0 \quad (3.35)$$

Подстановка в это выражение закона трения (3.2) дает

$$\frac{r_0^2 - r^2}{2r} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \sigma_z \operatorname{tg} \alpha - \sigma(\operatorname{tg} \alpha + f) = 0 \quad (3.36)$$

Так как

$$\sigma_r = (\cos \alpha - \tau \sin \alpha) / \cos \alpha = \sigma(1 - f \operatorname{tg} \alpha) \quad (3.37)$$

то, с учетом условия пластичности (3.33), из выражения (3.36) получается

$$\frac{r_0^2 - r^2}{2r} \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + (\operatorname{tg} \alpha - k)\sigma_z - k\sigma_s = 0 \quad (3.38)$$

$$\text{где } k = \frac{f + \operatorname{tg} \alpha}{1 - f \operatorname{tg} \alpha} \quad (3.39)$$

После разделения переменных и подстановки $r = r_2 - z \operatorname{tg} \alpha$ получается дифференциальное уравнение

$$\frac{d\sigma_z}{(k - \operatorname{tg} \alpha)\sigma_z + k\sigma_s} = \frac{2(r^2 - z \operatorname{tg} \alpha)}{r_0^2 - (r^2 - z \operatorname{tg} \alpha)^2} dz \quad (3.40)$$

интегрирование которого дает

$$-\ln|(k - \operatorname{tg} \alpha)\sigma_z + k\sigma_s| = (1 - k \operatorname{ctg} \alpha) \ln|(r_2 - z \operatorname{tg} \alpha)^2 - r_0^2| + A \quad (3.41)$$

Постоянная интегрирования A определяется из граничного условия

$$\sigma_z(z_1) = \sigma_1 \quad (3.42)$$

где σ_1 — осевое напряжение в выходном сечении конической части матрицы.

Так как под знаками абсолютной величины находятся неотрицательные выражения, решение (3.41) можно упростить:

$$(k - \operatorname{tg} \alpha)\sigma_z + k\sigma_s = e^A [(r_2 - z \operatorname{tg} \alpha)^2 - r_0^2]^n \quad (3.43)$$

где

$$n = k \operatorname{ctg} \alpha - 1 = \frac{f}{\operatorname{tg} \alpha} \frac{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}{1 - f \operatorname{tg} \alpha} \quad (3.44)$$

Подставляя в (3.43) граничное условие (3.42), находим постоянную интегрирования

$$e^A = [(k - \operatorname{tg} \alpha)\sigma_1 + k\sigma_s] [(r_2 - z_1 \operatorname{tg} \alpha)^2 - r_0^2]^{-n} \quad (3.45)$$

Подстановка (3.45) в (3.43) после преобразований позволяет найти распределение напряжений вдоль конической части матрицы:

$$\sigma_z = (\sigma_1 + m\sigma_s) \left(\frac{F}{F_1}\right)^n - m\sigma_s \quad (3.46)$$

где F и F_1 — площади текущего и выходного сечений конической части матрицы соответственно

$$m = \frac{k}{k - \operatorname{tg} \alpha} \frac{f + \operatorname{tg} \alpha}{f + \operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha(1 - f \operatorname{tg} \alpha)} = \frac{1}{f} \frac{f + \operatorname{tg} \alpha}{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha} \quad (3.47)$$

Найдено распределение напряжений в конической части матрицы. Так как зона формования всегда заканчивается калибрующим участком цилиндрической формы, то решение задачи было бы не полным без анализа движения материала на этом участке.

Напряжения в калибрующей части матрицы находятся подстановкой в уравнение (3.36) значений $\alpha = 0$ и $r = r_1$:

$$\frac{r_1^2 - r_0^2}{2r_1} \frac{d\sigma_z}{dz} + f\sigma = 0 \quad (3.48)$$

Подстановка $\sigma_r = \sigma$ и условие пластичности (3.33) позволяют получить обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися производными

$$\frac{d\sigma_z}{\sigma_z + \sigma_s} = \frac{2fr_1 dz}{r_1^2 - r_0^2} \quad (3.49)$$

решение которого при граничном условии

$$\sigma_z(z_2) = 0 \quad (3.50)$$

имеет вид

$$\sigma_z = \sigma_s [e^{p(z_2 - z)} - 1] \quad (3.51)$$

$$\text{где } p = \frac{2fr_1}{r_1^2 - r_0^2} \quad (3.52)$$

Напряжение на выходе конической части матрицы ($z = z_1$)

$$\sigma_1 = \sigma_s [e^{p(z_2 - z_1)} - 1] \quad (3.53)$$

При отсутствии внешнего трения выражением (3.46) воспользоваться невозможно. Однако предел, к которому стремится осевое напряжение при $f \rightarrow 0$, может быть легко определен:

$$\sigma_z = \sigma_s \ln \frac{F}{F_1} \quad (3.54)$$

то есть получается хорошо известное в теории ОМД выражение.

Подробнее с математическими выкладками и комментариями к ним можно ознакомиться в статьях [278 – 279].

3.3.2. Формование анизотропных материалов

Экструзия композиционных материалов, армированных дискретными волокнами, отличается рядом особенностей, не отраженных в предыду-

щем анализе. Выдавливание композитов может сопровождаться ориентацией волокон в направлении прессования. Высокая концентрация пластификатора в порошковых материалах, подвергаемых экструзии, облегчает взаимное смещение волокон и вытянутых частиц в процессе деформации. Эта свобода может быть использована для их ориентации в нужном направлении.

Цель настоящего анализа — получение математической модели движения удлинённой частицы в зоне формования при выдавливании пластифицированного порошкового материала через коническую матрицу.

Расчетная схема изображена на Рис. 3.4.

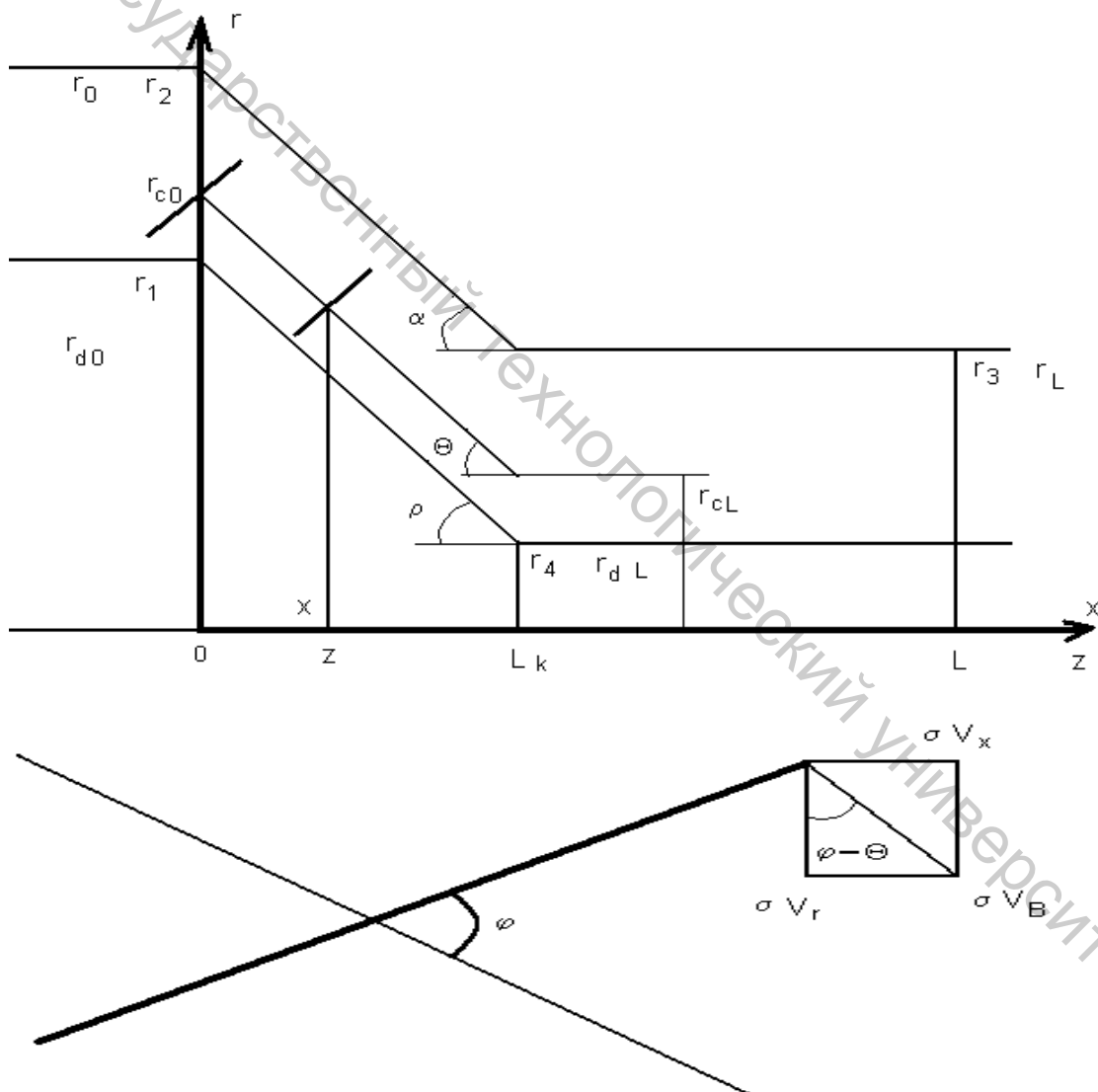


Рис. 1. Расчетная схема.

Рис. 3.4. Расчетная схема движения удлинённой частицы в очаге деформации

На схеме и в расчетах приняты следующие обозначения:

$2l$ — длина волокна;

r_1 и r_2 — внутренний и наружный радиусы шнека;

r_3 и r_4 — наружный и внутренний радиусы трубчатого изделия;

L — длина конической части матрицы;

α и ρ — половина угла конусности матрицы и наконечника шнека;

Θ — угол наклона линии тока материала к направлению выдавливания;

r_{c0} и r_{cL} — расстояние от центра волокна до оси на входе и выходе из конической части матрицы;

r_c — текущий радиус (расстояние от оси) центра волокна;

φ_0 — угол между проекцией волокна на плоскость чертежа и линией тока, проходящей через центр волокна, на входе в коническую часть матрицы;

φ — текущий угол наклона волокна;

x — координата центра волокна, отсчитываемая от входа в коническую зону.

Задача нахождения зависимости угла наклона волокна φ от геометрических параметров зоны формования решена при следующих допущениях.

1. Материал выдавливается шнеком в полость матрицы одновременно по всему кольцевому зазору (задача осесимметрична)
2. Через каждое сечение за одинаковые промежутки времени проходят одинаковые объемы материала
3. Материал движется таким образом, что выполняется гипотеза о плоских сечениях (проекции скоростей частиц, находящихся в одном поперечном сечении, на ось x , равны)
4. Линии тока представляют собой прямые линии, делящие в одинаковой пропорции входное и выходное сечения:

$$\frac{r_{c0} - r_1}{r_2 - r_1} = \frac{r_{cL} - r_4}{r_3 - r_4} \quad (3.55)$$

5. Движение волокон представляет собой поступательное перемещение вместе с центром масс и вращение относительно этого центра. Скорость центра волокна совпадает по величине и направлению со скоростями близлежащих частиц; проекции скоростей концов волокна на перпендикулярное ему направление равны проекциям скоростей соответствующих частиц на это же направление, т.е.

$$\begin{aligned} V_{HB} &= V_{XHP} \sin(\varphi - \Theta) + V_{rHP} \cos(\varphi - \Theta) \\ V_{KB} &= V_{XKP} \sin(\varphi - \Theta) + V_{rKP} \cos(\varphi - \Theta) \end{aligned} \quad (3.56)$$

где V_{HB} и V_{KB} — скорости начала и конца волокна в его вращении; V_{XHP} , V_{rHP} , V_{XKP} и V_{rKP} — проекции скоростей частиц, совпадающих с началом и концом волокна, на соответствующие оси.

6. Поперечные размеры волокна много меньше его длины, а длина много меньше толщины стенки изделия. Последнее требование позволяет заменить соответствующие разности дифференциалами и получить аналитическое решение уравнения движения волокна.

Учитывая выражение (3.55) и то, что $\operatorname{tg} \Theta = (r_{c0} - r_{cL})/L$, после сложных преобразований можно получить

$$\operatorname{tg} \Theta = \frac{\operatorname{tg} \rho \cdot (r_2 - r_{c0}) + \operatorname{tg} \alpha (r_{c0} - r_1)}{r_2 - r_1} \quad (3.57)$$

Тогда уравнение траектории движения центра масс волокна запишется следующим образом:

$$r_c = r_{c0} - x \cdot \operatorname{tg} \Theta \quad (3.58)$$

Условие несжимаемости позволяет записать

$$V_x S_x = V_{x0} S_0 \quad (3.59)$$

где V_{x0} и V_x — проекции на ось x скоростей частиц порошка; S_0 и S_x — площадь кольцевого зазора на входе и в сечении с координатой x .

Подстановка выражений этих площадей в (3.59) дает

$$V_x = V_{x0} \cdot \frac{r_2^2 - r_1^2}{(r_2 - x \operatorname{tg} \alpha)^2 - (r_1 - x \operatorname{tg} \rho)^2} \quad (3.60)$$

$$V_r = V_x \operatorname{tg} \Theta \quad (3.61)$$

При перемещении центра волокна на элементарную величину δx проекции скорости составят $V_x + \delta V_x$ и $V_r + \delta V_r$, где

$$\delta V_x = \frac{V_{x0} S_0}{S_x^2} \cdot \frac{\delta S_x}{\delta x} \delta x \quad (3.62)$$

$$\delta V_r = \operatorname{tg} \Theta \delta V_x + V_x \delta \operatorname{tg} \Theta \quad (3.63)$$

Дифференцирование дает

$$\delta V_x = \frac{2 \cdot V_{x0} \cdot S_0 [(r_2 - x \operatorname{tg} \alpha) \operatorname{tg} \alpha - (r_1 - x \operatorname{tg} \rho) \operatorname{tg} \rho]}{\pi [(r_2 - x \operatorname{tg} \alpha)^2 - (r_1 - x \operatorname{tg} \rho)^2]^2} \delta x \quad (3.64)$$

$$\delta \operatorname{tg} \Theta = \frac{1}{L} \left(1 - \frac{r_3 - r_4}{r_2 - r_1} \right) \delta r_{c0} \quad (3.65)$$

Но δr_{c0} функция от r :

$$r_{c0} = r + x \operatorname{tg} \Theta \quad (3.66)$$

поэтому

$$\delta r_{c0} = \frac{\delta r + \delta x \operatorname{tg} \Theta}{1 - A x} \quad (3.67)$$

где

$$A = \frac{1}{L} \cdot \left(1 - \frac{r_3 - r_4}{r_2 - r_1} \right) \quad (3.68)$$

Подстановка этих выражений в (3.53) дает

$$\delta V_r = \operatorname{tg} \Theta \delta V_x + A V_x \frac{\delta r + \operatorname{tg} \Theta \delta x}{1 - A x} \quad (3.69)$$

Приращение скорости одного из концов волокна в его вращении вокруг центра масс

$$\delta V_B = \delta V_X^{\sin(\varphi - \Theta)} + \delta V_r^{\cos(\varphi - \Theta)} \quad (3.70)$$

Приравнявая два различных выражения для угловой скорости волокна, получим

$$V_x \frac{d\varphi}{dx} = \frac{\delta V_B}{l} \quad [3.71]$$

Так как $\delta x = l \cos(\varphi - \Theta)$ и $\delta r = l \sin(\varphi - \Theta)$, после преобразований и разделения переменных получается дифференциальное уравнение

$$\frac{2d\varphi}{\sin 2(\varphi - \Theta) + [\cos 2(\varphi - \Theta) + 1] \operatorname{tg} \Theta} = \left[\frac{\delta V_x}{V_x \delta x} + \frac{A}{1 - Ax} \right] dx \quad [3.72]$$

Решение этого уравнения при граничном условии

$$\varphi(0) = \varphi_0 \quad [3.73]$$

имеет вид

$$\varphi = \arctg \left[\frac{C}{D} \left[\operatorname{tg}(\varphi_0 - \Theta) + \operatorname{tg} \Theta \right] \left(x^2 - 2 \frac{B}{C} x + \frac{D}{C} \right) (Ax - 1) - |\operatorname{tg} \Theta| \right] + \Theta \quad [3.74]$$

где $B = r_2 \operatorname{tg} \alpha - r_1 \operatorname{tg} \rho$; $C = \operatorname{tg}^2 \alpha - \operatorname{tg}^2 \rho$; $D = r_2^2 - r_1^2$.

Таким образом, получена зависимость угла ориентации волокна от его начального положения (φ_0 и r_{c0}) и геометрии зоны формования. Это соотношение позволяет оптимизировать форму матрицы для получения изделий с заданными свойствами. Так, можно увеличить осевую прочность труб, добившись максимальной ориентации волокон в осевом направлении. Или, если полученная труба будет работать под давлением, увеличить ее радиальную прочность, минимизировав число волокон, ориентированных в осевом направлении.

Подробнее математические преобразования описаны в статье [280].

ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ШНЕКОВОГО ФОРМОВАНИЯ

Наиболее эффективный метод холодной экструзии пластифицированных порошковых материалов — шнековое формование. Выше перечислены многочисленные достоинства этого метода. Отмечены также две проблемы, с которыми приходится сталкиваться при шнековом прессовании: высокая энергоемкость и нестабильность процесса формования. Для решения этих проблем необходим детальный анализ процессов, происходящих в материале при движении его по каналу шнека. Другими словами, нужна теория процесса шнекового формования пластифицированных порошковых материалов.

Как отмечалось выше, теоретических работ, посвященных шнековому формованию, довольно много. Подавляющее большинство исследователей анализируют движение вязких жидкостей в винтовых каналах, проверяя на адекватность различные реологические модели вязко-пластичных, вязко-упругих и более сложных тел. Результаты таких разработок применимы к материалам химической и пищевой промышленности: жидким термопластам, резинам, мясному фаршу и т.д.

Слабее исследована возможность применения гидродинамической аналогии в шнековом формовании. Она позволяет использовать развитый математический аппарат гидродинамики для анализа деформации материалов, способных к вязкому течению. Однако порошковые материалы, даже высокопластифицированные, оказываются слишком жесткими для такого подхода. Математические модели, полученные с использованием гидродинамической аналогии, плохо отражают особенности деформации ППМ — слишком сильно эти материалы отличаются от жидкостей, даже очень вязких. Применение гидродинамической аналогии оправдано лишь для полужидких композиций — различных растворов и расплавов.

В этой главе проанализированы процессы, происходящие в пластифицированном порошковом материале, деформируемом в канале шнека. Выше были рассмотрены некоторые особенности уплотнения порошковых

материалов в каналах сложной формы, ограниченных подвижными и неподвижными поверхностями. Теперь найденные общие соотношения будут применены к конкретному устройству — шнеку с винтовым каналом на боковой поверхности.

4.1. РАСЧЕТ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОФИЛЯ КАНАЛА

В третьей главе было получено уравнение, позволяющее рассчитать профиль канала по заданному распределению напряжений в материале. Там же найдено простейшее аналитическое решение этого уравнения, позволяющее реализовать равномерное распределение напряжений и плотностей. Для более сложных случаев аналитическое решение полученного уравнения невозможно, однако численные методы позволяют провести полный расчет и оптимизацию профиля канала под конкретные нужды. Полученные результаты можно использовать не только для каналов цилиндрических шнеков, но и для других аналогичных устройств, например, дисковых экструдеров.

Для численного решения уравнения (3.20) – (3.21) глубина канала H разбита на N равных частей и осуществлен переход к безразмерным переменным путем деления всех размеров на x_0 и всех напряжений на τ_0 :

$$\begin{aligned} x &= x/x_0; & y &= y/x_0; & l &= l(y)/x_0; & L &= l/x_0; \\ H &= H/x_0; & \tau &= \tau/\tau_0; & x_0 &= x_0/x_0 = 1; & \tau_0 &= \tau_0/\tau_0 = 1 \end{aligned} \quad [4.1]$$

Для удобства записи безразмерные переменные далее обозначены так же, как и соответствующие размерные величины; недоразумений это не вызовет.

Записав уравнение (3.20) в двух соседних узлах

$$\tau_i x_i + \frac{l_i}{L} = 1; \quad \tau_{i-1} x_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{L} = 1 \quad [4.2]$$

и вычтя одно из другого, можно получить систему уравнений

$$\tau_{i-1}x_{i-1} - \tau_i x_i = \frac{l_i - l_{i-1}}{L} \quad (4.3)$$

где $i = 1, 2, \dots, N$, а

$$(l_i - l_{i-1})^2 = (x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2 = (x_i - x_{i-1})^2 = \frac{H^2}{N^2} \quad (4.4)$$

$$L = l_N + x_N = \sum_{i=1}^N (l_i - l_{i-1}) + x_N$$

Так как правые части выражений (4.3) положительны, можно записать

$$\frac{\tau_{i-1}}{\tau_i} > \frac{x_i}{x_{i-1}} \quad (4.5)$$

Решая уравнения (4.3) – (4.4) относительно x_i , получим

$$x_i = \frac{1}{A_i} \left(B_i \pm \sqrt{B_i^2 - A_i C_i} \right) \quad (4.6)$$

где

$$A_i = L^2 \tau_i^2 - 1; \quad B_i = x_{i-1} (L^2 \tau_i \tau_{i-1} - 1); \quad C_i = x_{i-1}^2 (L^2 \tau_{i-1}^2 - 1) - \frac{H^2}{N^2} \quad (4.7)$$

Легко убедиться, что знак «+» в выражении (4.6) не удовлетворяет условию (4.5). Действительно, при $\tau_i = \tau_{i-1} = 1$ из (4.5) следует $x_{i-1} > x_i$, а из (4.7)

$$A_i = L^2 - 1 \quad B_i = A_i x_{i-1} \quad C_i = A_i x_{i-1}^2 - \frac{H^2}{N^2} \quad (4.8)$$

Подстановка этих выражений в (4.6) дает

$$\frac{x_i}{x_{i-1}} = 1 \pm \frac{H}{A_i N x_{i-1}} \quad [4.9]$$

Так как $\frac{H}{A_i N x_{i-1}} > 0$, то решение уравнений (4.3) – (4.4) имеет вид

$$x_i = \frac{1}{A_i} \left(B_i - \sqrt{B_i^2 - A_i C_i} \right) \quad [4.10]$$

Таким образом, задача оптимизации профиля канала сведена к решению системы i нелинейных уравнений (4.6) – (4.7) с $i+1$ неизвестными величинами. Система замыкается уравнением

$$L = x_N + \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + \frac{H^2}{N^2}} \quad [4.11]$$

Решается эта система следующим образом. Задается начальное приближение длины подвижного контура L_0 и предельно допустимая погрешность этой длины ε . Затем по формуле (4.10) последовательно рассчитываются все x_i , а по формуле (4.11) — L . Если требуемая точность не достигается, то есть если $(L - L_0) > \varepsilon$, то переменной L_1 присваивается значение $\frac{1}{2}(L_0 + L)$ и все вычисления повторяются. Процесс вычислений заканчивается при достижении требуемой точности. Алгоритм вычислений приведен на Рис. 4.1.

Для проведения расчетов выбрано параболическое распределение касательных напряжений по глубине канала: $\tau = 1 + ay + by^2$. Это распределение часто встречается на практике и определяется всего двумя независимыми параметрами: a и b . В расчетах линейные размеры и напряжения являются безразмерными величинами в соответствии с соотношениями (4.1).

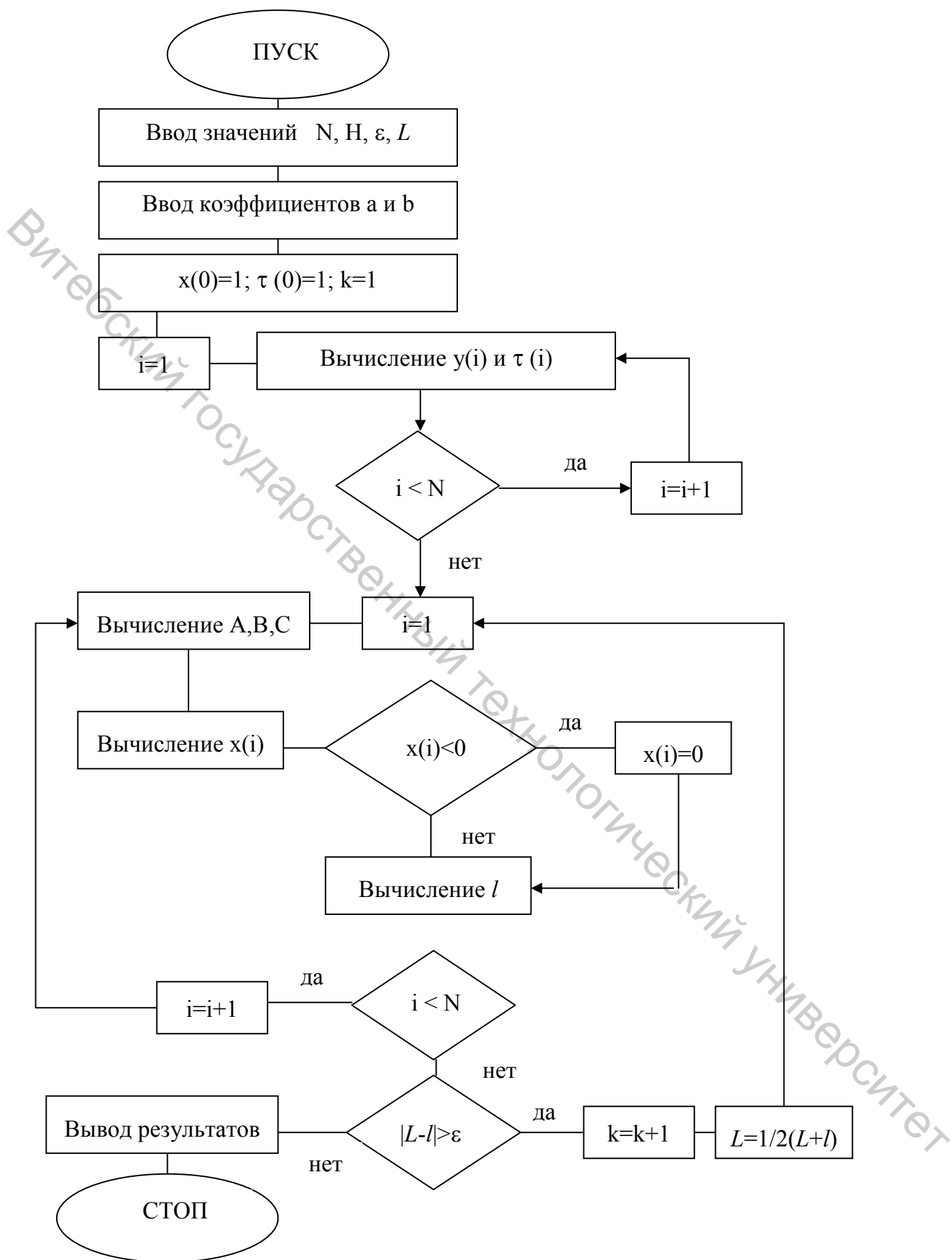


Рис. 4.1. Алгоритм расчета профиля канала

Расчеты проводились при следующих значениях: $\varepsilon = 0.01$, $N = 20$, $H = 1$. По заданному распределению напряжений $\tau(y)$ рассчитывался профиль $x(y)$; шаг по оси y выбран 0.05.

Таблица 4.1 содержит результаты расчетов профилей каналов для распределения напряжений $\tau = 1 + by^2$, а Таблица 4.2 — для линейного распределения $\tau = 1 + ay$. Таблица 4.3 содержит результаты расчетов некоторых более сложных профилей. Графически результаты расчетов изображены на Рис. 4.2 – Рис. 4.12.

Рис. 4.2 подтверждает соотношение (3.24): для равномерного распределения напряжений необходим канал треугольного профиля. Угол наклона образующей профиля (отношение ширины и глубина канала) определяется необходимой величиной касательных напряжений. Это наиболее простая и важная для практики форма канала.

Можно сделать важный вывод: ***наиболее распространенные прямоугольные и трапециевидальные каналы неравномерно уплотняют материал. Лучший профиль — треугольный.***

Рис. 4.3 – Рис. 4.5 показывают, как незначительные, едва заметные на глаз отклонения профиля канала от прямолинейного приводят к неравномерности распределения напряжений (и плотностей) в материале. Профиль, изображенный на Рис. 4.4, весьма близок к треугольному, а касательные напряжения по глубине канала изменяются почти вдвое.

Поэтому формующий инструмент (шнек, диск) должен быть изготовлен очень точно. Малейшие погрешности профиля канала негативно отразятся на качестве прессовок. Устоявшаяся практика изготовления шнеков методом литья, восходящая к винтам для мясорубок, порочна. Нарезка шнека, или хотя бы нескольких последних ее витков, требуют точных методов обработки. Если учесть также высокие требования по износостойкости шнека и жесткие триботехнические ограничения, то можно заключить, что грамотно сконструированный и изготовленный шнек — весьма дорогостоящее изделие.

Таблица 4.1

Результаты расчетов профилей каналов ($a=0$)

y	b=0		b=-0,5		b=0,5		b=1	
	x	τ	x	τ	x	τ	x	τ
0,05	0,95	1,00	0,97	1,00	0,95	1,00	0,95	1,00
0,10	0,90	1,00	0,95	1,00	0,89	1,01	0,89	1,01
0,15	0,85	1,00	0,93	0,99	0,84	1,01	0,82	1,02
0,20	0,80	1,00	0,91	0,98	0,77	1,02	0,75	1,04
0,25	0,75	1,00	0,89	0,97	0,71	1,03	0,67	1,06
0,30	0,71	1,00	0,88	0,96	0,65	1,05	0,60	1,09
0,35	0,66	1,00	0,86	0,94	0,59	1,06	0,53	1,12
0,40	0,61	1,00	0,85	0,92	0,52	1,08	0,46	1,16
0,45	0,56	1,00	0,84	0,90	0,47	1,10	0,40	1,20
0,50	0,51	1,00	0,84	0,88	0,41	1,13	0,34	1,25
0,55	0,46	1,00	0,83	0,85	0,35	1,15	0,29	1,30
0,60	0,41	1,00	0,83	0,82	0,30	1,18	0,24	1,36
0,65	0,36	1,00	0,83	0,79	0,26	1,21	0,20	1,42
0,70	0,31	1,00	0,84	0,75	0,21	1,25	0,16	1,49
0,75	0,26	1,00	0,84	0,72	0,17	1,28	0,13	1,56
0,80	0,22	1,00	0,85	0,68	0,13	1,32	0,10	1,64
0,85	0,17	1,00	0,87	0,64	0,10	1,36	0,07	1,72
0,90	0,12	1,00	0,89	0,59	0,06	1,41	0,05	1,81
0,95	0,07	1,00	0,91	0,55	0,03	1,45	0,02	1,90
1,00	0,02	1,00	0,94	0,50	0,01	1,50	0,00	2,00
	L = 1,42		L = 1,99		L = 1,43		L = 1,44	

Таблица 4.2

Результаты расчетов профилей каналов (b=0)

Y	a=0		a=-0,5		a=0,5		a=-0,6	
	X	τ	X	τ	X	τ	X	τ
0,05	0,95	1,00	1,00	0,98	0,90	1,03	1,01	0,97
0,10	0,90	1,00	1,00	0,95	0,81	1,05	1,02	0,94
0,15	0,85	1,00	1,00	0,93	0,74	1,08	1,03	0,91
0,20	0,80	1,00	1,00	0,90	0,66	1,10	1,04	0,88
0,25	0,75	1,00	1,00	0,88	0,60	1,13	1,06	0,85
0,30	0,71	1,00	1,00	0,85	0,54	1,15	1,07	0,82
0,35	0,66	1,00	1,00	0,83	0,48	1,17	1,08	0,79
0,40	0,61	1,00	1,00	0,80	0,43	1,20	1,10	0,76
0,45	0,56	1,00	1,00	0,78	0,39	1,23	1,12	0,73
0,50	0,51	1,00	1,00	0,75	0,34	1,25	1,13	0,70
0,55	0,46	1,00	1,00	0,73	0,30	1,28	1,15	0,67
0,60	0,41	1,00	1,00	0,70	0,26	1,30	1,17	0,64
0,65	0,36	1,00	1,00	0,68	0,22	1,33	1,20	0,61
0,70	0,31	1,00	1,00	0,65	0,19	1,35	1,22	0,58
0,75	0,26	1,00	0,99	0,63	0,15	1,38	1,25	0,55
0,80	0,22	1,00	0,99	0,60	0,12	1,40	1,27	0,52
0,85	0,17	1,00	0,99	0,57	0,09	1,43	1,30	0,49
0,90	0,12	1,00	0,99	0,55	0,06	1,45	1,34	0,46
0,95	0,07	1,00	0,99	0,52	0,03	1,48	1,37	0,43
1,00	0,02	1,00	0,99	0,50	0,01	1,50	1,41	0,40
	L = 1,42		L = 1,99		L = 1,44		L = 2,51	

Таблица 4.3

Результаты расчетов профилей каналов

Y	a=-2,0, b=5,0		a=-1,0, b=1,0		a=-1,0, b=3,0		a=-0,5, b=0,2	
	X	τ	X	τ	X	τ	X	τ
0,05	1,05	0,91	1,02	0,95	1,01	0,96	0,99	0,98
0,10	1,08	0,85	1,03	0,91	1,00	0,93	0,98	0,95
0,15	1,10	0,81	1,03	0,87	0,98	0,92	0,97	0,93
0,20	1,07	0,80	1,04	0,84	0,92	0,92	0,95	0,91
0,25	0,98	0,81	1,03	0,81	0,83	0,94	0,94	0,89
0,30	0,82	0,85	1,02	0,79	0,72	0,97	0,92	0,87
0,35	0,64	0,91	1,00	0,77	0,61	1,02	0,94	0,85
0,40	0,49	1,00	0,97	0,76	0,50	1,08	0,87	0,83
0,45	0,38	1,11	0,92	0,75	0,41	1,16	0,84	0,82
0,50	0,29	1,25	0,85	0,75	0,33	1,25	0,81	0,80
0,55	0,22	1,41	0,76	0,75	0,26	1,36	0,78	0,79
0,60	0,16	1,60	0,66	0,76	0,21	1,48	0,73	0,77
0,65	0,12	1,81	0,55	0,77	0,16	1,62	0,69	0,76
0,70	0,09	2,05	0,44	0,79	0,13	1,77	0,64	0,75
0,75	0,07	2,31	0,34	0,81	0,09	1,94	0,58	0,74
0,80	0,05	2,60	0,26	0,84	0,07	2,12	0,51	0,73
0,85	0,03	2,91	0,18	0,87	0,05	2,32	0,43	0,72
0,90	0,02	3,25	0,12	0,91	0,03	2,53	0,34	0,71
0,95	0,01	3,61	0,06	0,95	0,01	2,76	0,24	0,71
1,00	0,00	4,00	0,02	1,00	0,00	3,00	0,13	0,70
	L = 1,68		L = 1,57		L = 1,51		L = 1,53	

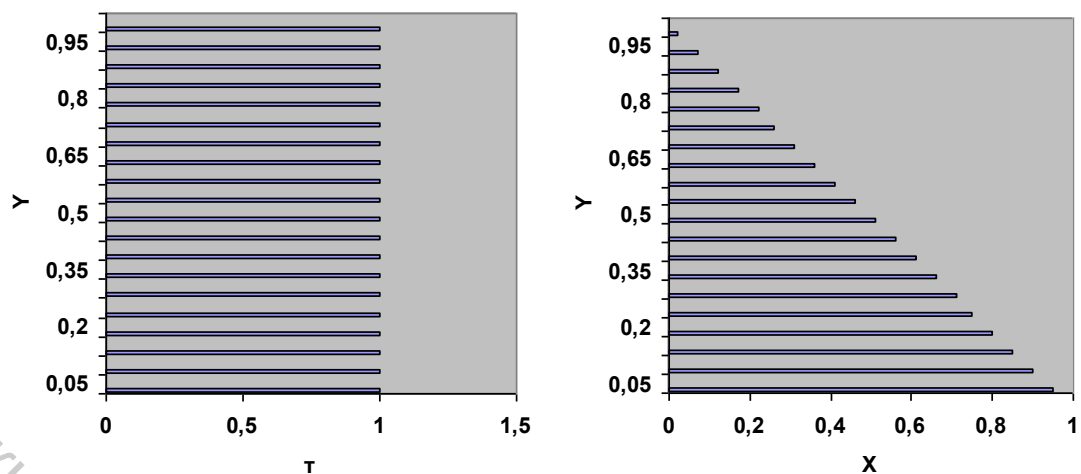


Рис. 4.2. Равномерное распределение напряжений и соответствующий ему профиль ($a = 0$, $b = 0$)

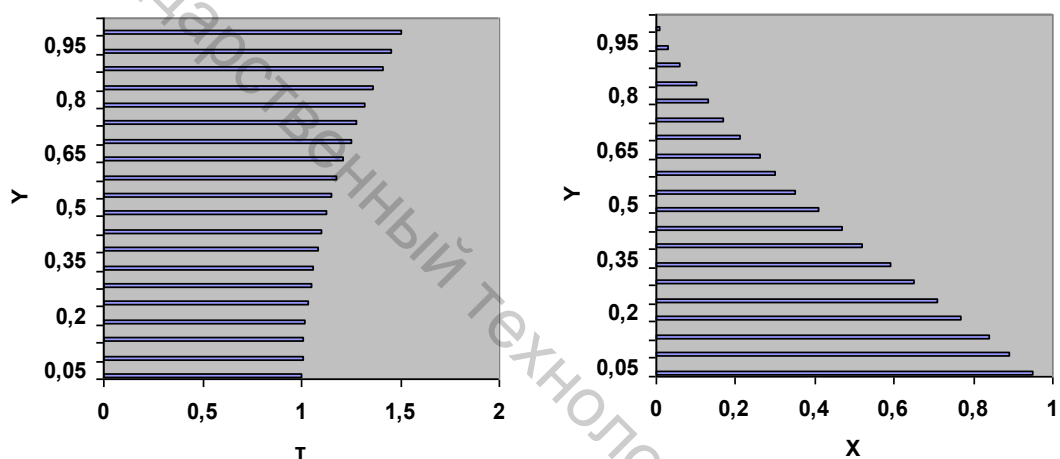


Рис. 4.3. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = 0$, $b = 0.5$)

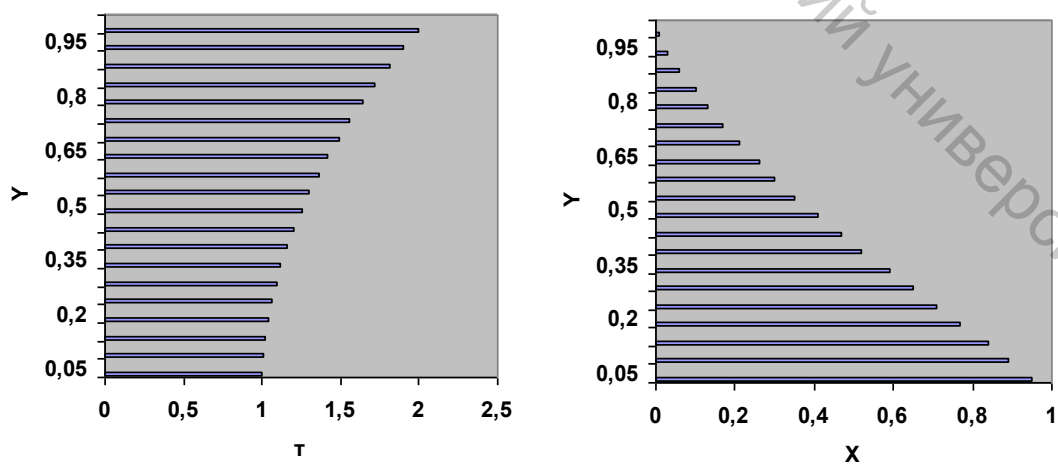


Рис. 4.4. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = 0$, $b = 1$)

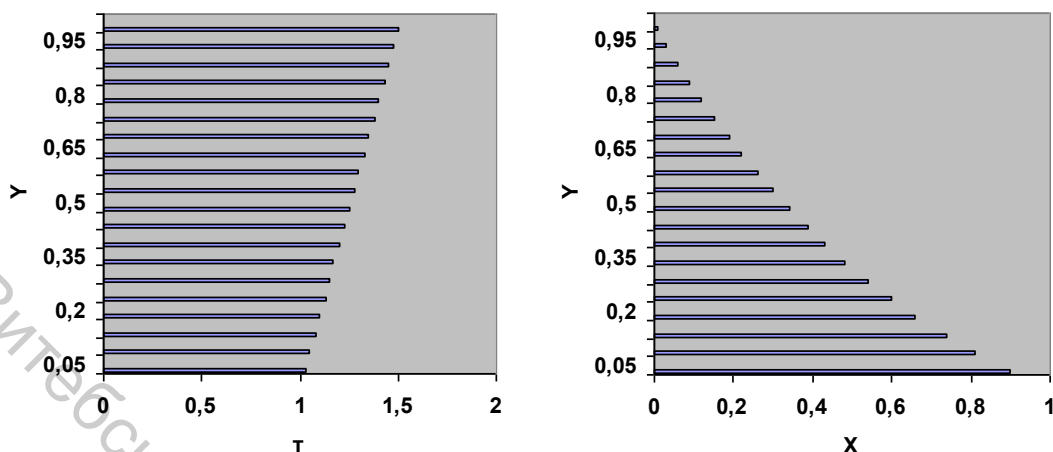


Рис. 4.5. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = 0,5$; $b = 0$)

Рис. 4.2 – Рис. 4.5 показывают также, что существуют каналы, позволяющие получать изделия с преимущественной пропрессовкой внутренних слоев. Несмотря на кажущуюся простоту этого заключения, его трудно сделать без анализа математической модели. Возможность доуплотнения внутренних слоев материала, находящегося в канале, имеет практическое значение. Экструзия сопровождается большим уплотнением наружных слоев изделия из-за трения о поверхность инструмента. Компенсировать это влияние можно, предварительно уплотнив материал изнутри. Найденные формы каналов позволяют это сделать.

На Рис. 4.6 изображен наиболее распространенный канал прямоугольного профиля. Главное его преимущество — простота изготовления на металлорежущих станках. Кроме того, прямоугольный канал не имеет узких мест и хорошо самоочищается при формовании.

Недостатком прямоугольного профиля является неоднородность распределения касательных напряжений в материале — на противоположных поверхностях канала они различаются примерно вдвое. Такое напряженное состояние может приводить к получению дефектных изделий и даже полной дискредитации метода формования для некоторых материалов. Так, порошковые шнуры, полученные на шнеках с прямоугольной нарезкой, склонны к короблению и растрескиванию при хранении. Изделия, сформо-

ванные на шнеках с прямоугольным каналом, часто изгибаются или разрушаются при спекании.

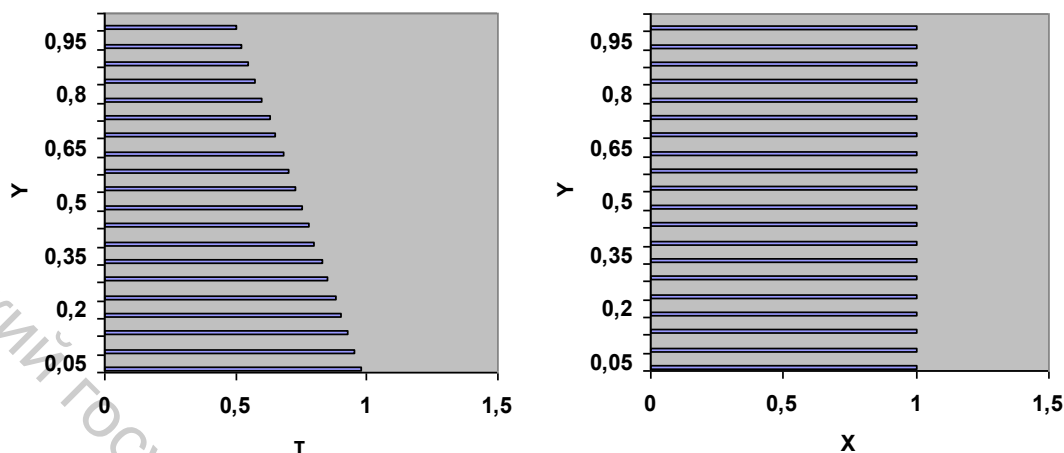


Рис. 4.6. Распределение касательных напряжений в канале прямоугольного профиля ($a = -0,5$; $b = 0$)

В качестве меры, уменьшающей неравномерное распределение плотности в изделии, можно рекомендовать увеличение радиального обжатия при экструзии. Однако значительно больший эффект дает приведение параметров канала в соответствие с расчетными величинами.

Практически такое же распределение напряжений, как и в прямоугольном канале, обеспечивает профиль, изображенный на Рис. 4.7. Это решение наглядно показывает, что одному и тому же напряженному состоянию может соответствовать несколько различных профилей.

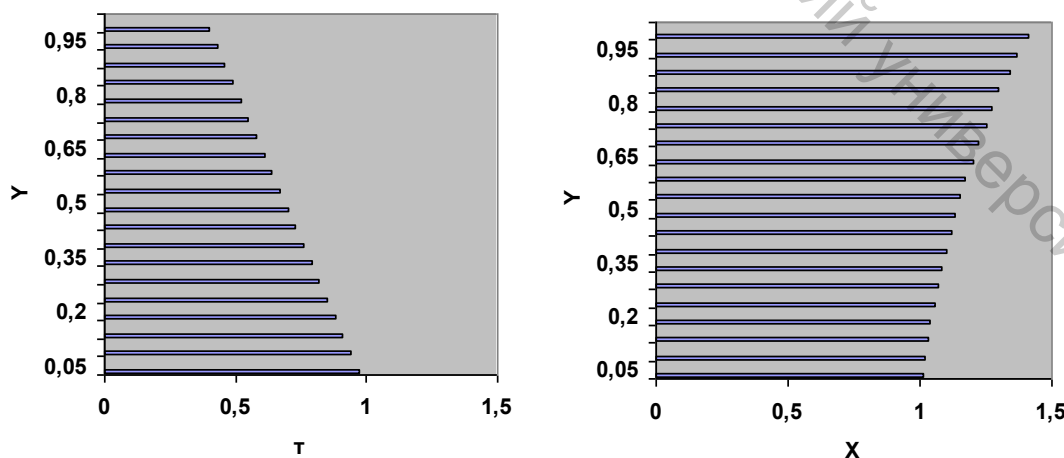


Рис. 4.7. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = -0,6$; $b = 0$)

Рис. 4.8 – Рис. 4.12 дают представление о некоторых более сложных профилях и их возможностях.

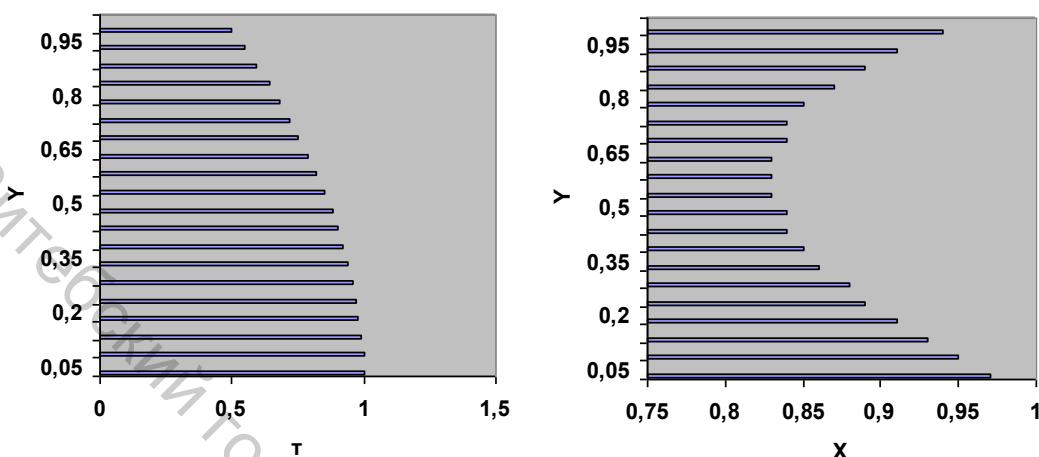


Рис. 4.8. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = 0$, $b = -0.5$)

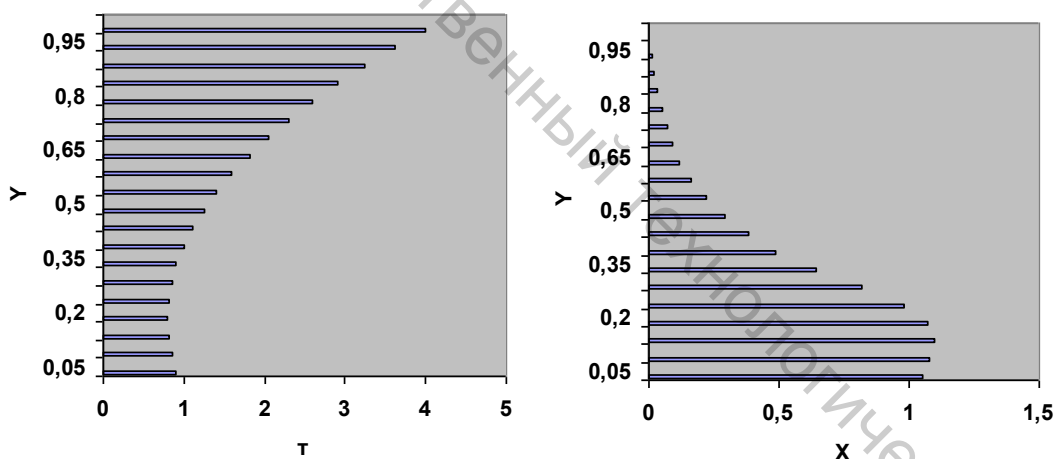


Рис. 4.9. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = -2$; $b = 5$)

Численные расчеты показывают, что не для любого распределения напряжений существует профиль, его реализующий. Для некоторых распределений решение системы уравнений (4.6) – (4.7) отсутствует. Это означает, что не существует замкнутого профиля, способного обеспечить заданное напряженное состояние.

Некоторые проблемы, связанные с оптимизацией профилей сложных каналов, описаны в статье [281].

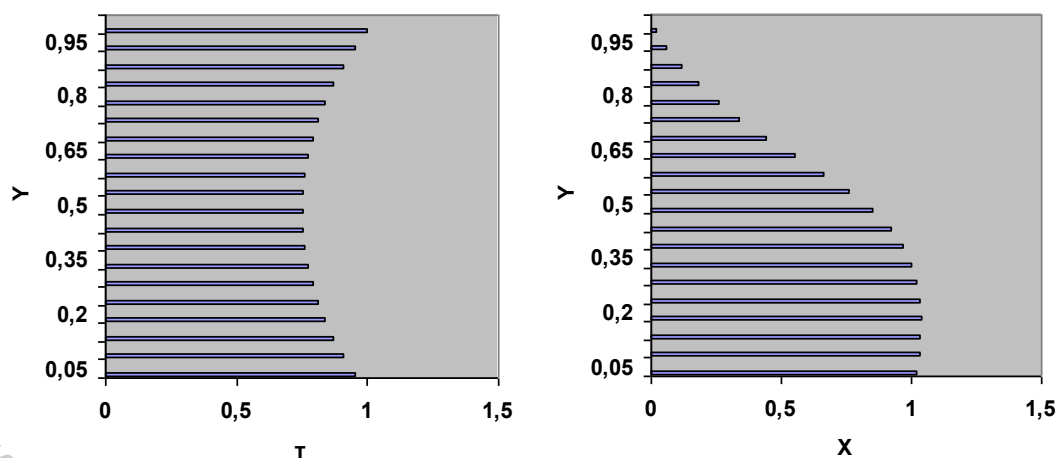


Рис. 4.10. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = -1$; $b = 1$)

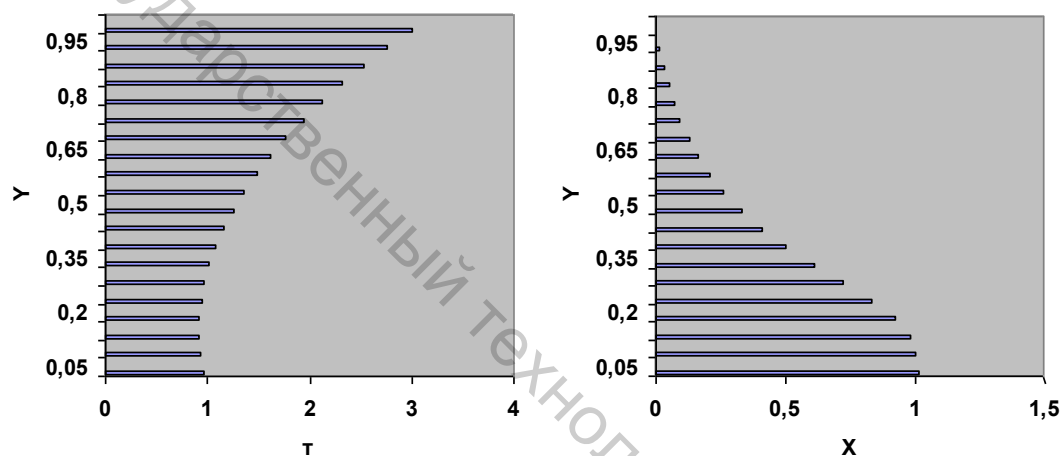


Рис. 4.11. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = -1$; $b = 3$)

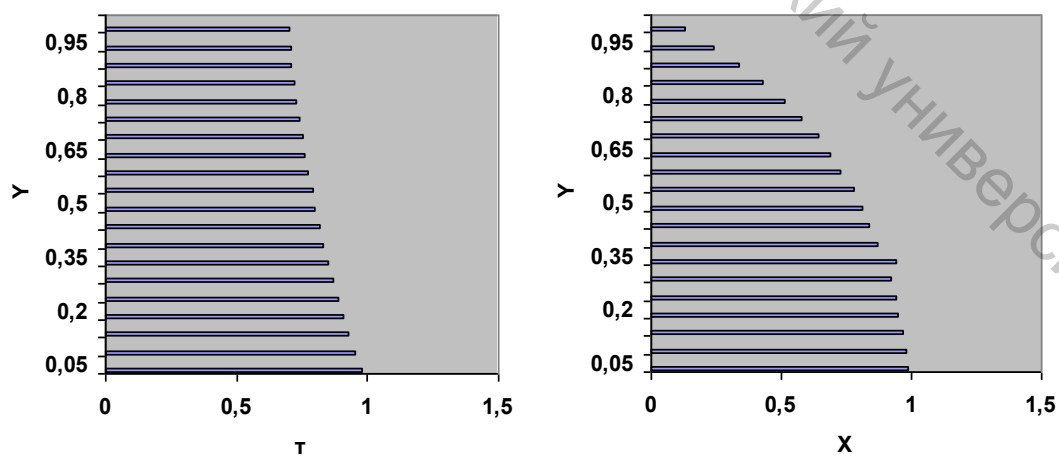


Рис. 4.12. Распределение касательных напряжений и соответствующий ему профиль ($a = -0.5$; $b = 0.2$)

4.2. ЭНЕРГОСИЛОВЫЕ РАСЧЕТЫ

При проектировании шнековых устройств необходимо решить ряд задач, связанных с энергетикой процесса: какие усилия действуют на формирующие элементы, каковы вращающие моменты на шнеке, какой мощности должен быть привод пресса, какова энергоемкость процесса формования и можно ли ее уменьшить и т.д. Эта часть анализа посвящена поиску ответов на такие вопросы.

Схема скоростей и сил, действующих на материал и элементы шнекового пресса, изображена на Рис. 4.13.

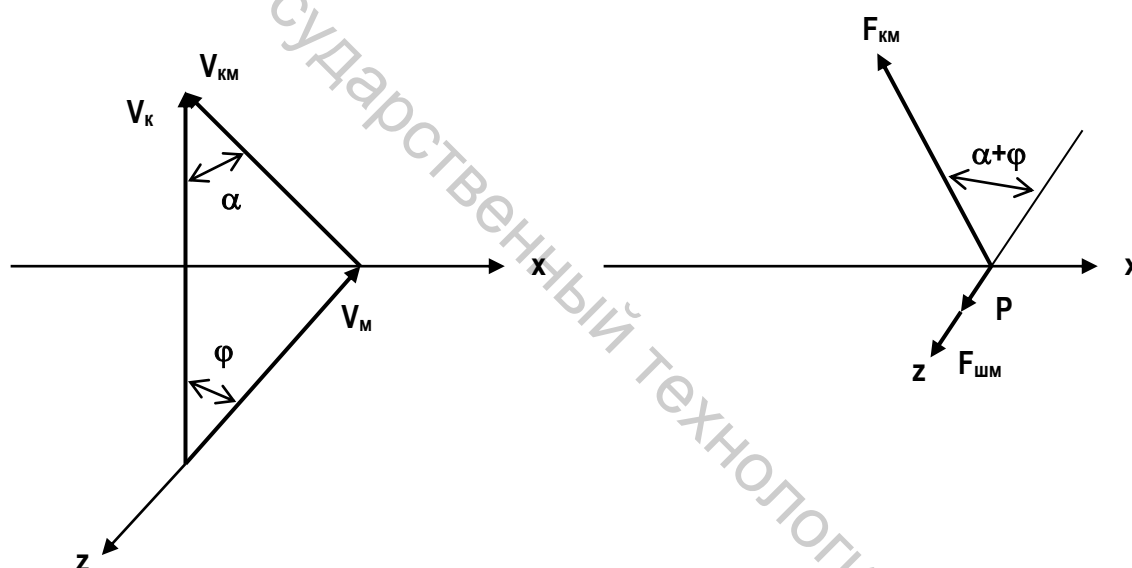


Рис. 4.13. Схема скоростей и сил, действующих на материал и элементы шнекового пресса

Рассматривается развертка винтового канала на плоскость, силы инерции считаются пренебрежимо малыми по сравнению с силами трения. Как и раньше, ось z направлена вдоль канала от выхода к его входу (от матрицы к бункеру). Ось x — ось шнека; она совпадает с направлением экструзии. Угол подъема винтового канала ϕ для наглядности преувеличен.

Неподвижный на самом деле корпус (цилиндр в котором установлен шнек) в выбранной системе координат движется со скоростью V_k , а материал по каналу — со скоростью V_m . Скорость материала относительно корпуса обозначена на схеме V_{km} .

На элемент материала dz действуют три силы: сила трения о корпус $F_{км}$, сила трения о шнек $F_{шм}$, и усилие P , возникающее из-за перепада давления вдоль канала. Это элементарные силы, но знаки дифференциалов опущены для удобства записи. Необходимо отметить также, что направления силы $F_{км}$ и скорости $V_{км}$ могут не совпадать.

Материал движется вдоль канала, вообще говоря, с проскальзыванием, мерой которого является угол между скоростями V_k и $V_{км}$, обозначенный на схеме α ($0 < \alpha < \pi/2$). При $\alpha = 0$ имеет место полное проскальзывание материала относительно корпуса: он вращается со шнеком, как одно целое и вперед не перемещается. При $\alpha = \pi/2$ окружного проскальзывания нет и материал перемещается вперед с максимально возможной скоростью.

Из треугольника скоростей видно, что

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V_m \sin \varphi}{V_k - V_m \cos \varphi} \quad [4.12]$$

Этот тангенс является более удобной характеристикой окружного проскальзывания, чем угол α . Он используется наравне с традиционным коэффициентом окружного проскальзывания $\eta = V_m/V_k$; связь между ними следующая

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{\eta} - \operatorname{ctg} \varphi \quad [4.13]$$

Уравнение равновесия проекций сил на ось z имеет вид

$$F_{шм} + P = F_{км} \cos(\alpha + \varphi) \quad [4.14]$$

Чтобы это равновесие не нарушалось, необходимо выполнение условия

$$\alpha + \varphi < \pi/2 \quad [4.15]$$

Так как угол подъема φ винтовой нарезки шнека всегда больше нуля, то можно сделать важный вывод: *если трение материала о корпус изотропно (коэффициенты трения равны по всем направлениям), то шнековое формование без окружного проскальзывания материала невозможно.*

Этот вывод, полученный путем элементарных рассуждений, для многих технологов все еще не очевиден. Регулярно появляются публикации с попытками найти условия, позволяющие исключить окружное проскальзывание материала в простейшей системе шнек — гладкий цилиндр. Решить эту задачу можно, обеспечив необходимую анизотропию трения (например, используя специально профилированный цилиндр). Кстати, наиболее распространенные шнековые прессы — бытовые и промышленные мясорубки — давно выпускаются с рифленным корпусом, увеличивающим сопротивления провороту материала.

Силы трения материала о корпус и шнек равны соответственно

$$F_{\kappa} = \xi f_{\kappa} p l_{\kappa} dz \quad F_{\text{ш}} = \xi f_{\text{ш}} p l_{\text{ш}} dz \quad [4.16]$$

где f_{κ} и $f_{\text{ш}}$ — коэффициенты трения материала о корпус и шнек; ξ — коэффициент бокового давления; l_{κ} и $l_{\text{ш}}$ — части профиля канала, принадлежащие корпусу и шнеку.

Сила, действующая на материал вдоль канала, равна

$$P = S dp \quad [4.17]$$

где S — площадь поперечного сечения канала; dp — перепад давления на длине dz .

Подстановка сил (4.16) – (4.17) в уравнение равновесия (4.14) приводит к обыкновенному дифференциальному уравнению с разделяющимися переменными

$$dp = -A p dz \quad [4.18]$$

где

$$A = \frac{\xi}{S} [f_w l_w - f_k l_k \cos(\alpha + \varphi)] \quad [4.19]$$

Если трение материала о поверхность цилиндра анизотропно (например, используется рифленый цилиндр), необходимо задать зависимость $f_k = f_k(\alpha)$.

Решение уравнения (4.18) при граничном условии $p(0) = p_0$ имеет вид

$$z = \frac{1}{A} \ln \frac{p_0}{p} \quad [4.20]$$

Коэффициент A зависит от свойств материала (коэффициентов трения и бокового давления), геометрии канала и величины окружного проскальзывания, но не зависит от давления, что и позволило получить аналитическое решение уравнения (4.18). С подробностями анализа можно ознакомиться в статье [282].

Теперь можно перейти непосредственно к энергосиловым расчетам. Для этого необходимо найти сначала длину рабочей части винтового канала.

Если принудительная подача материала в шнек отсутствует, то давление на входе в канал определяется лишь гравитацией:

$$p(L) = \rho g h \quad [4.21]$$

где ρ — насыпная плотность материала; g — ускорение свободного падения; h — глубина канала.

Очень важно точно задать это граничное условие — экспонента (4.20) многократно усилит любую погрешность. Так, нельзя задать входное

давление нулевым, ссылаясь на его ничтожность по сравнению с давлением прессования. Полное отсутствие напряжений на входе в канал (например, в невесомости) приведет к неработоспособности шнекового пресса — на выходе канала также будет нулевое давление. Граничное условие (4.21) должно учитывать все тонкости реального процесса формования — наличие инерционных сил (часто возникающих из-за вибрации, особенно при использовании вибробункера) и других воздействий, если они имеются.

Длина рабочей части канала (есть еще нерабочая часть, расположенная под загрузочным бункером — она не участвует в создании давления прессования, а выполняет лишь транспортные функции) находится из соотношения (4.20)

$$L = \frac{1}{A} \ln \frac{p_0}{\rho gh} \quad [4.22]$$

Канал такой длины необходим для создания давления прессования p_0 в матрице шнекового пресса. При сделанных допущениях неважно, как расположен этот канал — на наружной, внутренней или конической поверхности; на данном этапе расчетов не имеет значения и профиль канала.

Определив длину канала, необходимо сконструировать шнек — выбрать его диаметр, способ расположения канала и учесть другие особенности. Главное, чтобы длина контакта канала и цилиндра, в котором установлен шнек, не оказалась меньше расчетной величины.

Момент, необходимый для вращения шнека, складывается из двух составляющих:

$$M = M_1 + M_2 \quad [4.23]$$

где M_1 и M_2 — моменты, необходимые для преодоления трения материала о боковую и торцовую поверхности шнека соответственно:

$$M_1 = R \cos \alpha \int_0^L F_{\kappa m} dz = \xi f_{\kappa} l_{\kappa} R \cos \alpha \int_0^L p dz = \frac{1}{A} \xi f_{\kappa} l_{\kappa} R \cos \alpha p_0 (1 - e^{-AL}) \quad [4.24]$$

$$M_2 = 2\pi p_0 f_u \int_0^R r^2 dr = \frac{2}{3} \pi p_0 f_u R^3 \quad [4.25]$$

где R — наружный радиус нарезки шнека.

Момент M позволяет провести расчет шнека на прочность и спроектировать привод пресса. Методики таких расчетов хорошо разработаны и здесь не приводятся.

На шнек, кроме крутящего момента, действует большое осевое усилие, из-за чего шнек приходится устанавливать на опорные подшипники. Для расчета опор необходимо знать это усилие. Осевая сила, действующая на шнек, также состоит из двух компонент:

$$P = P_1 + P_2 \quad [4.26]$$

где P_1 и P_2 — усилия, действующие на боковую и торцовую поверхности шнека соответственно:

$$P_1 = \sin \alpha \int_0^L F_{\kappa m} dz = \frac{1}{A} \xi f_{\kappa} l_{\kappa} p_0 (1 - e^{-AL}) \quad [4.27]$$

$$P_2 = \pi R^2 p_0 \quad [4.28]$$

Мощность, необходимая для вращения шнека, находится как

$$N = MV_{\kappa} / R \quad [4.29]$$

Подробнее методика проведения кинематических и энергосиловых расчетов шнековых устройств описана в работе [283].

4.3. ТЕРМОДИНАМИКА ШНЕКОВОГО ФОРМОВАНИЯ

Работа силовых шнековых устройств сопровождается интенсивным трением и тепловыделением, приводящим к разогреву материала и элементов пресса. Изменение температуры сильно отражается на технологических свойствах пластифицированных порошков, так как большинство наполнителей термопластичны.

Интенсивность тепловыделения можно регулировать, изменяя скорость вращения и геометрию шнека, а также выбирая материал с необходимыми триботехническими характеристиками. Ниже будет показано как, используя особенности термопластичных материалов, уменьшить энергопотери и увеличить эффективность шнекового формования, а также получить некоторые дополнительные возможности.

4.3.1. Идеальный тепловой режим

Работа шнекового пресса тем эффективнее, чем больше различие в коэффициентах трения материала о шнек и цилиндр, в котором он установлен. Трение материала о поверхность цилиндра в окружном направлении стремятся увеличить как конструкторскими (специальный рельеф), так и технологическими приемами. К последним относятся методы изменения триботехнических свойств используемых материалов, например, целенаправленным изменением их температуры на разных участках шнека.

Увеличение силы трения материала о цилиндр эффективная, но вынужденная мера. Энергосбережению этот прием явно не способствует. Предпочтительнее достигать необходимого эффекта уменьшением трения материала о шнек. На этом пути не так много возможностей: повышение чистоты поверхности шнека, применение антифрикционных материалов и выбор оптимальных режимов прессования.

Формование термопластичных материалов, к которым относятся пластифицированные порошки, предоставляет интересную возможность уменьшения трения на шнеке. Как известно, наиболее эффективным приемом, снижающим трение, является смазка. По техническим причинам, однако, сложно организовать смазку труднодоступной поверхности шнека; к

тому же смазывающее вещество будет уноситься материалом и загрязнять его.

Большинство распространенных термопластичных пластификаторов (парафин, поливиниловый спирт) плохо смазывают металлические поверхности. Но даже если удастся подобрать наполнитель, обладающий хорошими пластифицирующими и смазывающими свойствами одновременно, эффект от его применения будет незначительным: надо уменьшать трение только на шнеке, а не на всех трущихся поверхностях.

Решение этой проблемы существует — для необходимого изменения соотношения коэффициентов трения достаточно обеспечить режим формования, при котором трение материала о шнек будет жидкостным, а о корпус — сухим. Для большинства используемых пластификаторов такой режим найти удастся, а для некоторых его удастся и реализовать.

Изменить характер трения с сухого на жидкостное проще всего изменением температуры трущейся поверхности. Если поверхность шнека нагрета выше температуры плавления пластификатора, а поверхность корпуса — нет, то необходимый режим формования будет обеспечен. Дополнительно надо следить, чтобы пластификатор не расплавился по всему объему материала и не закипел на поверхности шнека.

Таким образом, тепловой режим, обеспечивающий эффективное формование термопластичных материалов на шнековом прессе, имеет вид

$$T_k < T_{пл} < T_{ш} < T_{кип} \quad (4.30)$$

где T_k и $T_{ш}$ — температуры трущихся поверхностей корпуса и шнека соответственно; $T_{пл}$ и $T_{кип}$ — температуры плавления и кипения пластификатора.

Проще всего обеспечить необходимый тепловой режим, нагревая шнек и охлаждая корпус. Хотя такое решение дополнительно увеличивает энергоемкость процесса формования, оно не накладывает ограничений на выбор скоростей вращения шнека, что упрощает решение технологических задач. Но полностью достоинства шнекового формования раскроются лишь

в том случае, когда необходимый тепловой режим будет обеспечен только за счет тепловыделения, возникающего в результате трения материала о поверхности шнека и корпуса.

Ниже будет показано, что в ряде случаев оптимизировать температуры можно изменением скорости вращения шнека. При достижении нужного температурного режима наблюдается резкое уменьшение энергоемкости процесса — потери энергии на трение перестают быть потерями, они превращаются в необходимый источник теплоты; потребность в дополнительном подогреве шнека исчезает. Резко увеличивающаяся эффективность работы пресса позволяет значительно снизить потребляемую мощность — вращать шнек при жидкостной смазке намного легче.

4.3.2. Расчет температурных полей

Расчетная схема изображена на Рис. 4.14. Полый шнек, вращаясь, приводит в движение материал, в котором из-за внутреннего и внешнего трения происходит тепловыделение. Образующаяся теплота уходит через шнек $q_{\text{ш}}$ в его полость $q(r_1)$ и через корпус $q_{\text{к}}$ в окружающую среду $q(r_4)$.

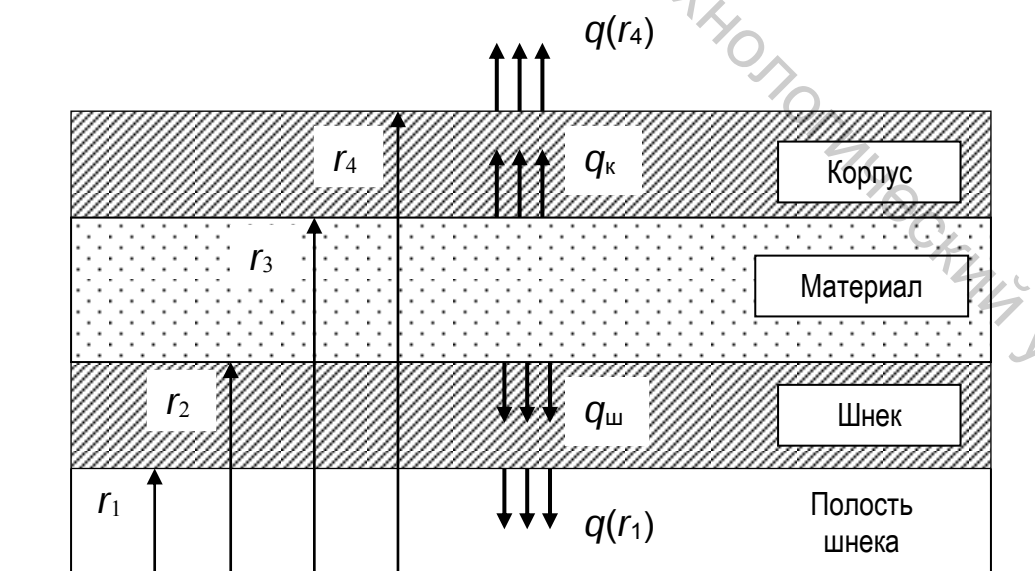


Рис. 4.14. Схема тепловых потоков при шнековом формовании

Корпус пресса имеет форму трубы с наружным радиусом r_4 и внутренним радиусом r_3 . Шнек имеет форму полого цилиндра с наружным радиусом r_2 и внутренним радиусом r_1 .

Анализ проводится при следующих допущениях и упрощениях:

1. влияние винтового канала шнека на тепловые потоки отсутствует; подвижность контакта гребня винтовой нарезки с корпусом позволяет ввести соответствующий корректирующий коэффициент, получаемый расчетным путем
2. наружная поверхность корпуса и внутренняя поверхность шнека находятся в состоянии конвективного теплообмена с окружающей средой или имеют постоянную температуру (интенсивное принудительное охлаждение)
3. тепловые потоки равномерно распределены по соответствующим поверхностям
4. вся выделяющаяся теплота отводится через корпус и шнек; теплота, выносимая из пресса материалом, пренебрежимо мала (это допущение не является слишком грубым, так как значительного нагрева термопластичного материала обычно не допускают по технологическим соображениям)
5. теплофизические характеристики всех материалов считаются не зависящими от температуры
6. решается осесимметричная задача; концевые эффекты (отклонения тепловых потоков на концах шнека) не учитываются

Задачу нахождения температурных полей можно решить для любого элемента пресса, контактирующего с окружающей средой или принудительно охлаждаемого. Так как в полости шнека конвективный теплообмен затруднен, целесообразно сначала определить температурное поле в корпусе пресса, теплоотводу с поверхности которого ничто не препятствует.

Для нахождения температурного поля корпуса T_k необходимо решить уравнение теплопроводности, которое в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T_k}{\partial r} - \frac{\partial T_k}{\partial \tau} = 0 \quad [4.31]$$

где $\tau = \frac{k_{\kappa}}{c_{\kappa} \rho_{\kappa}} t$; k_{κ} , c_{κ} и ρ_{κ} — коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность материала корпуса соответственно; t — время, прошедшее с момента включения прессы.

Это уравнение решается при следующих граничных условиях

$$T_{\kappa}|_{\tau=0} = T_{0\kappa}; \quad \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial r}|_{r=r_3} = -\frac{q_{\kappa}}{k_{\kappa}}; \quad \frac{\partial T_{\kappa}}{\partial r}|_{r=r_4} + h_{\kappa}(T_{\kappa} - T_{0\kappa})|_{r=r_4} = 0 \quad (4.32)$$

где $h_{\kappa} = \alpha_{\kappa}/k_{\kappa}$; α_{κ} — коэффициент теплоотдачи корпуса в окружающую среду.

Замена переменной $T = T_{\kappa} - T_{0\kappa}$ сводит задачу к решению уравнения

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} - \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 \quad (4.33)$$

с краевыми условиями

$$T|_{\tau=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=r_3} = -\frac{q_{\kappa}}{k_{\kappa}}; \quad \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=r_4} + h_{\kappa}(T_{\kappa} - T_{0\kappa})|_{r=r_4} = 0 \quad (4.34)$$

Граничное условие при $r = r_3$ неоднородно, поэтому для решения задачи выбран метод конечных интегральных преобразований, предложенный Г.А. Гринбергом в 1946 году. Согласно этому методу решение ищется в виде разложения в ряд по собственным функциям $R_n(r)$ соответствующей однородной задачи Штурма-Лиувилля:

$$T = \sum_{n=1}^{\infty} C_n(\tau) R_n(r) \quad (4.35)$$

Задача Штурма-Лиувилля представляет собой уравнение

$$(rR')' + \lambda rR = 0 \quad (4.36)$$

с однородными граничными условиями

$$R'(r_3) = 0; \quad R'(r_4) + h_{\kappa} R(r_4) = 0 \quad [4.37]$$

где штрих означает производную по координате r .

Уравнение (4.36) является уравнением Бесселя нулевого порядка относительно переменной $\sqrt{\lambda}r$. Общее решение этого уравнения имеет вид

$$R = AI_0(\sqrt{\lambda}r) + BY_0(\sqrt{\lambda}r) \quad [4.38]$$

где I_0 и Y_0 — цилиндрические функции нулевого порядка первого и второго рода соответственно; A и B — коэффициенты, выбираемые таким образом, чтобы удовлетворить граничные условия (4.37).

Производная от общего решения (4.38) имеет вид

$$R' = -A\sqrt{\lambda}I_1(\sqrt{\lambda}r) - B\sqrt{\lambda}Y_1(\sqrt{\lambda}r) \quad [4.39]$$

где I_1 и Y_1 — цилиндрические функции первого порядка первого и второго рода соответственно.

Для нахождения собственных значений λ_n выражения (4.38) и (4.39) подставляются в граничные условия (4.37). Получается система двух уравнений

$$\begin{aligned} AI_1(\sqrt{\lambda}r_3) + BY_1(\sqrt{\lambda}r_3) &= 0 \\ A[h_{\kappa}I_0(\sqrt{\lambda}r_4) - \sqrt{\lambda}I_1(\sqrt{\lambda}r_4)] + B[h_{\kappa}Y_0(\sqrt{\lambda}r_4) - \sqrt{\lambda}Y_1(\sqrt{\lambda}r_4)] &= 0 \end{aligned} \quad [4.40]$$

Эта система имеет решение тогда и только тогда, когда ее определитель равен нулю:

$$I_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right)[h_{\kappa}r_4Y_0(\gamma) - \gamma Y_1(\gamma)] - Y_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right)[h_{\kappa}r_4I_0(\gamma) - \gamma I_1(\gamma)] = 0 \quad [4.41]$$

где $\gamma = \sqrt{\lambda}r_4$.

Характеристическое уравнение (4.41) имеет бесконечное множество дискретных вещественных положительных корней

$$\gamma_n = \sqrt{\lambda_n} r_4 \quad \text{где } n=1, 2, 3 \dots \quad [4.42]$$

При $\gamma = \gamma_n$ система (4.40) разрешима относительно коэффициентов A и B . Так как уравнения системы линейно зависимы, один из этих коэффициентов выбирается произвольно:

$$A = Y_0(\sqrt{\lambda} r_4) - \frac{\sqrt{\lambda}}{h_\kappa} Y_1(\sqrt{\lambda} r_4) \quad [4.43]$$

тогда

$$B = -I_0(\sqrt{\lambda} r_4) + \frac{\sqrt{\lambda}}{h_\kappa} I_1(\sqrt{\lambda} r_4) \quad [4.44]$$

Общее решение (4.38) при подстановке этих значений приобретает вид

$$R(r) = \left[Y_0(\gamma) - \frac{\gamma}{h_\kappa r_4} Y_1(\gamma) \right] I_0\left(\gamma \frac{r}{r_4}\right) - \left[I_0(\gamma) - \frac{\gamma}{h_\kappa r_4} I_1(\gamma) \right] Y_0\left(\gamma \frac{r}{r_4}\right) \quad [4.45]$$

Характеристическое уравнение теперь можно записать более компактно:

$$R'(r_4) + h_\kappa R(r_4) = 0 \quad [4.46]$$

Собственные функции задачи Штурма-Лиувилля находятся из общего решения (4.45) подстановкой $\gamma = \gamma_n$:

$$R_n(r) = \left[Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} Y_1(\gamma_n) \right] I_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) - \left[I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} I_1(\gamma_n) \right] Y_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) \quad [4.47]$$

Собственные функции ортогональны с весом r :

$$\int_{r_3}^{r_4} r R_m R_n dr = \begin{cases} 0, m \neq n \\ N \{R_n\}, m=n \end{cases} \quad (4.48)$$

Поэтому коэффициенты ряда (4.35) равны

$$C_n(\tau) = \frac{1}{N \{R_n\}} \int_{r_3}^{r_4} T r R_n dr = \frac{T_n(\tau)}{N \{R_n\}} \quad (4.49)$$

Умножая уравнение (4.33) на $r R_n$ и интегрируя от r_3 до r_4 , можно получить

$$\int_{r_3}^{r_4} R_n \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} dr - \int_{r_3}^{r_4} \left(r R_n \frac{\partial T}{\partial \tau} \right) dr = 0 \quad (4.50)$$

или

$$\int_{r_3}^{r_4} R_n \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial T}{\partial r} dr = \left[r R_n \frac{\partial T}{\partial r} - r R_n' T \right]_{r=r_3}^{r=r_4} + \int_{r_3}^{r_4} (r R_n') T dr \quad (4.51)$$

Далее вводится обозначение G_n , которое преобразуется с использованием граничных условий (4.34) и (4.37)

$$G_n = r \left[R_n \frac{\partial T}{\partial r} - R_n' T \right]_{r=r_3}^{r=r_4} = r_3 \frac{q_\kappa}{k_\kappa} R_n(r_3) \quad (4.52)$$

Подстановка (4.51) и (4.52) в (4.50) дает

$$\int_{r_3}^{r_4} (r R_n')' T dr - \frac{\partial}{\partial \tau} \int_{r_3}^{r_4} r R_n T dr = -G_n \quad (4.53)$$

Так как

$$(rR'_n)' + \frac{\gamma_n^2}{r_4^2} rR_n = 0 \quad (4.54)$$

то

$$\int_{r_3}^{r_4} (rR'_n)' T dr = -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \int_{r_3}^{r_4} rR_n T dr = -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} T_n(\tau) \quad (4.55)$$

После подстановки (4.55) в (4.53) получается дифференциальное уравнение первого порядка

$$T'_n(\tau) + \frac{\gamma_n^2}{r_4^2} T_n(\tau) = G_n \quad (4.56)$$

с начальным условием

$$T_n(0) = 0 \quad (4.57)$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$T_n(\tau) = P_n \exp\left\{-\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau\right\} + \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} G_n \quad (4.58)$$

Подстановка (4.57) в (4.58) позволяет найти постоянную интегрирования

$$P_n = -\frac{r_4^2}{\gamma_n^2} G_n \quad (4.59)$$

тогда

$$T_n(\tau) = \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} G_n \left(1 - \exp\left\{-\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau\right\}\right) \quad (4.60)$$

Подстановка (4.60) в (4.49) дает

$$C_n(\tau) = \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} \frac{G_n}{N\{R_n\}} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau \right\} \right) \quad [4.61]$$

Ряд (4.35) с учетом (4.61) принимает вид

$$T = r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau \right\} \right) \quad [4.62]$$

Для вычисления нормы $N\{R_n\}$ уравнение (4.54) умножается на $2rR'_n$ и интегрируется:

$$(rR'_n)^2 \Big|_{r=r_3}^{r=r_4} + \frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \int_{r_3}^{r_4} r^2 \frac{d}{dr} R_n^2 dr = 0 \quad [4.63]$$

Так как

$$\int_{r_3}^{r_4} r^2 \frac{d}{dr} R_n^2 dr = r^2 R_n^2 \Big|_{r=r_3}^{r=r_4} - 2 \int_{r_3}^{r_4} r \frac{d}{dr} R_n^2 dr \quad [4.64]$$

то

$$N\{R_n\} = \int_{r_3}^{r_4} r R_n^2 dr = \frac{r_4^2}{2\gamma_n^2} \left[r_4^2 R_n'^2(r_4) - r_3^2 R_n'^2(r_3) \right] + \frac{1}{2} \left[r_4^2 R_n^2(r_4) - r_3^2 R_n^2(r_3) \right] \quad [4.65]$$

Подстановка граничных условий (4.37) дает

$$N\{R_n\} = \frac{r_4^2}{2} \left(\frac{r_4^2 h_K^2}{\gamma_n^2} + 1 \right) R_n^2(r_4) - \frac{r_3^2}{2} R_n^2(r_3) \quad [4.66]$$

Как известно [284, с. 728]

$$I_\nu(x) Y_{\nu+1}(x) - I_{\nu+1}(x) Y_\nu(x) = -\frac{2}{\pi x} \quad [4.67]$$

ПОЭТОМУ

$$R_n(r_4) = -\frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} [I_0(\gamma_n)Y_1(\gamma_n) - I_1(\gamma_n)Y_0(\gamma_n)] = \frac{2}{\pi h_\kappa r_4} \quad [4.68]$$

$$R_n(r_3) = \frac{Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} Y_1(\gamma_n)}{Y_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} I_0\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) Y_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) -$$

$$- \frac{I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} I_1(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) Y_0\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) = \frac{2}{\pi h_\kappa r_3 \gamma_n} \frac{\gamma_n I_1(\gamma_n) - h_\kappa r_4 I_0(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} \quad [4.69]$$

В последнем преобразовании использовано характеристическое уравнение (4.41) в форме

$$\frac{h_\kappa r_4 Y_0(\gamma_n) - \gamma_n Y_1(\gamma_n)}{Y_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} = \frac{h_\kappa r_4 I_0(\gamma_n) - \gamma_n I_1(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} \quad [4.70]$$

Подстановка (4.69) в (4.52) дает

$$G_n = \frac{2q_\kappa}{\pi k_\kappa h_\kappa \gamma_n} \frac{\gamma_n I_1(\gamma_n) - h_\kappa r_4 I_0(\gamma_n)}{I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} \quad [4.71]$$

а подстановка (4.68) и (4.69) в (4.66) позволяет вычислить норму

$$N\{R_n\} = \frac{2}{\pi^2} \left[\frac{1}{h_\kappa^2} + \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} - \left(\frac{\gamma_n I_1(\gamma_n) - h_\kappa r_4 I_0(\gamma_n)}{h_\kappa \gamma_n I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right)} \right)^2 \right] \quad (4.72)$$

Ряд (4.62) можно представить в виде

$$T = r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} - r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \exp\left\{-\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \tau\right\} \quad (4.73)$$

Первое слагаемое, представляющее собой разложение стационарной температуры, можно просуммировать. Для этого необходимо функцию

$$f(r) = r_3 \frac{q_\kappa}{k_\kappa} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) \quad (4.74)$$

разложить в ряд по собственным функциям задачи Штурма-Лиувилля

$$f(r) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n R_n(r) \quad (4.75)$$

Собственные функции ортогональны, поэтому коэффициенты разложения имеют вид

$$A_n = \frac{1}{N\{R_n\}} \int_{r_3}^{r_4} f(r) R_n(r) r dr \quad (4.76)$$

Далее вычисляется интеграл

$$\begin{aligned} \int_{r_3}^{r_4} f(r) R_n(r) r dr &= r_3 \frac{q_\kappa}{k_\kappa} \left[Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} Y_1(\gamma_n) \right] \int_{r_3}^{r_4} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) I_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) r dr - \\ &- r_3 \frac{q_\kappa}{k_\kappa} \left[I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} I_1(\gamma_n) \right] \int_{r_3}^{r_4} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) Y_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) r dr \end{aligned} \quad (4.77)$$

$$\int_{r_3}^{r_4} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) I_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_4} \right) r dr =$$

$$= \frac{r_4}{\gamma_n h_\kappa} I_1(\gamma_n) - \frac{r_4 r_3}{\gamma_n} \left(\ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) I_1 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) - \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} \left[I_0(\gamma_n) - I_0 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) \right] \quad [4.78]$$

$$\int_{r_3}^{r_4} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) Y_0 \left(\gamma_n \frac{r}{r_4} \right) r dr =$$

$$= \frac{r_4}{\gamma_n h_\kappa} Y_1(\gamma_n) - \frac{r_4 r_3}{\gamma_n} \left(\ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) Y_1 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) - \frac{r_4^2}{\gamma_n^2} \left[Y_0(\gamma_n) - Y_0 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right) \right] \quad [4.79]$$

Подстановка интегралов (4.78) и (4.79) в (4.77) после преобразований дает

$$\int_{r_3}^{r_4} f(r) R_n(r) r dr = - \frac{2}{\pi} \frac{q_\kappa}{k_\kappa} \frac{r_4^3}{\gamma_n^3} \frac{I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_\kappa r_4} I_1(\gamma_n)}{I_1 \left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4} \right)} \quad [4.80]$$

Подстановка выражений (4.80) и (4.76) в (4.75), с учетом (4.71), позволяет записать

$$r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} = r_3 \frac{q_\kappa}{k_\kappa} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) \quad [4.81]$$

Подстановка выражения (4.81) в (4.73) и возврат к переменным T_κ и t позволяет записать выражение для температурного поля корпуса шнекового пресса при его конвективном теплообмене с окружающей средой

$$T_\kappa = T_{0\kappa} + r_3 \frac{q_\kappa}{k_\kappa} \left(\ln \frac{r_4}{r} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right) - r_4^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \exp \left\{ - \frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \frac{k_\kappa}{c_\kappa \rho_\kappa} t \right\} \quad [4.82]$$

При постоянной температуре $T_{0\kappa}$ наружной поверхности корпуса (например, при интенсивном принудительном охлаждении) температурное

поле может быть найдено из выражений (4.41), (4.47), (4.71), (4.72) и (4.82) при подстановке в них значения h_k , стремящегося к бесконечности:

$$T_k = T_{0k} + r_3 \frac{q_k}{k_k} \left(\ln \frac{r_4}{r} - \pi \frac{r_4}{r_3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0(\gamma_n) I_1\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) R_n(r)}{\gamma_n \left[I_0^2(\gamma_n) - I_1^2\left(\gamma_n \frac{r_3}{r_4}\right) \right]} \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_4^2} \frac{k_k}{c_k \rho_k} t \right\} \right) \quad (4.83)$$

$$\text{где } R_n(r) = Y_0(\gamma_n) I_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) - I_0(\gamma_n) Y_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_4}\right) \quad (4.84)$$

а γ_n — последовательные корни уравнения

$$I_0(\gamma) Y_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right) - I_1\left(\gamma \frac{r_3}{r_4}\right) Y_0(\gamma) = 0 \quad (4.85)$$

Задача о нахождении температурного поля в шнеке отличается от решенной лишь граничными условиями. Поэтому, не повторяя преобразований, привожу сразу конечный результат (индекс «ш» соответствует шнеку, как ранее «к» — корпусу прессы).

Температурное поле шнека при его конвективном теплообмене с окружающей средой (шнек полый, теплоотвод по внутренней поверхности) имеет вид

$$T_w = T_{0w} + r_2 \frac{q_w}{k_w} \left(\ln \frac{r}{r_1} + \frac{1}{h_w r_1} \right) - r_1^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{G_n R_n(r)}{\gamma_n^2 N\{R_n\}} \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_1^2} \frac{k_w}{c_w \rho_w} t \right\} \quad (4.86)$$

где

$$R_n(r) = \left[Y_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_w r_1} Y_1(\gamma_n) \right] I_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_1}\right) - \left[I_0(\gamma_n) - \frac{\gamma_n}{h_w r_1} I_1(\gamma_n) \right] Y_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_1}\right) \quad (4.87)$$

$$G_n = -r_2 \frac{q_w}{k_w} R_n(r_2) \quad (4.88)$$

$$N\{R_n\} = \frac{r_2^2}{2} R_n^2(r_2) - \frac{r_1^2}{2} \left(\frac{r_1^2 h_u^2}{\gamma_n^2} + 1 \right) R_n^2(r_1) \quad [4.89]$$

а γ_n — последовательные корни уравнения

$$R'(r_1) + h_u R(r_1) = 0 \quad [4.90]$$

При постоянной температуре T_{0u} на внутренней поверхности шнека (принудительное охлаждение по осевому отверстию) искомое температурное поле находится подстановкой в выражения (4.86) – (4.90) значения h_u , стремящегося к бесконечности:

$$T_u = T_{0u} + r_2 \frac{q_u}{k_u} \left(\ln \frac{r}{r_1} - \pi \frac{r_1}{r_2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_0(\gamma_n) I_1\left(\gamma_n \frac{r_2}{r_1}\right) R_n(r)}{\gamma_n \left[I_0^2(\gamma_n) - I_1^2\left(\gamma_n \frac{r_2}{r_1}\right) \right]} \exp \left\{ -\frac{\gamma_n^2}{r_1^2} \frac{k_u}{c_u \rho_u} t \right\} \right) \quad [4.91]$$

где

$$R_n(r) = Y_0(\gamma_n) I_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_1}\right) - I_0(\gamma_n) Y_0\left(\gamma_n \frac{r}{r_1}\right) \quad [4.92]$$

а γ_n — последовательные корни уравнения

$$I_0(\gamma) Y_1\left(\gamma \frac{r_2}{r_1}\right) - I_1\left(\gamma \frac{r_2}{r_1}\right) Y_0(\gamma) = 0 \quad [4.93]$$

Таким образом, найдены температурные поля, возникающие в элементах шнекового пресса при формовании порошковых материалов. Задача решена как для случая конвективного теплообмена с окружающей средой, так и для случая принудительного охлаждения шнека и корпуса пресса. Некоторые аспекты рассматриваемой проблемы описаны также в статье [285].

4.3.3. Анализ влияния различных параметров на тепловой режим

Полученные соотношения позволяют провести анализ влияния различных параметров процесса формования на температурные поля. Плотности тепловых потоков на поверхностях контакта материала с элементами пресса задаются соотношениями

$$q_k = f_k p_k v_{kp} c_k; \quad q_{ш} = f_{ш} p_{ш} v_{шп} c_{ш} \quad (4.94)$$

где f_k и $f_{ш}$ — коэффициенты трения материала о корпус и шнек соответственно; p_k и $p_{ш}$ — давление материала на поверхности корпуса и шнека; c_k и $c_{ш}$ — коэффициенты, учитывающие влияние винтового канала на тепловые потоки; V_{kp} и $V_{шп}$ — скорости скольжения порошкового материала относительно поверхностей корпуса и шнека.

Неравномерность распределения теплового потока, связанная с наличием канала на шнеке, в расчете не учитывается, а уменьшение средней плотности теплового потока при равномерном распределении его на всю внутреннюю поверхность корпуса корректируется коэффициентом

$$c_k = \frac{S_{kp}}{S_k} = 1 - \frac{\delta}{2\pi r_3 \sin \varphi} \quad (4.95)$$

где S_{kp} — площадь контакта внутренней поверхности корпуса с материалом; S_k — площадь внутренней поверхности корпуса; δ и φ — толщина гребня и угол подъема винтовой нарезки соответственно.

Изменение площади контакта материала со шнеком, связанное с наличием винтового канала, корректируется аналогичным коэффициентом

$$c_{ш} = \frac{S_{шп}}{S_{ш}} = 1 + \frac{r_3 - r_2 - \delta}{2\pi r_2 \sin \varphi} \quad (4.96)$$

где $S_{шп}$ — площадь контакта шнека с материалом; $S_{ш}$ — площадь боковой поверхности цилиндра радиуса r_2 .

Коэффициент $c_{ш}$ может быть как больше, так и меньше единицы; коэффициент c_k всегда меньше единицы.

Скорости скольжения материала относительно корпуса и шнека задаются соответственно выражениями

$$V_{kn} = \frac{1}{2}(r_2 + r_3) \sqrt{\omega_n^2 + (\omega - \omega_n)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} \quad (4.97)$$

$$V_{шн} = \frac{1}{2 \cos \varphi} (\omega - \omega_n) (r_2 + r_3) \quad (4.98)$$

где ω и ω_n — угловые скорости шнека и материала соответственно; $\frac{1}{2}(r_2 + r_3)$ — средний радиус нарезки шнека.

Таким образом, плотности тепловых потоков на внутренней поверхности корпуса и наружной поверхности шнека равны

$$q_k = \frac{1}{2} f_k p_k (r_2 + r_3) \sqrt{\omega_n^2 + (\omega - \omega_n)^2 \operatorname{tg}^2 \varphi} \left(1 - \frac{\delta}{2\pi r_3 \sin \varphi} \right) \quad (4.99)$$

$$q_{ш} = \frac{f_{ш} p_{ш}}{2 \cos \varphi} (r_2 + r_3) (\omega - \omega_n) \left(1 + \frac{r_3 - r_2 - \delta}{2\pi r_2 \sin \varphi} \right) \quad (4.100)$$

Теперь, после определения плотностей тепловых потоков, можно провести расчеты температур.

Для этого необходимо выбрать базовый режим формования, характеризующийся реальными значениями основных параметров. Надо задать геометрические характеристики шнека, коэффициенты трения материала о поверхности формующего инструмента и некоторые другие величины. Важно, чтобы при выбранных характеристиках шнековый пресс мог нормально функционировать.

За базовый принят типичный режим формования (Таблица 4.4) медного порошка ПМС-1, пластифицированного пятнадцатью массовыми процентами парафина.

Таблица 4.4

Типичный режим формования пластифицированного медного порошка

Название параметра	Обозначение	Размерность	Значение
Давление прессования	p	МПа	10
Коэффициент окружного проскальзывания	η	—	0,2
Коэффициент трения материала о корпус	f_k	—	0,3
Коэффициент трения материала о шнек	$f_{ш}$	—	0,05
Угловая скорость шнека	ω	c^{-1}	0,105
Коэффициент теплоотдачи корпуса и шнека	$\alpha_k; \alpha_{ш}$	Вт/м ² К	20
Коэффициент теплопроводности корпуса и шнека	$k_k; k_{ш}$	Вт/мК	45,5
Удельная теплоемкость материала корпуса и шнека	$c_k; c_{ш}$	Дж/кгК	500
Плотность материала корпуса и шнека	$\rho_k; \rho_{ш}$	кг/м ³	7800
Угол подъема винтового канала шнека	φ	градус	13
Толщина винтового гребня	δ	мм	3
Радиус отверстия шнека	r_1	мм	6
Радиус шнека	r_2	мм	14,4
Радиус отверстия корпуса	r_3	мм	18
Наружный радиус корпуса	r_4	мм	45
Температура внутренней поверхности корпуса	T_k	°С	45
Температура наружной поверхности шнека	$T_{ш}$	°С	106

Для исследования влияния различных факторов на температуры контактных поверхностей в базовом режиме последовательно изменялся какой-либо один параметр; результаты расчетов приведены на Рис. 4.15 — Рис. 4.25.

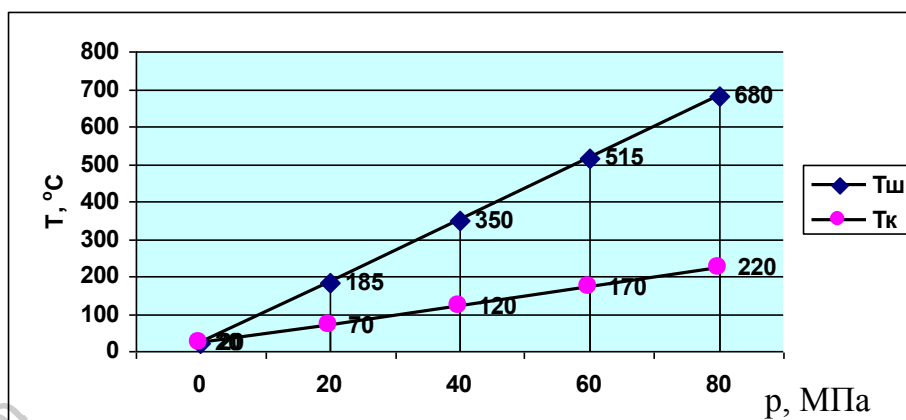


Рис. 4.15. Зависимость температуры на поверхностях корпуса и шнека от давления выдавливания

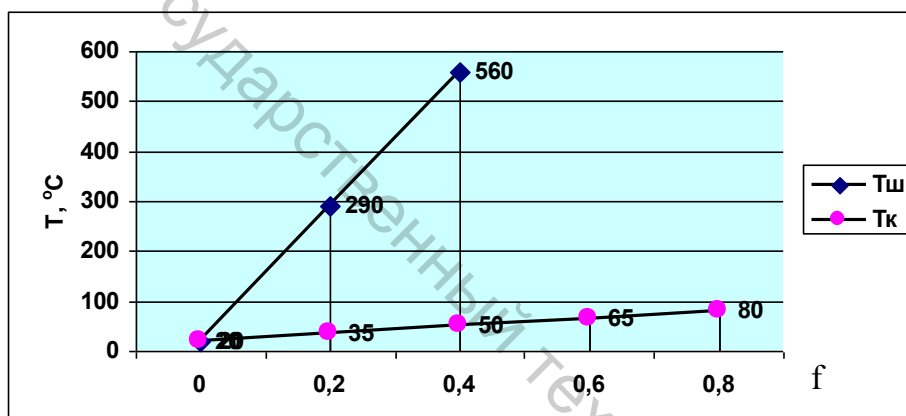


Рис. 4.16. Зависимость температуры от коэффициента трения

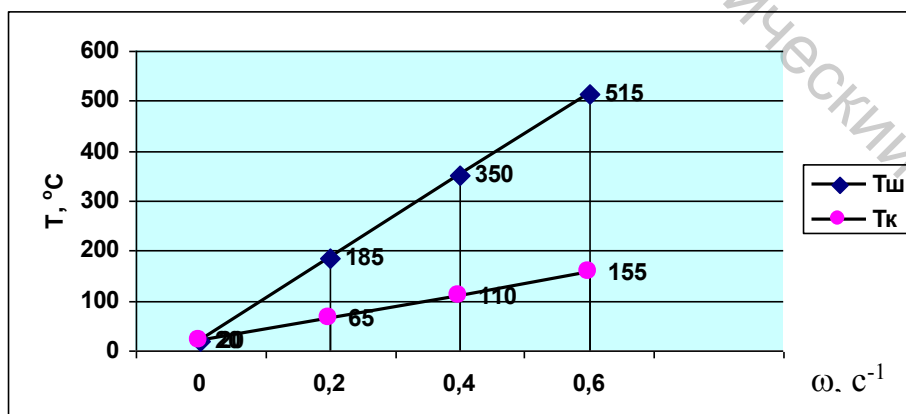


Рис. 4.17. Зависимость температуры от угловой скорости шнека

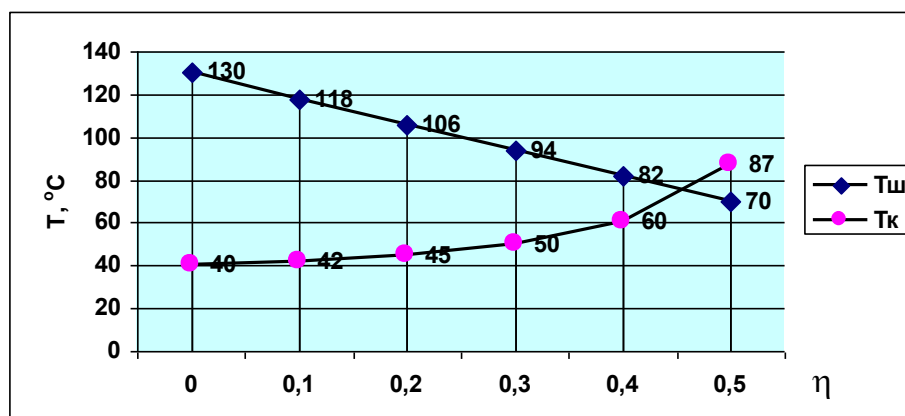


Рис. 4.18. Зависимость температуры от коэффициента окружного проскальзывания материала

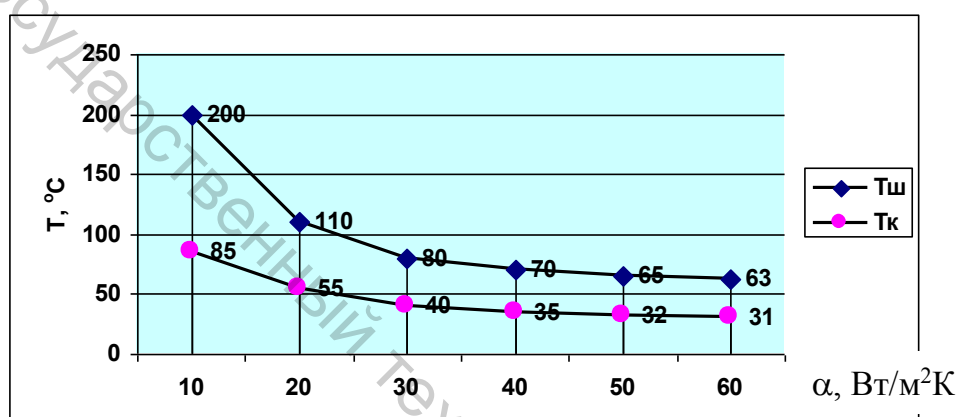


Рис. 4.19. Зависимость температуры от коэффициента теплоотдачи

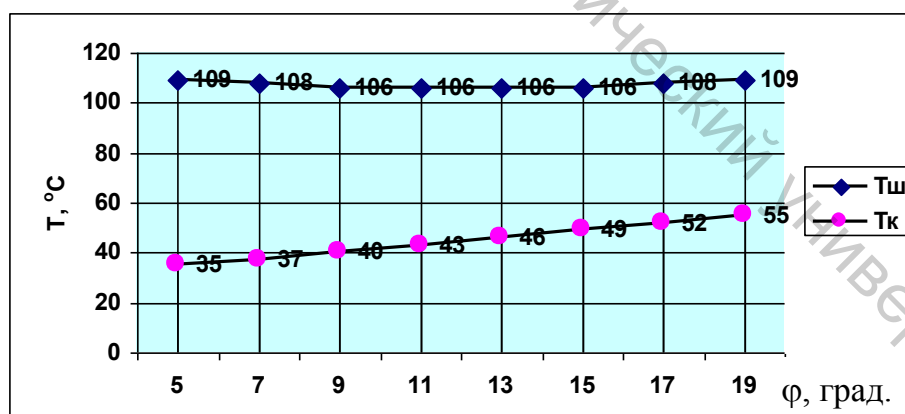


Рис. 4.20. Зависимость температуры от угла подъема канала шнека

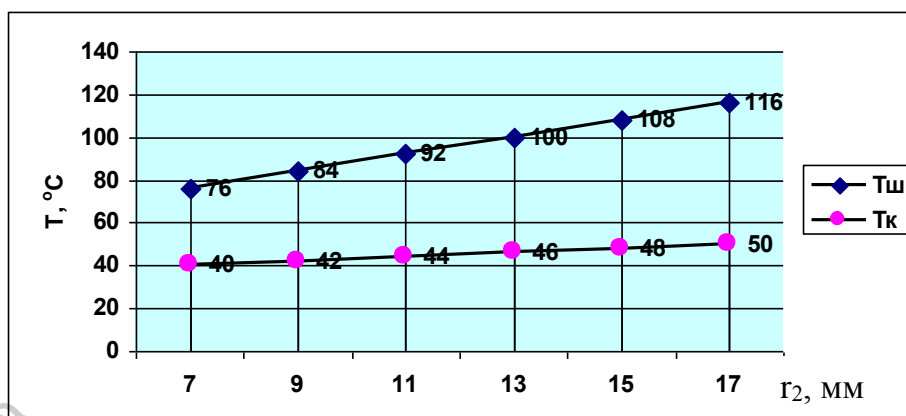


Рис. 4.21. Зависимость температуры от глубины канала

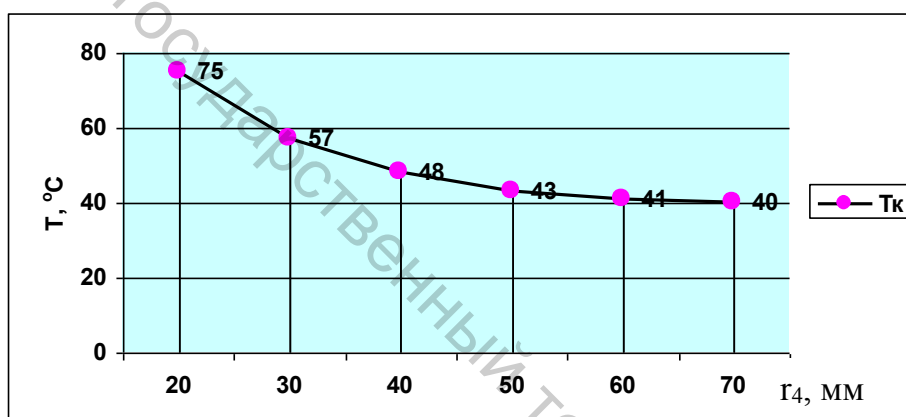


Рис. 4.22. Зависимость температуры от радиуса наружной поверхности корпуса

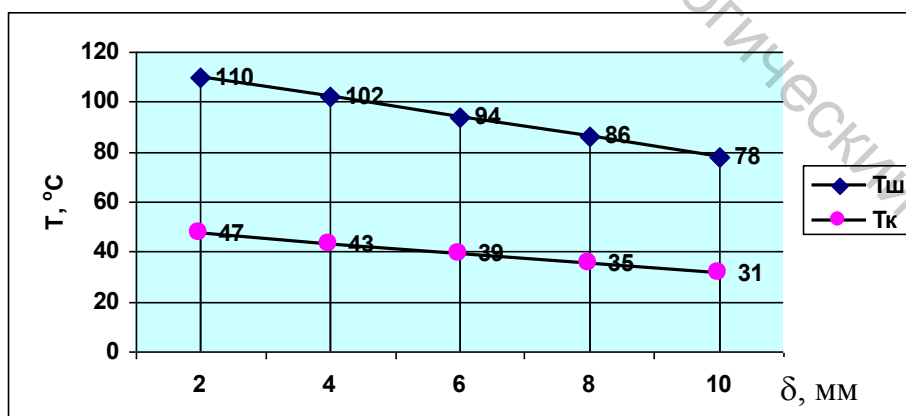


Рис. 4.23. Зависимость температуры от толщины винтового гребня

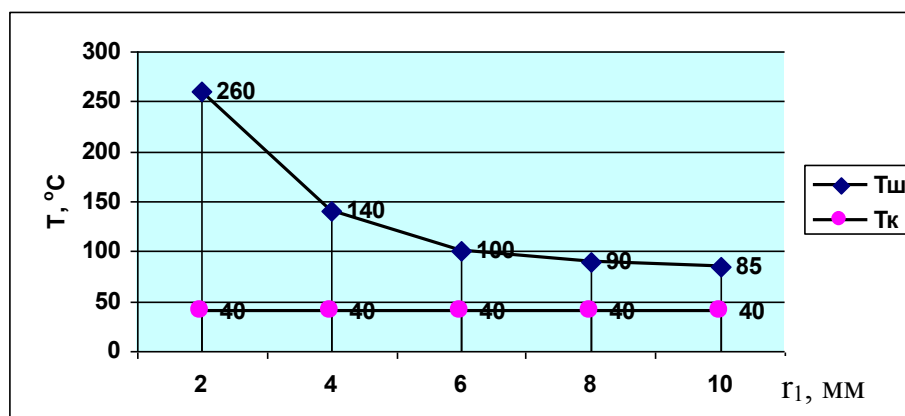


Рис. 4.24. Зависимость температуры от радиуса осевого отверстия шнека

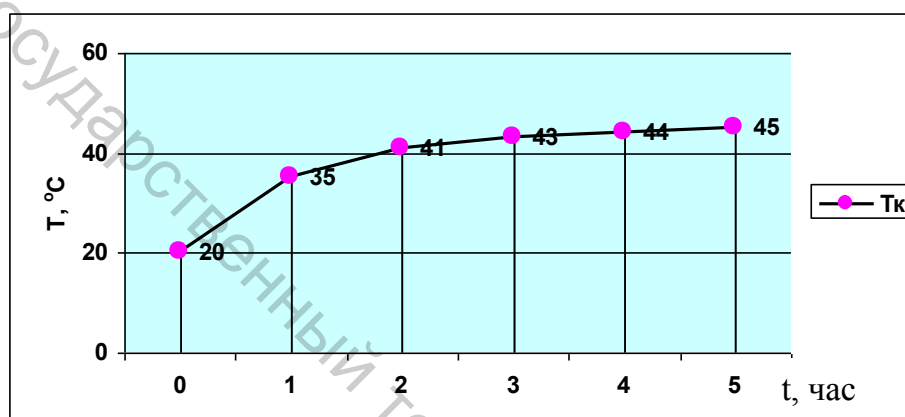


Рис. 4.25. Зависимость температуры внутренней поверхности корпуса от времени работы пресса

Проведенные расчеты показывают, что температурный режим формования сложным образом зависит от многих параметров, которые могут быть разделены на энергосиловые, триботехнические, теплотехнические, геометрические и кинематические. Влияет на свойства материала (а, следовательно, и на все параметры процесса) также время, прошедшее с момента включения пресса. Рис. 4.25 показывает, что при конвективном теплообмене с окружающей средой процесс становится стационарным (при выбранных параметрах) лишь через 3–5 часов. Отсюда можно сделать вывод, что при формовании ППМ в промышленных условиях шнековый пресс лучше не выключать вообще; в противном случае первые несколько часов могут получаться изделия с нестабильными свойствами.

Большинство параметров, участвующих в расчетах в качестве аргументов, непригодны для оперативного управления режимом формования, так как не могут изменяться динамично. Действительно, для изменения геометрических параметров шнека, теплофизических или триботехнических характеристик материалов требуется остановка прессы и замена определенных элементов.

4.3.4. Расчет диапазона рабочих скоростей шнека

Оперативно процессом формования можно управлять, изменяя угловую скорость шнека. Выше было показано, что для обеспечения стабильной работы прессы необходим определенный температурный режим (4.30). Он может быть достигнут правильным выбором угловой скорости шнека. Методику расчета угловых скоростей шнека, обеспечивающих необходимый температурный режим, поясняет Рис. 4.26.

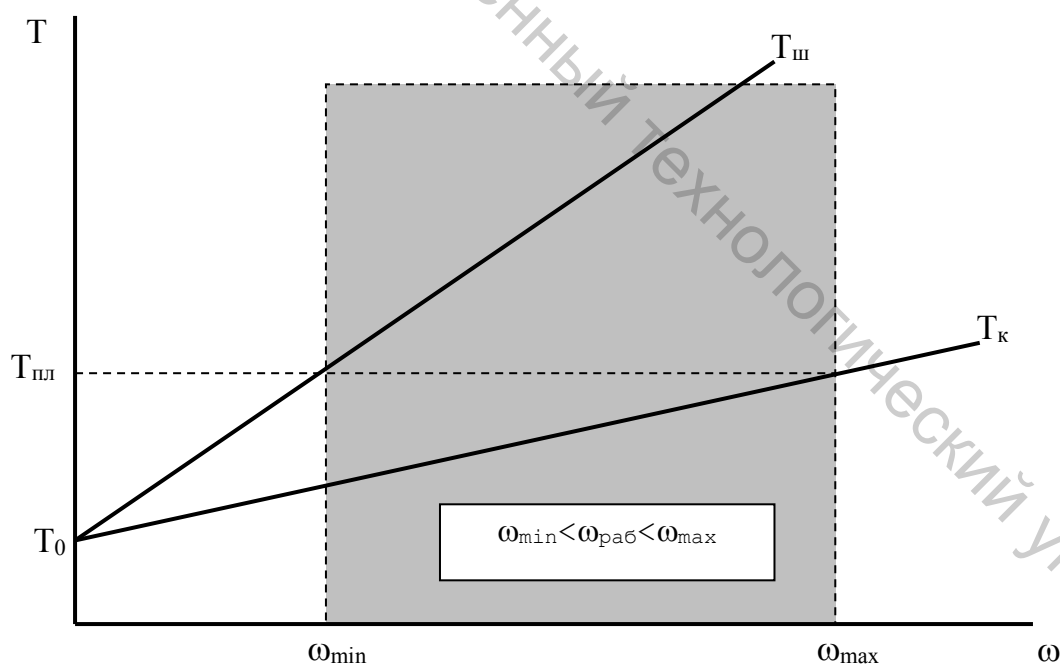


Рис. 4.26. Определение диапазона рабочих скоростей шнека

Рабочий диапазон скоростей шнека ($\omega_{\text{раб}}$) находят по точкам пересечения линий, соответствующих температурам поверхностей шнека ($T_{\text{ш}}$) и корпуса ($T_{\text{к}}$) с температурой плавления ($T_{\text{пл}}$) пластификатора. Если угловая скорость шнека лежит внутри этого диапазона, температурный режим

(4.30) будет обеспечен исключительно за счет процессов тепловыделения, без дополнительного теплового воздействия.

Можно сделать следующий вывод: при проектировании шнекового пресса для формования термопластичных материалов необходимо стремиться к тому, чтобы разница в температурах поверхностей шнека и корпуса была максимально возможной. Шнек при этом, естественно, должен греться сильнее корпуса. Несоблюдение этого условия потребует дополнительного нагрева или охлаждения элементов пресса, что усложнит его конструкцию и сделает процесс формования менее стабильным и более энергоемким.

Граничные значения диапазона допустимых скоростей шнека можно определить, подставив в неравенство (4.30) выражения (4.82) и (4.86) при $r = r_3$ и $r = r_2$ соответственно (а также при $t \rightarrow \infty$). Тогда, с учетом соотношений (4.99) и (4.100), получается

$$\omega_{\min} = \frac{A_u}{f_u p_u} (T_{nl} - T_{0u}) \quad [4.101]$$

$$\omega_{\max} = \min \left[\frac{A_u}{f_u p_u} (T_{kun} - T_{0u}); \frac{A_k}{f_k p_k} (T_{nl} - T_{0k}) \right] \quad [4.102]$$

где A_u и A_k — коэффициенты, зависящие от геометрических и теплофизических параметров шнека и корпуса:

$$A_u = \frac{2k_u \cos \varphi}{r_2 (r_2 + r_3) \left(1 + \frac{r_3 - r_2 - \delta}{2\pi r_2 \sin \varphi} \right) \left(\ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{h_u r_1} \right)} \quad [4.103]$$

$$A_k = \frac{2k_k}{r_3 (r_2 + r_3) \operatorname{tg} \varphi \left(1 - \frac{\delta}{2\pi r_3 \sin \varphi} \right) \left(\ln \frac{r_4}{r_3} + \frac{1}{h_k r_4} \right)} \quad [4.104]$$

Для того чтобы воспользоваться полученными зависимостями, необходимо измерить некоторые характеристики формуемых материалов. Ис-

следованию технологических свойств пластифицированных порошковых материалов посвящена шестая глава.

4.4. АНАЛИЗ ПРИЧИН, ПРИВОДЯЩИХ К СРЕЗУ РЕБЕР

Часто экструзией получают изделия с развитой наружной или внутренней поверхностью (теплообменники, фильтрующие элементы и т.д.). Площадь поверхности увеличивают обычно за счет продольного или винтового оребрения. Прессование изделий с ребрами имеет некоторые особенности, связанные с запретом на вращение материала в зоне формования.

Усилие, препятствующее провороту материала, передается на него через формируемые ребра, что может приводить к их срезанию. Дефекты оребрения — наиболее частый вид брака при формовании изделий с развитой поверхностью. Цель приведенного здесь анализа — найти условия, позволяющие предотвратить срез ребер при формовании.

Расчетная схема изображена на Рис. 4.27.

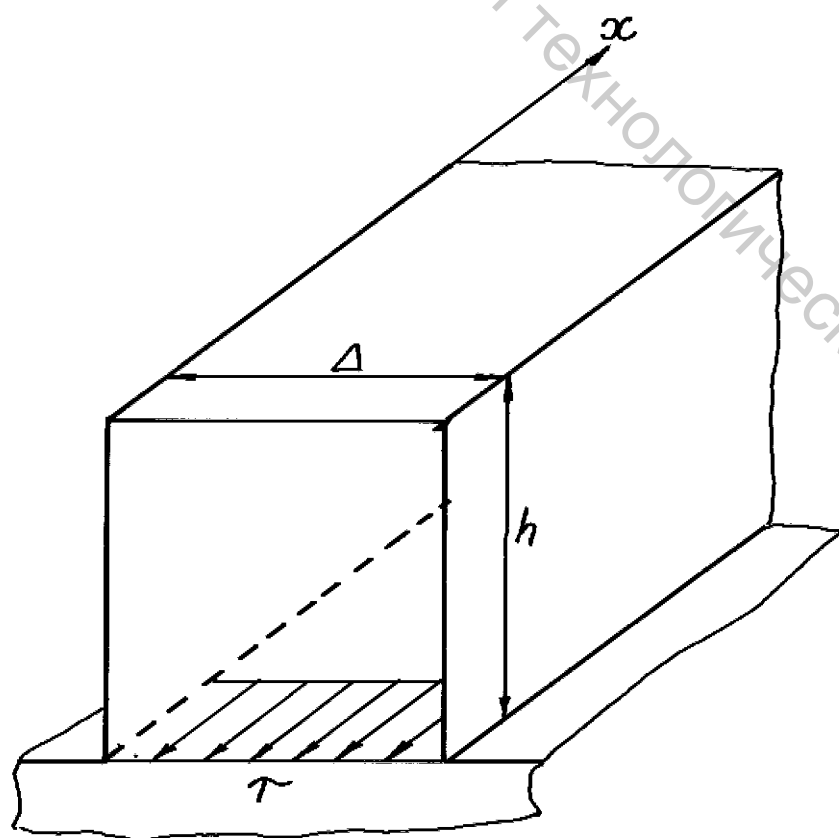


Рис. 4.27. Схема расчета ребра

На боковую поверхность ребра, формируемого в канале матрицы, действует сила трения, вызывающая в материале касательные напряжения τ . Эти напряжения максимальны в месте соединения ребра с прессовкой. Среза ребра не происходит, если касательные напряжения τ не превосходят величины, часто называемой пластической прочностью структуры τ_k :

$$dF_{mp} = \xi f p (2h + \Delta) dx < \Delta \tau_k dx \quad [4.105]$$

где p — давление прессования, f и ξ — коэффициенты внешнего трения и бокового давления соответственно; h и Δ — высота и ширина ребра.

Выражение (4.105) позволяет связать геометрию ребра со свойствами материала:

$$\frac{h}{\Delta} < \frac{1}{2} \left(\frac{\tau_k}{\xi f p} - 1 \right) \quad [4.106]$$

ГЛАВА 5. ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭКСТРУЗИОННОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Полученные в результате теоретического анализа соотношения позволяют проводить проектно-конструкторские расчеты любого экструзионного оборудования: устройств для мундштучного прессования, дисковых и шнековых прессов, сложных комбинированных устройств. После разработки конструкции экструдера появляются все необходимые данные для проектирования технологического процесса по изготовлению конкретного изделия.

В этой главе описаны общие принципы проектирования новых технологических процессов и оборудования для их реализации. Описаны методики конструкторских и технологических расчетов, даны рекомендации, как избежать типичных ошибок при проектировании. Приведен пример конструкторско-технологических расчетов шнекового пресса для формования бронзовых фильтрующих элементов.

5.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Исходные данные для проектирования технологического процесса и оборудования могут быть получены посредством прямого указания, являться результатом выбора, получены расчетным путем или измерены экспериментально.

Прямым указанием задаются размеры, форма, материал, свойства изделий. В результате выбора определяют метод формования, тип пластификатора, способ его введения в порошок и удаления из прессовки. Рассчитывают, например, необходимую концентрацию пластификатора в порошке. Измеряют физические и технологические характеристики материала (триботехнические и реологические константы, предел текучести, структурную прочность). Измеряют также некоторые технологические параметры процесса формования, методика расчета которых отсутствует или дает неудовлетворительные результаты (коэффициенты окружного проскальзывания

материала в шнековом прессе, давления и скорости, используемые как начальные и граничные условия в уравнениях деформации материала).

5.1.1. Постановка задачи и выбор метода формования

Разработать технологию и провести конструкторские расчеты оборудования для изготовления бронзовых фильтрующих элементов, имеющих форму трубок с наружным диаметром 30 мм, внутренним диаметром 20 мм и длиной 100 мм. Тонкость фильтрации — 15...30 мкм. Рабочий перепад давлений — 0.03 МПа, кратковременный перепад давлений — 0.08 МПа.

Такие изделия можно получить методом мундштучного прессования или формованием на шнековом прессе. Мундштучное прессование проще в реализации, но уступает по производительности и качеству (однородности) получаемых прессовок. Этот метод можно рекомендовать для единичного и мелкосерийного производства. Необходимо учесть также наличие гидравлического пресса и рабочей силы необходимой квалификации.

Шнековое формование производительней, позволяет получать высококачественные изделия и обладает высокой степенью автоматизации. Постоянное присутствие рабочего не требуется, необходимо лишь изредка засыпать материал в бункер пресса и визуально контролировать процесс формования. Этот метод рекомендуется для среднесерийного и массового производства.

Проектирование шнекового пресса сложнее, чем прессформы для мундштучного прессования, но содержательнее методически. Так как в задании на проектирование нет указаний на массовость производства, выбираем этот метод формования как наиболее эффективный.

5.1.2. Выбор материалов и пластификация порошка

В качестве основного материала выбираем бронзовый сферический порошок БрОФ-10-1 (ТУ 26-130-76), пластифицирующая добавка — парафин технический очищенный (ГОСТ 9721-71). Для спекания фильтров

понадобятся также окись алюминия (ТУ 6-09-426-75), водород (ГОСТ 3022-80) и азот (ГОСТ 9293-74).

Необходимая концентрация парафина в материале рассчитывается из соображения, что пластификатор должен занимать все межчастичное пространство в порошке, находящемся в состоянии утряски (обосновано выше):

$$V = V_n + V_m \quad (5.1)$$

где V — полный объем материала; V_n и V_m — части этого объема, занимаемые пластификатором и порошковым материалом соответственно.

Так как

$$V = m_m/\rho_y, \quad V_n = m_n/\rho_n, \quad V_m = m_m/\rho_m \quad (5.2)$$

то

$$m_n = m_m \rho_n (1/\rho_y - 1/\rho_m) \quad (5.3)$$

где — масса пластификатора, необходимая для пластификации порошка массой m_m ; ρ_y , ρ_m и ρ_n — плотность утряски, пикнометрическая плотность порошкового материала и плотность парафина соответственно.

Подстановка значений $m_m = 1$ кг, $\rho_n = 0.9$ кг/м³, $\rho_y = 5.1$ кг/м³, $\rho_m = 8.8$ кг/м³ позволяет получить $m_n = 0.074$ кг. На каждый килограмм бронзового порошка необходимо 74 грамма парафина.

Жидкий парафин заливают в порошок и перемешивают смесь до остывания пластификатора. С целью гомогенизации материала его продавливают через мундштук со степенью радиального обжатия около 80%. Затем материал измельчают на специальной дробилке (размер гранул около 5 мм).

Наилучших результатов удается добиться, применяя специальные методы [178] пластификации порошка.

5.1.3. Физические и технологические свойства материала

Гранулометрический состав порошка. Для решения поставленной задачи понадобится фракция -200+160 мкм. Ее можно отсечь с помощью вибросита, используя сетки № 016 и № 020 ГОСТ 3584-73.

Плотности материалов. Пикнометрическая и насыпная плотности порошка, а также плотность литого парафина могут быть взяты из технической документации на эти материалы, из общетехнических справочников (как в предыдущем пункте) или измерены непосредственно по стандартным методикам.

Технологические свойства. Коэффициенты трения, инвариантные к напряжениям триботехнические константы (2.9), предел текучести, уплотняемость и другие характеристики измеряют с помощью методик и устройств, описанных в шестой главе. Необходимые для расчетов значения приведены в соответствующих местах.

5.2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ

Расчетная схема изображена на Рис. 3.3. Параметры калибрующей части матрицы определяются геометрией изделия: $r_1 = 15$ мм, $r_0 = 10$ мм, $z_2 - z_1 = 20$ мм. Угол наклона образующей конуса принят $\alpha = 30^\circ$. Давление p_0 на входе в коническую часть матрицы равно давлению, при котором материал становится несжимаемым (беспористым); необходимость этого обоснована во второй и третьей главах. Оно определено по результатам исследования уплотняемости материалов: $p_0 = 60$ МПа. Предел текучести и коэффициент внешнего трения при этом давлении для выбранного материала равны соответственно $\sigma_s = 12$ МПа и $f = 0.13$.

Радиус входной части конуса рассчитан по формуле, полученной из соотношения (3.46) после подстановки в него соответствующих значений:

$$r_2 = \left[\left(\frac{\sigma_0 + m\sigma_s}{\sigma_1 + m\sigma_s} \right)^{1/n} (r_1^2 - r_0^2) + r_0^2 \right]^{1/2} \quad (5.4)$$

Таблица 5.1 содержит последовательность и результаты расчетов, а
Таблица 5.2 — программу расчетов в среде excel.

Таблица 5.1

Расчет параметров матрицы

Источник	Обозначение параметра	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
Заданные параметры	r_0	Внутренний радиус изделия	м	—	0.01
	r_1	Наружный радиус изделия	м	—	0.015
Произвольно выбранные значения	$z_2 - z_1$	Длина калибрующей части	м	—	0.02
	α	Угол подъема образующей	рад.	$\pi/6$	0.52
Измеренные величины	σ_s	Предел текучести	МПа	—	12
	f	Коэффициент трения	—	—	0.13
	p_0	Критическое давление	МПа	—	60
Результаты вычислений	p	Коэффициент	1/м	(3.52)	30
	σ_1	Напряжение на выходе конуса	МПа	(3.53)	10.40
	k	Коэффициент	—	(3.39)	0.76
	n	Коэффициент	—	(3.44)	0.32
	m	Коэффициент	—	(3.47)	4.08
	r_2	Радиус основания конуса	м	(5.4)	0.030

Таблица 5.2

Программа расчета параметров матрицы

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
r_0	мм	10
r_1	мм	15
$z_2 - z_1$	мм	20
α	рад	0.523333333
σ_s	МПа	12
f	-	0.13
σ_0	МПа	60
p	1/мм	$=2 \cdot E7 \cdot E3 / (E3^2 - E2^2)$
σ_1	МПа	$=E6 \cdot (\exp(E9 \cdot E4) - 1)$
k	-	$=(E7 + \tan(E5)) / (1 - E7 \cdot \tan(E5))$
n	-	$=E11 / \tan(E5) - 1$
m	-	$=(1 + \tan(E5) / E7) / (1 + (\tan(E5))^2)$
r_2	мм	$=((((E8 + E13 \cdot E6) / (E10 + E13 \cdot E6))^{1/E12})) \cdot (E3^2 - E2^2) + E2^2)^{0.5}$

Результаты расчетов схематически изображены на Рис. 5.1.

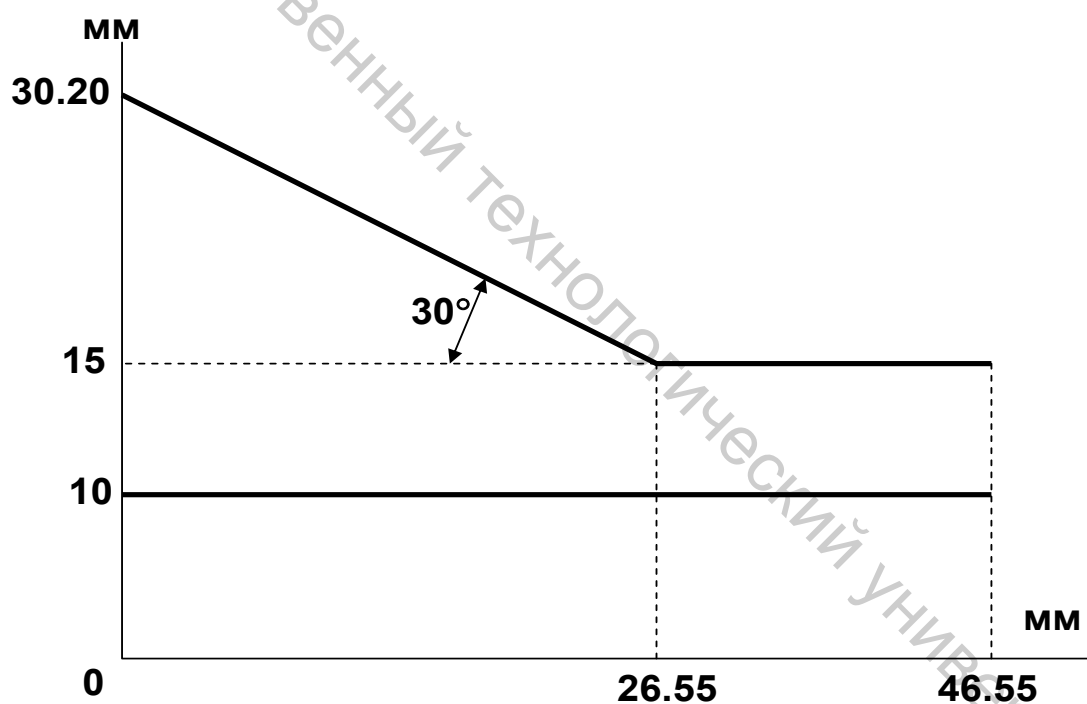


Рис. 5.1. Результаты расчета матрицы

5.3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ШНЕКА

Начинать надо с определения профиля канала. Расчеты по оптимизации профилей выполнены в четвертой главе, воспользуемся этими результатами.

Так как в задании на проектирование ничего не сказано о необходимом распределении пористости в фильтрующих элементах, выбран наиболее технологичный квадратный профиль со стороной 5 мм. Рис. 4.6 показывает, как будут распределены касательные напряжения по глубине канала в этом случае. Такое распределение напряжений ведет к преимущественной пропрессовке внутренних слоев изделия, однако неравномерность плотностей сглаживается последующим радиальным обжатием материала в конической матрице и почти нулевой пористостью спрессованной смеси.

Длина канала, необходимая для создания в матрице давления p_0 , рассчитывается по формуле (3.14). Перед проведением расчетов необходимо измерить триботехнические характеристики a_0, b_0, c_0 и a_1, b_1, c_1 (3.3). Методика и результаты измерений содержатся в шестой главе. Радиус шнека r_2 и давление на выходе из канала p_0 определены при расчете матрицы. Угол подъема канала γ можно выбрать произвольно (лучше из интервала 10...20 градусов). Длина нарезной части шнека рассчитана по формуле

$$L = z_0 \sin \gamma \quad (5.5)$$

а число витков канала равно

$$n = \frac{z_0 \cos \gamma}{2\pi r_2} \quad (5.6)$$

Так рассчитывают рабочее число витков и соответствующую ему длину нарезной части. Надо предусмотреть также транспортирующую часть нарезки, расположенную под бункером пресса и необходимую для захвата материала. Для этого достаточно добавить еще два витка. В энергосиловых расчетах, однако, следует применять рассчитанные по формулам (5.5) – (5.6) значения.

Таблица 5.3 содержит результаты расчета параметров шнека, а Таблица 5.4 — программу расчетов в среде excel.

Таблица 5.3

Расчет параметров канала шнека

Источник	Обозначение параметра	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
Заданные параметры	r_2	Радиус шнека	м	—	0.03
	p_0	Давление на выходе из канала	МПа	—	60
	g	Ускорение свободного падения	м/с ²	—	9.81
Произвольно выбранные значения	H	Глубина и ширина канала	м	—	0.005
	φ	Угол подъема канала	рад.	—	0.4
Измеренные величины	ρ	Плотность свободно-насыпанного материала	кг/м ³	—	2000
	a_0	Коэффициент	МПа	—	0.07
	b_0	Коэффициент	—	—	0.66
	c_0	Коэффициент	1/МПа	—	-0.005
	a_1	Коэффициент	МПа	—	0.02
	b_1	Коэффициент	—	—	0.20
	c_1	Коэффициент	1/МПа	—	-0.006
Результаты вычислений	a	Коэффициент	—	(3.6)	0.001
	b	Коэффициент	—	(3.6)	0.006
	c	Коэффициент	—	(3.6)	0.001
	d	Коэффициент	—	(3.8)	821
	e	Коэффициент	—	(3.9)	-4.44
	f	Коэффициент	—	(3.9)	-0.173
	p_v	Давление на входе канала	Па	(3.13)	98.1
	z_0	Длина канала	м	(3.14)	2.607
	n	Число витков	—	(5.6)	13
	L	Длина шнека	м	(5.5)	0.997

Упрощенную методику расчета параметров шнека можно реализовать на основе соотношений, полученных в четвертой главе.

Таблица 5.4

Программа расчетов параметров шнека

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
r_2	мм	30.19512618
p_0	МПа	60
l_0	мм	2.5
l_1	мм	7.5
H	мм	5
φ	рад.	0.3925
a_0	МПа	0.07
b_0	-	0.66
c_0	1/МПа	-0.005
a_1	МПа	0.02
b_1	-	0.2
g	мм/с ²	9810
c_1	1/МПа	-0.006
ρ	г/мм ³	0.002
a	-	$=(C8*C4-C11*C5)/C6^2$
b	-	$=(C9*C4-C12*C5)/C6^2$
c	-	$=(C10*C4-C14*C5)/C6^2$
d	-	$=((C17^2/(4*C18^2)-C16/C18)^{0.5})/(2*C18)$
e	-	$=-2*C18*C19-C17/(2*C18)$
f	-	$=2*C18*C19-C17/(2*C18)$
p_v	Па	$=C15*C13*C6$
z_0	мм	$=C19*LN(((C3-C20)*(C21-(10^{(-6)})^*C22))/((C21-C3)*((10^{(-6)})^*C22-C20)))$
n	-	$=(C23*\cos(C7))/(2*3.14*C2)$
L	мм	$=C23*\sin(C7)$

5.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА И ОПОР

Для проектирования привода пресса необходимо определить вращающий момент на шнеке, а опоры рассчитывают по осевому усилию, действующему на шнек со стороны материала.

Расчетная схема изображена на Рис. 4.13, момент рассчитывают с помощью соотношений (4.23) – (4.25), а усилия определяют по формулам (4.26) – (4.28).

После адаптации расчетных соотношений для формования трубчатых изделий и переходя к текущим обозначениям, можно записать

$$M_1 = \frac{1}{A} \xi f l_{\kappa} r_2 (1 - e^{-Az_0}) \cos \alpha p_0 \quad (5.7)$$

$$M_2 = \frac{2}{3} \pi p_0 f_w \left[(r_2 - l_k)^3 - r_0^3 \right] \quad (5.8)$$

$$P_1 = \frac{1}{A} \xi f_k l_k p_0 (1 - e^{-Az_0}) \quad (5.9)$$

$$P_2 = \pi p_0 \left[(r_2 - l_k)^2 - r_0^2 \right] \quad (5.10)$$

Таблица 5.5 содержит программу вычислений в среде excel, а Таблица 5.6 — последовательность и результаты расчетов.

Таблица 5.5

Программа силовых расчетов

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
r_2	мм	30.19512618
p_0	МПа	60
l_k	мм	5
l_w	мм	15
φ	рад.	0.3925
α	рад.	1.046666667
f_k	-	0.3
f_w	-	0.2
ξ	-	0.8
g	мм/с ²	9810
z_0	мм	2607
ρ	г/мм ³	0.002
A	1/мм	=(D10/25)*(D9*D5-D8*D4*COS(D7+D6))
M_1	Н*м	=(10^(-3))*(D10*D8*D4*D2*(COS(D7))*D3*(1-EXP(-D14*D12)))/D14
M_2	Н*м	=(10^(-3))*(2/3)*3.14*C3*C9*((C2-C4)^3-10^3)
M	Н*м	=C15+C16
P_1	Н	=(C10*C8*C4*C3*(1-EXP(-C14*C12)))/C14
P_2	Н	=3.14*C3*((C2-C4)^2-10^2)
P	Н	=C18+C19

Основные усилия и моменты приложены к торцу шнека. Это наблюдение помогает упростить проверочные расчеты на прочность, которые необходимо провести после силовых расчетов.

Методики проведения прочностных расчетов, проектирования привода и расчета опор стандартизованы и здесь не приводятся. Необходимо отметить, что на шнек действует мощное осевое усилие — около 10 тонн — поэтому опоры понадобятся прочные.

Таблица 5.6

Расчет моментов и усилий на шнеке

Источник	Обозначение параметра	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
Заданные параметры	r_2	Радиус шнека	м	—	0.030
	p_0	Давление на выходе из канала	МПа	—	60
	ρ	Плотность свободно-насыпанного материала	кг/м ³	—	2000
	l_k	Ширина и глубина канала	м	—	0.005
	$l_{ш}$	Профиль канала	м	$3 \cdot l_k$	0.015
	z_0	Длина канала	м	—	2.607
	φ	Угол подъема канала	рад.	$\pi/8$	0.4
	α	Угол окружного проскальзывания	рад.	$\pi/3$	1.047
	g	Ускорение свободного падения	м/с ²	—	9.81
Измеренные величины	f_k	Коэффициент трения о корпус	—	—	0.3
	$f_{ш}$	Коэффициент трения о шнек	—	—	0.2
	ξ	Коэффициент бокового давления	—	—	0.8
Результаты вычислений	A	Коэффициент	1/м	(4.19)	90
	M_1	Момент на боковой поверхности	кН*м	(5.7)	12.1
	M_2	Момент на торце	кН*м	(5.8)	37.7
	M	Момент на шнеке	кН*м	(4.23)	49.8
	P_1	Усиление на боковой поверхности	кН	(5.9)	8.1
	P_2	Усиление на торце	кН	(5.10)	101
	P	Усиление на шнеке	кН	(4.26)	109

5.5. РАСЧЕТ ДОПУСТИМЫХ СКОРОСТЕЙ ШНЕКА И НЕОБХОДИМОЙ МОЩНОСТИ

Теория, на основе которой построена предлагаемая методика, содержится в разделе 4.3. Расчет заключается в нахождении диапазона скоростей шнека, обеспечивающих необходимый для формирования тепловой режим (4.30). Нижняя и верхняя границы этого диапазона получены подстановкой в формулы (4.101) – (4.104) текущих обозначений:

$$\omega_{\min} = \frac{A_u}{f_u p_0} (T_{\text{пл}} - T_0) \quad \omega_{\max} = \frac{A_\kappa}{f_\kappa p_0} (T_{\text{пл}} - T_0) \quad (5.11)$$

где T_0 — температура окружающей среды; $T_{\text{пл}}$ — температура плавления парафина; A_u и A_κ — коэффициенты, зависящие от геометрических параметров шнека и корпуса, а также теплофизических характеристик материалов, из которых они изготовлены:

$$A_u = \frac{2k_u \cos \varphi}{(r_2 - l_\kappa)(2r_2 - l_\kappa) \left(1 + \frac{l_\kappa - \delta}{2\pi(r_2 - l_\kappa) \sin \varphi} \right) \left(\ln \frac{r_2 - l_\kappa}{r_1} + \frac{1}{h_u r_1} \right)} \quad (5.12)$$

$$A_\kappa = \frac{2k_\kappa}{r_2(2r_2 - l_\kappa) \operatorname{tg} \varphi \left(1 - \frac{\delta}{2\pi r_2 \sin \varphi} \right) \left(\ln \frac{r_4}{r_2} + \frac{1}{h_\kappa r_4} \right)} \quad (5.13)$$

Таблица 5.7 содержит результаты расчетов, а Таблица 5.8 — программу вычислений. Минимальная допустимая частота вращения шнека, полученная в результате расчетов, составляет около 0.5 об/мин., а максимальная — около 4 об/мин.

Значительно расширить технические возможности пресса позволит конструкция с принудительным охлаждением шнека. Малый рабочий диапазон скоростей шнека связан с низкой температурой плавления парафина. Увеличить производительность без дополнительного охлаждения шнека позволит более тугоплавкий пластификатор.

Таблица 5.7

Расчет допустимых скоростей шнека

Источник	Обозначение параметра	Название параметра	Размерность	Формула	Значение
Заданные параметры	r_2	Радиус шнека	м	—	0.03
	r_1	Радиус отверстия в шнеке	м	—	0.01
	r_4	Радиус корпуса	м	—	0.04
	p_0	Давление на выходе из канала	МПа	—	60
	δ	Толщина винтового гребня	м	—	0.003
	l_k	Ширина и глубина канала	м	—	0.005
	φ	Угол подъема канала	рад.	$\pi/8$	0.4
	$T_{пл}$	Температура плавления парафина	К	—	323
	T_0	Начальная температура шнека и корпуса	К	—	293
	$k_{ш}, k_k$	Коэффициент теплопроводности шнека и корпуса	Вт/мК	—	45.5
	$\alpha_{ш}; \alpha_k$	Коэффициент теплоотдачи корпуса и шнека	Вт/м ² К	—	20
Измеренные величины	f_k	Коэффициент трения о корпус	—	—	0.3
	$f_{ш}$	Коэффициент трения о шнек	—	—	0.2
	ξ	Коэффициент бокового давления	—	—	0.8
Результаты вычислений	$h_{ш}, h_k$	Коэффициенты	1/м	α/k	0.44
	$A_{ш}$	Коэффициент	Н/м ² сК	(5.12)	25908
	A_k	Коэффициент	Н/м ² сК	(5.13)	243182
	ω_{min}	Минимальная угловая скорость	рад/с	(5.11)	0.065
	ω_{max}	Максимальная угловая скорость	рад/с	(5.11)	0.405

Расчет скоростей шнека

Обозначение	Размерность	Исходные данные и расчетные формулы
Γ_2	м	0.03
Γ_1	м	0.01
Γ_4	м	0.04
p_0	МПа	60
δ	м	0.003
l_k	м	0.005
φ	рад	$\approx 3.14/8$
$T_{пл}$	К	323
$k_{ш}, k_k$	Вт/мК	45.5
$\alpha_{ш}, \alpha_k$	Вт/Км2	20
f_k	-	0.3
$f_{ш}$	-	0.2
ξ	-	0.8
T_0	К	293
$h_{ш}, h_k$	1/м	$= C11/C10$
$A_{ш}$	Н/м ² сК	$= (2 \cdot C10 \cdot \cos(C8)) / ((C2 - C7) \cdot (2 \cdot C2 - C7) \cdot (1 + (C7 - C6) / (2 \cdot 3.14 \cdot (C2 - C7) \cdot \sin(C8))) \cdot (\ln((C2 - C7)/C3) + 1 / (C16 \cdot C3)))$
A_k	Н/м ² сК	$= (2 \cdot C10) / ((C2 \cdot (2 \cdot C2 - C7) \cdot \tan(C8) \cdot (1 - (C6 / (2 \cdot 3.14 \cdot C2 \cdot \sin(C8)))) \cdot (\ln(C4/C2) + 1 / (C16 \cdot C4)))$
ω_{min}	рад/с	$= (C17 \cdot (C9 - C15)) / (C13 \cdot C5 \cdot 10^6)$
ω_{max}	рад/с	$= (C18 \cdot (C9 - C15)) / (C12 \cdot C5 \cdot 10^6)$

Мощность на шнеке рассчитывают по формуле

$$N = M \omega_{max} \quad (5.14)$$

Подстановка найденных значений дает

$$N = 49.8 \cdot 0.405 = 20.17 \text{ кВт} \quad (5.15)$$

Таким образом, в результате аналитических исследований создана теоретическая база, позволяющая проводить проектные расчеты технологических процессов и формирующего оборудования.

ГЛАВА 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Описанные выше теоретические построения и методики полезны практически только в том случае, если все параметры, входящие в расчетные соотношения, известны. Эти параметры можно взять из научно-технических публикаций или измерить самостоятельно. Все они связаны с технологическими свойствами формуемых материалов.

Технологические свойства высокопластифицированных порошковых композиций, подвергаемых холодной экструзии, сильно отличаются как от свойств порошков, так и от свойств термопластов. Это новый, практически не изученный класс материалов, сочетающих сыпучесть со способностью к пластическому течению при сравнительно небольших давлениях и температурах.

Важными характеристиками пластифицированных порошковых материалов являются предел текучести и структурная прочность — свойства, характеризующие скорее вязкопластичные, а не порошковые среды. Технологические свойства, которые необходимо исследовать для проведения расчетов с помощью полученных выше соотношений, можно разделить на три группы: уплотняемость, триботехнические характеристики и пластические свойства.

Под уплотняемостью понимается зависимость плотности материала от вида напряженного состояния и температуры. Триботехнические характеристики — это коэффициенты внутреннего и внешнего трения, а также инвариантные к напряжениям триботехнические константы. Из пластических характеристик особый интерес представляют предел текучести и структурная прочность материала.

В этой главе описаны методы измерения основных технологических характеристик пластифицированных порошковых материалов и используемое для этого оборудование, а также приведены результаты измерений.

6.1. ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Для исследования технологических свойств ППМ использовался, кроме стандартного оборудования, ряд оригинальных приборов: порошковый трибометр, капиллярный вискозиметр, комплект прессформ для исследования уплотняемости, устройство для измерения коэффициентов бокового давления и конический пластомер.

При проведении экспериментов применялись также рычажный, винтовой и гидравлический прессы, термостат, металлографический микроскоп и другое лабораторное оборудование.

6.1.1. Порошковый трибометр и измерение триботехнических характеристик

Трибометр [286] предназначен для измерения коэффициентов внутреннего и внешнего трения порошковых материалов, а также исследования зависимости этих коэффициентов от напряженного состояния и температуры. Кроме того, прибор позволяет измерять триботехнические константы, используемые в нелинейных законах трения.

Схема трибометра изображена на Рис. 6.1. Прибор содержит станину, механизм нагружения, измерительный узел и механизм вращения подвижных деталей. Прибор полностью автономен и не нуждается во внешних источниках усилий.

Станина прибора состоит из верхней 1 и нижней 2 плит, соединенных между собой стойками 3. На верхней плите закреплен механизм нагружения, а на нижней установлен измерительный узел. Механизм нагружения выполнен в виде рычага 4, на котором шарнирно закреплен боек 5, передающий усилие на измерительный узел трибометра своей сферической поверхностью. Усилие к рычагу прикладывается с помощью подвески 6 с гирями 7. Передаточное отношение рычага может изменяться в пределах от 1:50 до 1:10 с интервалом 1/50 (то есть можно выбрать одно из пяти передаточных отношений: 1:50, 1:25, 3:50, 2:25 и 1:10). Для этого предусмотрена возможность дискретного перемещения бойка вдоль рычага

с интервалом 10 мм (измерительный узел при этом перемещается на соответствующее расстояние по нижней плите).

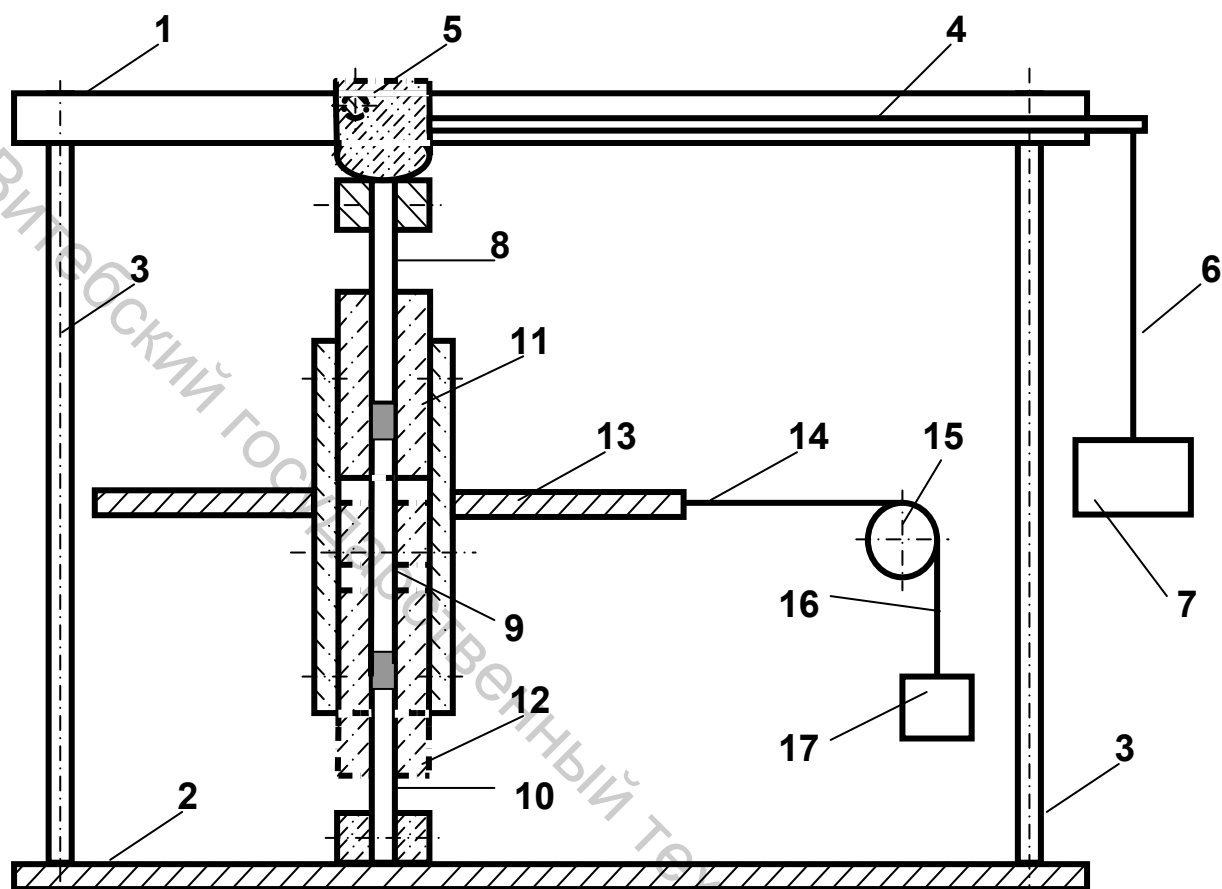


Рис. 6.1. Схема трибометра

Измерительный узел состоит из трех пуансонов (верхнего 8, среднего 9 и нижнего 10) и двух матриц (верхней 11 и нижней 12). Средний пуансон выполнен двухсторонним и сопрягается сразу с двумя матрицами. Такая конструкция позволяет исключить использование опорного подшипника и повысить точность измерений. Пуансоны и матрицы изготовлены из одного и того же материала и имеют одинаковую шероховатость; это обеспечивает схожие условия трения на всех контактных поверхностях, что необходимо при некоторых измерениях. Прибор снабжен двумя комплектами пуансонов: с гадкими и рифлеными торцами (для исследования внешнего и внутреннего трения соответственно).

Механизм вращения подвижных элементов состоит из диска 13, троса 14, блока 15 и подвески 16 с грузами 17. Ступица диска может закреп-

ляться на любом из пяти подвижных элементов с помощью штифта. Блок установлен с возможностью поворота, что облегчает переналадку прибора при изменении передаточного отношения нагружающего рычага.

Исследование внешнего трения проводят с помощью гладких (нерифленых) пуансонов. Порции исследуемого материала помещают в верхнюю и нижнюю матрицы (использование двух засыпок позволяет отказаться от опорного подшипника и увеличить точность измерений). С помощью рычажного пресса собранный прибор нагружают осевым усилием P_z , создающим в материале нормальные напряжения $\sigma = P_z / \pi R^2$. К среднему пуансону через диск прикладывают усилие F , создающее вращающий момент FR (R – радиус диска), достаточный для поворота пуансона. Этот момент уравнивается силой трения материала о торцы пуансона:

$$FR = 4\pi\tau \int_0^r r^2 dr \quad (6.1)$$

где r — радиус пуансонов.

Отсюда находят касательные напряжения на поверхности трения:

$$\tau = 3FR / 4\pi r^3 \quad (6.2)$$

и коэффициент внешнего трения

$$f = \tau / \sigma = 3FR / 4P_z r \quad (6.3)$$

Исследование внешнего трения на боковой поверхности прессовки проводят с помощью рифленых пуансонов, что исключает нежелательный в этом случае проворот материала. Средний пуансон и нижняя матрица при проведении таких измерений могут отсутствовать, тогда верхняя матрица сопрягается непосредственно с нижним пуансоном.

При сведенных пуансонах устанавливают нуль на индикаторе часового типа, регистрирующем высоту прессовки (на схеме не показан). Затем снимают верхний пуансон и в матрицу засыпают порцию материала. После этого прикладывают необходимое давление и делают выдержку для выхода газов. Через тросик к диску прикладывают момент, необходимый для про-

ворота матрицы. Этот момент уравнивается трением материала о боковую поверхность матрицы:

$$FR = 2\pi r^2 h \tau \quad [6.4]$$

где h — высота прессовки в момент измерения.

Отсюда находят касательные напряжения, действующие на боковой поверхности прессовки. Внутреннее (межчастичное) трение исследуют также, как и внешнее, но с использованием рифленых пуансонов. Методика измерения коэффициентов трения подробно описана в работах [257, 287].

Для пластифицированных порошковых материалов связь между касательными и нормальными напряжениями не может быть выражена многочленом первой степени [261 – 262]. Для нахождения триботехнических констант в полиноме (3.1) применяется следующая методика. Сначала последовательно проводят три измерения касательных напряжений при разных нагрузках:

$$\tau_i = a + b\sigma_i + c\sigma_i^2; \quad i = 1, 2, 3 \quad [6.5]$$

Затем полученную систему уравнений решают относительно коэффициентов a , b и c . Подробнее конструкция прибора и методика проведения триботехнических исследований описаны в статьях [263, 288].

6.1.2. Капиллярный вискозиметр и реологические исследования

Капиллярный вискозиметр представляет собой миниатюрную пресс-форму для мундштучного формования с комплектом сменных мундштуков. Каждый мундштук имеет калиброванное цилиндрическое отверстие и коническую часть с заданным углом. При измерениях пластифицированный порошковый материал продавливают через мундштук, регистрируя различные параметры процесса (усилие выдавливания, скорость истечения материала и др.). Подобные устройства широко используют для проведения реологических исследований (см. 2.3.4).

Возможности вискозиметра не исчерпываются измерением реологических характеристик. Предложен способ [264], позволяющий измерять коэффициенты внешнего и межчастичного трения, а также предел текучести материала непосредственно в процессе экструзии. Методика проведения этих измерений следующая. Материал последовательно трижды продавливают через мундштуки с разными углами конуса γ_1 , γ_2 и γ_3 . Размер отверстия, материал и чистота поверхности у мундштуков должны быть одинаковы. При этом каждый раз регистрируют усилия P_1 , P_2 и P_3 , при которых начинается истечение материала через очко мундштука.

Первые два измерения проводят с мундштуками, имеющими углы наклона образующей конической части меньшими угла естественного течения γ_T материала: $\gamma_1 < \gamma_2 < \gamma_T$. Для определенности, с достаточной для практики точностью, можно считать, что $\gamma_T = 45^\circ$. В результате получается система двух уравнений

$$P_i = \sigma_s S \left(\frac{f_e}{\sin \gamma_i} + \frac{2}{1 + \cos \gamma_i} \right) \ln \frac{S}{s}; \quad i = 1, 2 \quad (6.6)$$

где S и s — площади поперечного сечения на входе и выходе мундштука соответственно; σ_s — предел текучести материала; f_e — коэффициент трения материала о поверхность мундштука (коэффициент внешнего трения).

Полученная система двух линейно независимых уравнений может быть решена относительно σ_s и f_e . Третье измерение проводят с мундштуком, имеющим угол подъема образующей конической части $\gamma_3 > \gamma_T$. При этом выдавливание сопровождается трением по поверхности, находящейся внутри материала и соответствующей углу естественного течения γ_T , а в уравнении (6.6) появляется коэффициент межчастичного трения f_m :

$$P_i = \sigma_s S \left(\frac{f_m}{\sin \gamma_T} + \frac{2}{1 + \cos \gamma_T} \right) \ln \frac{S}{s} \quad (6.7)$$

6.1.3. Методика исследования уплотняемости материалов

Под уплотняемостью материала понимают зависимость его плотности от напряженного состояния. Обычно это исследование проводят, сжимая порошок в закрытой прессформе. Более сложное напряженное состояние возникает в материале при дополнительном приложении поперечных напряжений.

Для пластифицированного порошка такие характеристики, как пресуемость и формуемость, теряют свою актуальность. Действительно, с увеличением концентрации пластификатора в порошке нижний предел формуемости стремится к нулю, а верхний — к бесконечности. Другими словами, связная прессовка, обладающая достаточной для транспортировки прочностью, получается практически при любом давлении, а перепрессовать материал до получения в нем дефектов не удастся.

Пластифицированный порошковый материал в общем случае состоит из частиц порошка, твердого или жидкого пластификатора и газовой фазы. Газы могут находиться в свободном состоянии, образуя т.н. пористость, внутри частиц порошка и внутри пластификатора. Способность материала к уплотнению определяется возможностью выдавливания из него газовой фазы при приложении нагрузки, а также упругой деформацией остающихся газов. Упругая деформация твердых и жидких составляющих при рассматриваемых нагрузках (до 100 МПа) невелика.

Жидкие пластификаторы содержат незначительное количество газов и могут считаться несжимаемыми в широком диапазоне давлений. Твердые пластификаторы, как правило, содержат заметное количество газовой фазы и их уплотняемостью пренебрегать нельзя. Так, наиболее распространенный пластификатор — парафин — в твердом состоянии уплотняется почти на четверть, в то время как жидкий парафин практически несжимаем.

Исследование уплотняемости порошков обычно проводят с использованием сложного оборудования, оснащенного встроенными микропроцессорами [289]. Попутно измеряют усилие выталкивания, коэффициенты

трения и бокового давления, работу прессования. Изучение особенностей уплотнения материала при сложнапряженном состоянии проводят на приборе для трехосного сжатия образца [290]. Здесь описана более простая методика, позволяющая исследовать уплотняемость как при одноосном нагружении, так и при сложном напряженном состоянии.

Плотность пластифицированного порошка удобно выражать в процентах от плотности ρ_k беспористой (компактной) прессовки, которая рассчитывается по формуле

$$\rho_k = (w_{nl} / \rho_{nl} + w_q / \rho_q)^{-1} \quad (6.8)$$

где w_{nl} и w_q — массовый процент пластификатора и частиц в материале соответственно; ρ_{nl} и ρ_q — плотность материала пластификатора и материала частиц порошка.

Уплотняемость материала исследовалась с помощью прибора, схема которого изображена на Рис. 6.1. Методика проведения этого исследования следующая.

Сначала измеряют зависимость плотности от давления при одноосном нагружении материала. Для этого две засыпки порошка уплотняют последовательно нарастающим усилием, периодически регистрируя это усилие и соответствующую ему высоту прессовок. Нагружение прекращают, когда высота образца перестает изменяться. Затем, по известной массе засыпок и их высоте, для каждого измерения вычисляют плотность материала и строят кривую уплотнения, представляющую собой зависимость плотности материала от приложенного давления. Использование двух засыпок позволяет повысить надежность эксперимента: возникновение внештатной ситуации (перекос одного из пуансонов, попадание посторонних предметов в материал и т.д.) приводит к получению сильно различающихся по высоте прессовок и может быть легко зарегистрировано визуально.

Затем напряженное состояние усложняют. Для этого к среднему пуансону прикладывают вращающий момент с помощью диска 13, тросика

14, блока 15 и подвески 16 с грузами 17. Описанную выше последовательность действий повторяют для разных касательных напряжений, получая зависимость плотности материала от различных напряженных состояний.

6.1.4. Методика измерения коэффициентов бокового давления

Как уже отмечалось, существующие методы измерения коэффициентов бокового давления, основанные на использовании тензодатчиков, для пластифицированных порошковых материалов не эффективны. Поэтому был предложен способ определения коэффициента бокового давления [291], не использующий тензометрию и лишенный указанных недостатков. Рис. 6.2 поясняет разработанную методику.

Измерение производят в два этапа. Сначала (а) снимают зависимость произведения $f_n \sigma_{11}$ от давления прессования σ_{11} :

$$f_n \sigma_{11} = F(\sigma_{11}) \quad [6.9]$$

где f_n — коэффициент трения материала о пуансон.

Функцию F находят аппроксимацией или просто строят график и используют его при дальнейших расчетах.

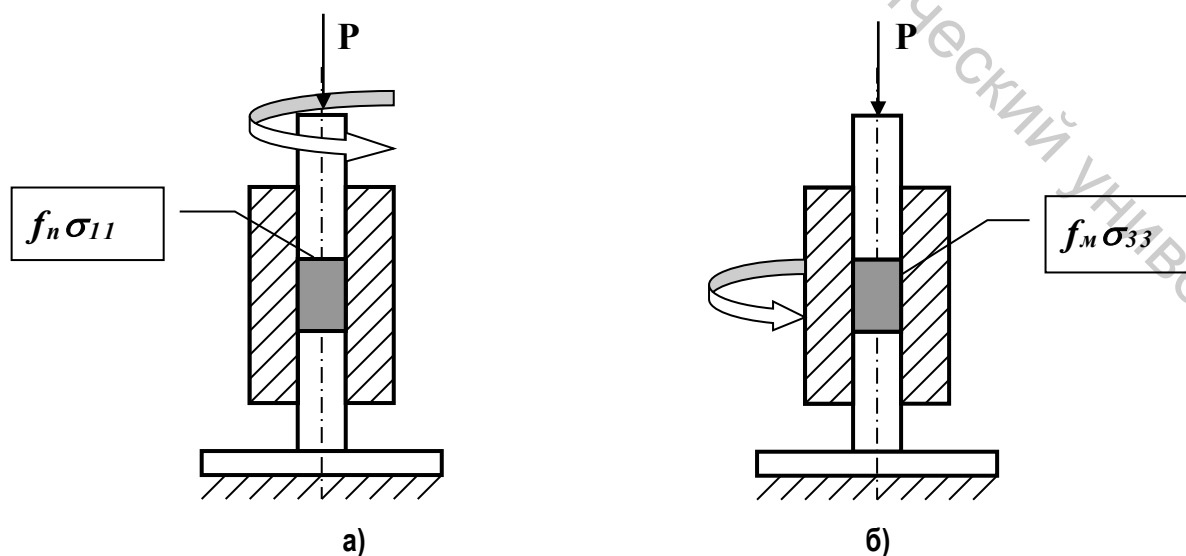


Рис. 6.2. Схема измерения коэффициента бокового давления

На первом этапе необходимо обеспечить неподвижность материала относительно нижнего пуансона и матрицы. Для этого используют нижний пуансон с рифленным торцом. Если в процессе измерения матрица остается неподвижной, то можно считать, что материал зафиксирован.

Затем (6) измеряют сопротивление вращению матрицы при тех же нагрузках и для каждой из них вычисляют произведение

$$f_m \sigma_{33} = M/2V \quad (6.10)$$

где f_m — коэффициент трения материала о матрицу; σ_{33} — давление материала на поверхность матрицы; M — момент, необходимый для начала вращения матрицы; V — объем, занимаемый материалом в момент измерения. Это выражение получено из условия равновесия

$$M = \tau S_\delta = 2f_m \sigma_{33} V \quad (6.11)$$

где $\tau = f_m \sigma_{33}$ — касательные напряжения, действующие на боковой поверхности материала при вращении матрицы; $S_\delta = 2\pi r h$ — площадь этой поверхности в момент измерения; r — радиус пуансонов; h — текущая высота прессовки.

Таким образом, кроме усилия прессования P и сопротивления вращению матрицы M , необходимо также измерять текущую высоту прессовки h .

Важным условием правильного измерения является равенство коэффициентов трения материала о матрицу и верхний пуансон. Эти детали должны быть изготовлены из одного и того же материала и иметь одинаковую шероховатость поверхности. Если это условие соблюдается, зависимости $f_n \sigma_{11} = F(\sigma_{11})$ и $f_m \sigma_{33} = F(\sigma_{33})$ будут идентичными, то есть функция F и в том, и в другом случае одна и та же. В этом случае можно упростить обозначения:

$$f\sigma = f_n \sigma_{11} = f_m \sigma_{33} = F(\sigma) \quad (6.12)$$

где $f\sigma$ — произведение, характеризующее воздействие материала на произвольную поверхность, имеющую те же характеристики, что и поверхности деталей прессформы (верхнего пуансона и матрицы). Рис. 6.3 схематически отображает зависимость $f\sigma = F(\sigma)$:

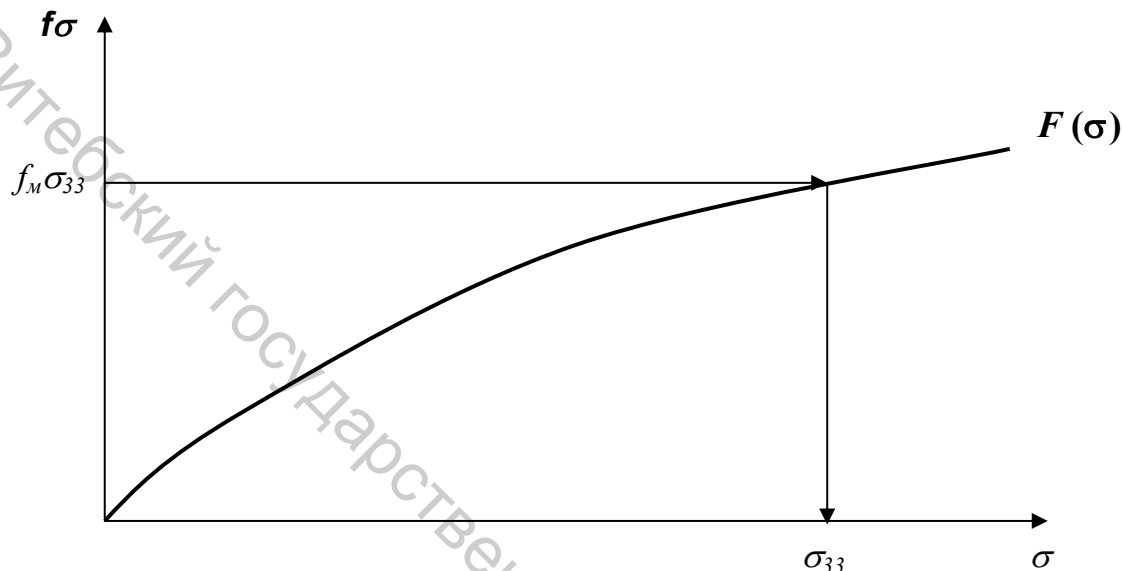


Рис. 6.3. Зависимость произведения $f\sigma$ на поверхности трения от давления материала на эту поверхность

График $f\sigma = F(\sigma)$ позволяет определить давление материала на любую поверхность, если известно произведение $f\sigma$ на этой поверхности. В частности, можно найти боковое давление σ_{33} и соответствующий коэффициент бокового давления. Если для функции F подобрана соответствующая аппроксимация, то эта задача может быть решена аналитически.

6.1.5. Конический пластомер и исследование структурной прочности

Структурная прочность представляет собой максимальное из возможных касательных напряжений в материале. Схема ее измерения изображена на Рис. 6.4.

Конический индентор 1 внедряется под действием усилия F в образец 2, находящийся в цилиндрической матрице 3. Чтобы приблизить напряженное состояние в материале к рабочему, образец сжимают усилием P с помощью пуансонов 4. Эта нагрузка может быть приложена как по оси

Рис. 6.4. Схема из

После извлечения индентора определяют диаметр d отпечатка

$$h = \frac{d}{2} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$$

где φ — угол при вершине конуса индентора.

Прочность структуры определяют по формуле

$$\tau_m = \frac{\cos^2 \varphi / 2}{\pi \operatorname{tg} \varphi / 2} \frac{F}{h^2}$$


Измерения структурной прочности

тора с помощью измерительного микроскопа
ка и вычисляют глубину погружения конуса:

[6.13]

ука.

пределяют по формуле

(6.14)

Модель напряжений в месте внедрения конуса

$$\sigma = \frac{4P}{\pi D^2}; \quad \tau = \frac{32}{3} \frac{x_0 P}{l D^2} \left[1 - \left(1 - \frac{2h}{D} \right)^2 \right] \quad (6.15)$$

где D и l — диаметр и длина образца соответственно; x_0 — радиальное смещение сферических элементов. Изменяя x_0 и P , варьируют напряженное состояние в месте измерения структурной прочности.

6.1.6. Материалы для экспериментальных исследований

Технологические свойства исследованы для различных порошковых материалов: медного порошка ПМС-1 (ГОСТ 4960-75), железного порошка ПЖ4МЗ (ГОСТ 9849-74), бронзового порошка БрОФ-10-1 (ТУ 26-130-76), порошка твердого сплава ВК8 (ГОСТ 3882-74) и вольфрамового порошка марки ПВН (ТУ 563-62). В качестве пластификатора использован парафин технический очищенный (ГОСТ 9721-71).

Частицы выбранных для исследований порошков имеют разную плотность, поэтому сравнивать полученные результаты удобнее, если содержание пластификатора в порошке выражено в объемных процентах. Однако при пластификации материалов расчеты проводят обычно в массовых процентах, так как массу легче измерять.

Связь между объемной и массовой концентрацией задается соотношением (6.16). Под объемной концентрацией понимается отношение объема, занимаемого пластификатором, к объему всей прессовки, уплотненной до беспористого состояния.

$$\frac{1}{\beta} = 1 + \frac{\rho_1}{\rho_2} \left(\frac{1}{\gamma} - 1 \right) \quad (6.16)$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотность пластификатора и пикнометрическая плотность порошка соответственно; β и γ — объемная и массовая концентрации пластификатора в порошке:

$$\beta = \frac{V_1}{V_1 + V_2}; \quad \gamma = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \quad (6.17)$$

где V_1 и V_2 — объем пластификатора и суммарный объем всех частиц порошка; m_1 и m_2 — соответственно масса пластификатора и масса порошкового материала в шихте.

Таблица 6.1 содержит плотности материалов, использованные при расчетах. Таблица 6.2 показывает связь объемной и массовой концентрации парафина в различных порошковых материалах. Необходимо отметить, что утверждение о несжимаемости парафина не подтверждается экспериментально. Поэтому в формулу (6.16) подставлено не справочное значение плотности (900 т/м³), а реальная плотность спрессованного парафина (1100 т/м³).

Таблица 6.1

Плотность исследуемых материалов, т/м³

Плотность	ПМС-1	ПЖ4МЗ	ПХ-30	БрОФ-10-1	ВК8	ПВН	Парафин
Насыпная	1700	2500	2000	2800	3700	4400	900*
Пикнометрическая	8700	7650	7600	8600	10500	17300	1100**

Примечание. * — литой парафин, ** — уплотненный до несжимаемого состояния парафин (это значение использовано в расчетах).

Таблица 6.2

Связь между объемной и массовой концентрацией парафина в различных порошках

Объемная концентрация, %	Массовая концентрация, %					
	ПМС-1	ПЖ4МЗ	ПХ-30	БрОФ-10-1	ВК8	ПВН
10	1,4	1,6	1,6	1,4	1,2	0,7
20	3,1	3,5	3,5	3,1	2,6	1,6
30	5,1	5,8	5,8	5,2	4,3	2,7
40	7,8	8,7	8,8	7,9	6,5	4,1
50	11,2	12,6	12,6	11,3	9,5	6,0

Ниже будет показано, что для обеспечения возможности экструзии в порошок необходимо добавить около 40% об. пластификатора. Массовая концентрация пластификатора при этом для исследованных материалов колеблется от 4 до 9 процентов.

6.2. УПЛОТНЯЕМОСТЬ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Уплотняемость материалов исследовалась в зависимости от давления прессования, дополнительно приложенных касательных напряжений τ (действующих в плоскости, перпендикулярной направлению прессования) и концентрации пластификатора в порошке.

6.2.1. Уплотняемость при одноосном сжатии

Сравнение уплотняемости непластифицированных (Таблица 6.3) и пластифицированных (Таблица 6.4 — Таблица 6.8) порошков позволяет сделать следующие выводы.

Уплотняемость высокопластифицированных композиций, подвергаемых холодной экструзии (содержащих парафина около 40% по объему), принципиально отличается от уплотняемости непластифицированных порошковых материалов. Уже при сравнительно невысоких давлениях (100...150 МПа) такой материал достигает компактного состояния и теряет способность к дальнейшему уплотнению.

Рис. 6.5 иллюстрирует влияние содержания пластификатора в медном порошке на его уплотняемость.

Можно утверждать, что все уравнения прессования, предложенные для порошков, не описывают поведение высокопластифицированных композиций; наличие пластификатора радикально меняет форму кривых уплотнения.

Таблица 6.3

Относительная плотность непластифицированных порошков, %

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	0	100	200	300	400	500	600
ПМС-1	20	42	58	69	77	84	88
ПЖ4МЗ	33	50	59	65	70	74	77
ПХ-30	26	45	57	63	68	72	74
Броф-10-1	33	51	61	70	77	82	86
ВК8	35	42	48	53	57	60	62
ПВН	25	35	41	46	50	53	55
Парафин литой	82	100	100	100	100	100	100

Таблица 6.4

Относительная плотность порошков, содержащих 10% об. парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	52	67	78	86	92	96	98
ПЖ4МЗ	60	67	73	78	82	85	87
ПХ-30	55	64	70	75	79	82	84
Броф-10-1	61	72	80	86	91	94	96
ВК8	50	57	62	66	69	71	72
ПВН	43	50	55	59	62	64	65

Таблица 6.5

Относительная плотность порошков, содержащих 20% об. парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	64	77	88	96	100	100	100
ПЖ4МЗ	72	80	84	88	92	95	97
ПХ-30	67	75	81	85	89	92	94
Броф-10-1	73	83	91	96	100	100	100
ВК8	62	68	72	76	79	81	82
ПВН	55	62	67	69	72	74	75

Таблица 6.6

Относительная плотность порошков, содержащих 30% об. парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	76	88	97	100	100	100	100
ПЖ4МЗ	84	90	95	98	100	100	100
ПХ-30	77	85	91	95	79	82	84
Броф-10-1	83	93	100	100	100	100	100
ВК8	72	78	82	86	89	91	92
ПВН	65	72	77	79	82	84	85

Таблица 6.7

Относительная плотность порошков, содержащих 40% об. парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	82	97	100	100	100	100	100
ПЖ4МЗ	90	97	100	100	100	100	100
ПХ-30	85	94	99	100	100	100	100
Броф-10-1	91	100	100	100	100	100	100
ВК8	80	87	92	96	99	100	100
ПВН	73	80	85	89	92	94	95

Таблица 6.8

Относительная плотность порошков, содержащих 50% об. парафина

Марка порошка	Давление прессования, МПа						
	50	100	150	200	250	300	350
ПМС-1	91	100	100	100	100	100	100
ПЖ4МЗ	99	100	100	100	100	100	100
ПХ-30	95	100	100	100	100	100	100
Броф-10-1	99	100	100	100	100	100	100
ВК8	90	97	100	100	100	100	100
ПВН	83	90	95	99	100	100	100

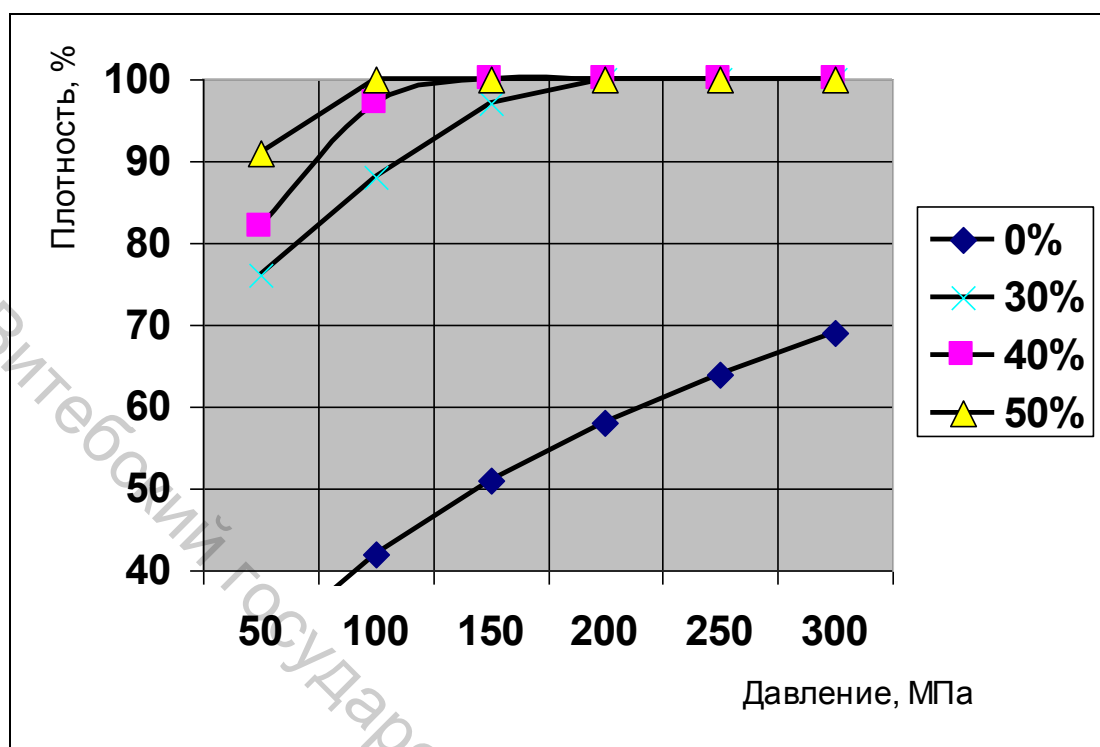


Рис. 6.5. Влияние концентрации пластификатора на уплотняемость медного порошка

6.2.2. Уплотняемость при сложнапряженном состоянии

Уплотняемость материалов, находящихся в сложнапряженном состоянии, исследована для разных порошков. Однако результаты этих исследований приведены только для медного порошка ПМС-1 (Таблица 6.9 — Таблица 6.12).

Таблица 6.9

Относительная плотность медного порошка, % ($\tau = 0$)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	30	52	64	76	82	91
100	42	67	77	88	97	100
150	51	78	88	97	100	100
200	58	86	96	100	100	100
250	64	92	100	100	100	100
300	69	96	100	100	100	100

Таблица 6.10

Относительная плотность медного порошка, % ($\tau = 20$ МПа)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	40	64	74	83	90	94
100	48	75	85	92	98	100
150	55	82	92	99	100	100
200	61	89	97	100	100	100
250	67	94	99	100	100	100
300	72	98	100	100	100	100

Таблица 6.11

Относительная плотность медного порошка, % ($\tau = 40$ МПа)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	43	68	78	89	98	100
100	52	79	89	98	100	100
150	59	87	97	100	100	100
200	65	93	100	100	100	100
250	70	97	100	100	100	100
300	74	99	100	100	100	100

Таблица 6.12

Относительная плотность медного порошка, % ($\tau = 60$ МПа)

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
100	56	83	93	99	100	100
150	62	90	98	100	100	100
200	68	95	100	100	100	100
250	72	98	100	100	100	100
300	75	99	100	100	100	100

Видно (Рис. 6.6), что дополнительное приложение касательных напряжений в плоскости, перпендикулярной к направлению прессования, увеличивает плотность порошковых материалов. Особенно сильно этот эф-

фekt заметен на низкопластифицированных порошках. Так, медный порошок, содержащий 10% об. парафина, уплотняется с 67% до 83% при приложении дополнительных касательных напряжений величиной 60 МПа.

Так как при экструзии возникают значительные касательные напряжения, то подстановка в расчетные соотношения плотностей, измеренных при исследовании материалов на одноосное сжатие, не вполне корректна. Лучше воспользоваться данными, полученными при исследовании уплотняемости материалов, находящихся в соответствующем напряженном состоянии.

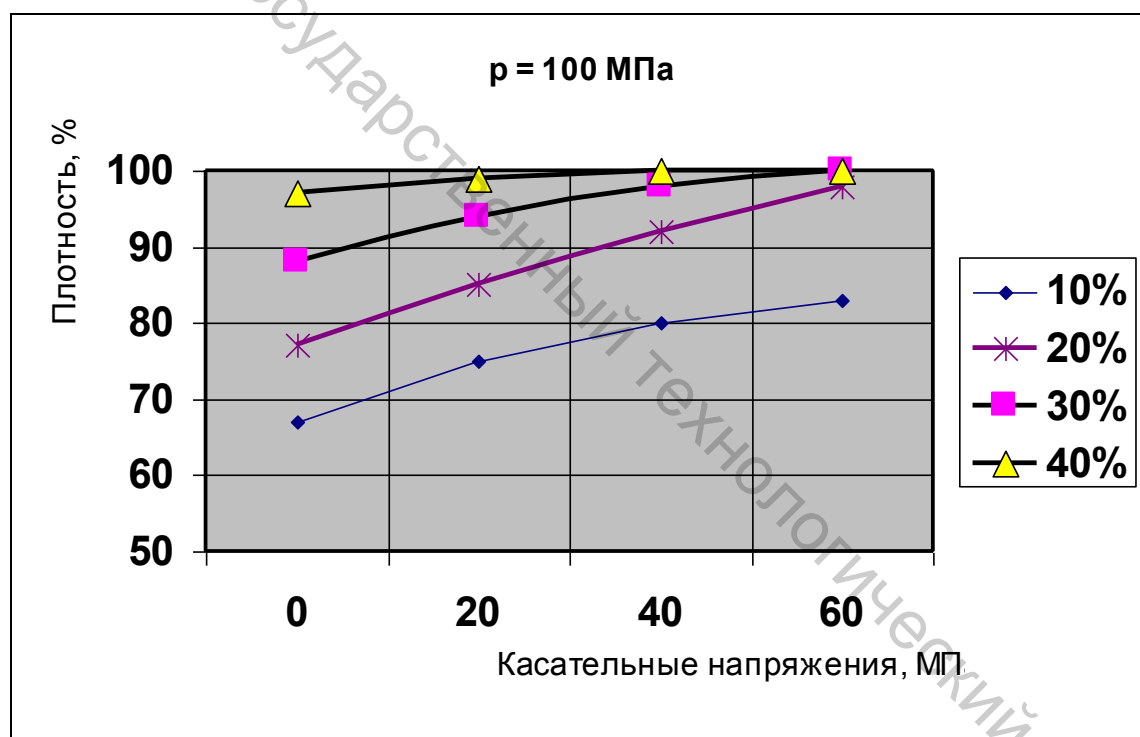


Рис. 6.6. Влияние дополнительных касательных напряжений на плотность медного порошка

6.3. ТРИБОТЕХНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

К триботехническим характеристикам относят различные параметры, связывающие касательные и нормальные напряжения на поверхности трения и внутри материала. Это, прежде всего, коэффициенты внешнего и внутреннего трения, а также различные инвариантные к напряжениям коэффициенты, используемые в более сложных граничных условиях. Здесь

же приведены результаты измерения коэффициентов бокового давления, так как они обычно неразрывно связаны с триботехническими характеристиками в уравнениях деформации материала.

6.3.1. Коэффициенты трения и бокового давления

Исследование зависимости коэффициентов внешнего (Таблица 6.13 — Таблица 6.18) и внутреннего (Таблица 6.19 — Таблица 6.24) трения от степени пластификации порошка и давления прессования позволяет сделать следующие заключения.

Таблица 6.13

Коэффициенты внешнего трения медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.35	0.28	0.23	0.19	0.15	0.13
100	0.33	0.26	0.21	0.17	0.14	0.11
150	0.32	0.25	0.20	0.16	0.13	0.11
200	0.31	0.24	0.19	0.15	0.13	0.11
250	0.30	0.23	0.18	0.15	0.13	0.11
300	0.30	0.23	0.18	0.15	0.13	0.11

Таблица 6.14

Коэффициенты внешнего трения железного порошка ПЖ4М3

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.32	0.25	0.20	0.16	0.13	0.12
100	0.31	0.24	0.19	0.15	0.12	0.11
150	0.30	0.23	0.18	0.14	0.12	0.11
200	0.29	0.22	0.17	0.13	0.12	0.11
250	0.28	0.21	0.17	0.13	0.12	0.11
300	0.28	0.21	0.16	0.13	0.12	0.11

Таблица 6.15

Коэффициенты внешнего трения стального порошка ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.40	0.32	0.25	0.20	0.16	0.14
100	0.39	0.31	0.24	0.19	0.15	0.13
150	0.38	0.30	0.23	0.18	0.14	0.12
200	0.37	0.29	0.22	0.17	0.13	0.12
250	0.36	0.28	0.22	0.16	0.13	0.12
300	0.36	0.28	0.21	0.16	0.13	0.11

Таблица 6.16

Коэффициенты внешнего трения бронзового порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.28	0.22	0.18	0.15	0.13	0.12
100	0.27	0.21	0.17	0.14	0.12	0.11
150	0.26	0.20	0.16	0.13	0.12	0.11
200	0.25	0.19	0.15	0.13	0.12	0.11
250	0.24	0.18	0.15	0.13	0.12	0.11
300	0.24	0.18	0.15	0.13	0.12	0.11

Таблица 6.17

Коэффициенты внешнего трения порошка твердого сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.44	0.35	0.27	0.20	0.16	0.14
100	0.43	0.34	0.26	0.19	0.14	0.13
150	0.42	0.33	0.25	0.18	0.13	0.12
200	0.41	0.32	0.24	0.17	0.13	0.12
250	0.40	0.31	0.23	0.17	0.12	0.12
300	0.40	0.31	0.23	0.16	0.12	0.12

Таблица 6.18

Коэффициенты внешнего трения вольфрамового порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.48	0.38	0.30	0.23	0.17	0.15
100	0.47	0.37	0.29	0.22	0.16	0.14
150	0.46	0.36	0.28	0.21	0.15	0.13
200	0.45	0.35	0.27	0.20	0.14	0.13
250	0.44	0.34	0.27	0.19	0.14	0.12
300	0.44	0.34	0.26	0.19	0.13	0.12

Таблица 6.19

Коэффициенты внутреннего трения медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.41	0.33	0.28	0.24	0.21	0.20
100	0.40	0.32	0.27	0.23	0.20	0.18
150	0.39	0.31	0.26	0.22	0.19	0.18
200	0.38	0.30	0.25	0.21	0.19	0.18
250	0.37	0.29	0.24	0.21	0.19	0.17
300	0.37	0.28	0.24	0.21	0.18	0.17

Таблица 6.20

Коэффициенты внутреннего трения железного порошка ПЖ4М3

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.44	0.36	0.30	0.26	0.22	0.20
100	0.43	0.35	0.29	0.25	0.21	0.19
150	0.42	0.34	0.28	0.24	0.20	0.19
200	0.41	0.33	0.27	0.23	0.20	0.19
250	0.40	0.32	0.26	0.23	0.20	0.19
300	0.40	0.32	0.26	0.23	0.20	0.18

Таблица 6.21

Коэффициенты внутреннего трения стального порошка ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.45	0.37	0.31	0.27	0.24	0.22
100	0.44	0.36	0.30	0.26	0.23	0.21
150	0.43	0.35	0.29	0.25	0.22	0.20
200	0.43	0.34	0.28	0.24	0.22	0.20
250	0.42	0.33	0.27	0.24	0.22	0.20
300	0.42	0.33	0.27	0.24	0.22	0.19

Таблица 6.22

Коэффициенты внутреннего трения бронзового порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.36	0.29	0.24	0.21	0.19	0.18
100	0.35	0.28	0.23	0.20	0.18	0.17
150	0.34	0.27	0.22	0.19	0.17	0.16
200	0.33	0.26	0.21	0.18	0.17	0.16
250	0.32	0.25	0.20	0.18	0.17	0.16
300	0.32	0.25	0.20	0.18	0.17	0.16

Таблица 6.23

Коэффициенты внутреннего трения порошка твердого сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.50	0.41	0.34	0.28	0.24	0.22
100	0.49	0.40	0.33	0.27	0.23	0.21
150	0.48	0.39	0.32	0.26	0.22	0.20
200	0.47	0.38	0.31	0.25	0.21	0.19
250	0.46	0.37	0.30	0.24	0.20	0.19
300	0.45	0.36	0.30	0.24	0.20	0.19

Коэффициенты внутреннего трения вольфрамового порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.53	0.42	0.35	0.30	0.26	0.24
100	0.52	0.41	0.34	0.29	0.25	0.23
150	0.51	0.40	0.33	0.28	0.24	0.22
200	0.50	0.39	0.32	0.27	0.23	0.21
250	0.49	0.38	0.31	0.26	0.23	0.20
300	0.48	0.37	0.31	0.26	0.23	0.20

Пластификация материала сильнее влияет на внешнее трение. Коэффициенты внешнего трения могут падать до величин 0.11...0.12, что характерно для трения со смазкой. Как показывают наблюдения, легкоплавкий парафин (температура плавления около 42 °С) при больших скоростях скольжения материала относительно инструмента расплавляется на поверхности трения и смазывает ее. Внутри материала при малых скоростях деформации такого явления не наблюдается.

Рост давления прессования приводит к уменьшению коэффициентов как внешнего, так и внутреннего трения.

С увеличением концентрации пластификатора различие между порошками уменьшается. При достаточно высокой степени пластификации (около 40% об.), когда парафин занимает все межчастичное пространство, разница в коэффициентах трения практически исчезает. Именно поэтому холодной экструзией можно формовать любые порошковые материалы — их поведение определяется в основном выбранным пластификатором и его количеством, а не исходным порошком.

Похожая картина наблюдается и при исследовании коэффициентов бокового давления (Таблица 6.25 — Таблица 6.30), с той лишь разницей, что эти коэффициенты растут с увеличением давления прессования.

Таблица 6.25

Коэффициенты бокового давления медного порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.36	0.45	0.53	0.60	0.66	0.71
100	0.37	0.46	0.55	0.62	0.68	0.74
150	0.38	0.47	0.56	0.63	0.70	0.76
200	0.39	0.48	0.57	0.64	0.71	0.77
250	0.40	0.49	0.58	0.65	0.72	0.78
300	0.40	0.49	0.58	0.65	0.72	0.78

Таблица 6.26

Коэффициенты бокового давления железного порошка ПЖ4МЗ

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.32	0.42	0.51	0.59	0.66	0.70
100	0.33	0.43	0.52	0.60	0.67	0.72
150	0.34	0.44	0.53	0.61	0.68	0.73
200	0.35	0.45	0.54	0.62	0.69	0.74
250	0.36	0.46	0.55	0.63	0.70	0.75
300	0.36	0.46	0.55	0.63	0.70	0.75

Таблица 6.27

Коэффициенты бокового давления стального порошка ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.28	0.38	0.47	0.55	0.62	0.67
100	0.29	0.39	0.48	0.56	0.63	0.69
150	0.30	0.40	0.49	0.57	0.64	0.70
200	0.31	0.41	0.50	0.58	0.65	0.71
250	0.32	0.42	0.51	0.59	0.66	0.71
300	0.32	0.42	0.51	0.59	0.66	0.71

Таблица 6.28

Коэффициенты бокового давления бронзового порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.34	0.43	0.51	0.58	0.64	0.69
100	0.35	0.44	0.52	0.59	0.66	0.71
150	0.36	0.45	0.53	0.60	0.67	0.72
200	0.37	0.46	0.54	0.61	0.68	0.73
250	0.38	0.47	0.55	0.62	0.69	0.74
300	0.38	0.47	0.55	0.62	0.69	0.75

Таблица 6.29

Коэффициенты бокового давления порошка твердого сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.22	0.32	0.41	0.49	0.56	0.62
100	0.23	0.33	0.42	0.50	0.58	0.64
150	0.24	0.34	0.43	0.51	0.60	0.66
200	0.25	0.35	0.44	0.52	0.61	0.68
250	0.26	0.36	0.45	0.53	0.62	0.70
300	0.26	0.36	0.45	0.53	0.62	0.70

Таблица 6.30

Коэффициенты бокового давления вольфрамового порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.20	0.30	0.39	0.47	0.54	0.60
100	0.21	0.31	0.40	0.48	0.56	0.63
150	0.22	0.32	0.41	0.49	0.58	0.65
200	0.23	0.33	0.42	0.50	0.59	0.67
250	0.24	0.34	0.43	0.60	0.60	0.68
300	0.24	0.35	0.44	0.61	0.60	0.68

У непластифицированных порошков рассматриваемые коэффициенты при давлении 75 МПа отличается почти в два раза (0.33 у меди и бронзы, 0.18 — у порошка твердого сплава). У высокопластифицированных материалов это различие не превышает 10%. Справедливо прежнее утверждение: если объемная концентрация пластификатора в порошке достигает 40%, различие в поведении высокопластифицированных композиций исчезает. Свойства материала в этом случае определяются в основном свойствами пластификатора.

В научно-технических расчетах часто встречается комплекс, представляющий собой произведение коэффициентов трения и бокового давления. В учебниках по порошковой металлургии обычно отмечают, что такое произведение слабо зависит от давления прессования и его можно выносить за знаки интегрирования и дифференцирования как постоянную величину. Далее проведена проверка справедливости этого утверждения для пластифицированных порошковых материалов (Таблица 6.31 — Таблица 6.36).

Проведенные эксперименты убедительно доказывают, что произведение коэффициентов внешнего трения и бокового давления в исследованном диапазоне давлений практически постоянно. Это утверждение справедливо для всех исследованных материалов. Более того, для высокопластифицированных композиций это произведение не зависит даже от материала самого порошка — все решает используемый пластификатор. Примерно такая же картина наблюдается и для произведения коэффициентов внутреннего трения и бокового давления.

Поэтому при проведении технических расчетов исследованный комплекс можно выносить за знаки интегрирования и дифференцирования, предварительно проведя соответствующие измерения.

Таблица 6.31

Произведение коэффициентов трения и бокового давления порошка ПМС-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.13	0.13	0.12	0.11	0.10	0.09
100	0.12	0.12	0.12	0.11	0.10	0.08
150	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08
200	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08
250	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09
300	0.12	0.11	0.10	0.10	0.09	0.09

Таблица 6.32

Произведение коэффициентов трения и бокового давления порошка ПЖ4М3

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.10	0.11	0.10	0.09	0.09	0.08
100	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08
150	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08
200	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08
250	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08
300	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08

Таблица 6.33

Произведение коэффициентов трения и бокового давления порошка ПХ-30

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.11	0.12	0.12	0.11	0.10	0.09
100	0.11	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09
150	0.11	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08
200	0.11	0.12	0.11	0.10	0.08	0.09
250	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09	0.09
300	0.12	0.12	0.11	0.09	0.09	0.08

Таблица 6.34

Произведение коэффициентов трения и бокового давления порошка БрОФ-10-1

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08
100	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08
150	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
200	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08
250	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
300	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08

Таблица 6.35

Произведение коэффициентов трения и бокового давления порошка сплава ВК8

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.10	0.11	0.11	0.10	0.09	0.09
100	0.10	0.11	0.11	0.10	0.08	0.08
150	0.10	0.11	0.11	0.09	0.08	0.08
200	0.10	0.11	0.11	0.09	0.08	0.08
250	0.10	0.11	0.10	0.09	0.07	0.08
300	0.10	0.11	0.10	0.08	0.07	0.08

Таблица 6.36

Произведение коэффициентов трения и бокового давления порошка ПВН

Давление прессования, МПа	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
50	0.10	0.11	0.12	0.11	0.09	0.09
100	0.10	0.11	0.12	0.11	0.09	0.09
150	0.10	0.12	0.11	0.10	0.09	0.08
200	0.10	0.12	0.11	0.10	0.08	0.09
250	0.11	0.12	0.12	0.11	0.08	0.08
300	0.11	0.12	0.11	0.12	0.08	0.08

6.3.2. Триботехнические константы, инвариантные к напряжениям

Здесь приведены результаты измерения триботехнических констант, определяющих закон трения (2.9). Сначала снимают зависимость касательных напряжений от нормальных на поверхности трения (Таблица 6.37 – Таблица 6.42) и внутри материала (Таблица 6.43 – Таблица 6.48).

Затем, в соответствии с описанной выше методикой, из каждого столбца выбирают три значения и решают систему уравнений (6.5).

Таблица 6.37

Касательные напряжения на поверхности медного порошка ПМС-1, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	7.65	4.05	2.70	2.25	2.10	1.80	1.65
30	13.50	6.30	3.30	2.70	2.40	2.40	2.10
45	19.35	8.55	4.50	4.05	3.60	3.15	2.70
60	24.60	10.80	5.40	4.80	4.20	3.60	3.00
75	30.00	12.75	6.00	5.25	4.50	3.75	3.75
90	35.10	14.40	6.30	5.40	4.50	4.50	4.50

Таблица 6.38

Касательные напряжения на поверхности железного порошка ПЖЗМЗ, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	6.30	4.50	3.15	2.25	1.80	1.35	1.20
30	11.40	7.20	5.10	3.60	2.40	1.80	1.50
45	16.20	9.90	6.75	4.50	3.15	2.25	1.80
60	21.00	12.60	8.40	5.40	3.60	3.00	2.40
75	25.50	15.00	10.50	6.00	4.50	3.00	2.25
90	30.60	18.00	12.60	7.20	4.50	3.60	2.70

Таблица 6.39**Касательные напряжения на поверхности стального порошка ПХ-30, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	5.40	4.05	3.15	2.40	1.80	1.35	1.20
30	10.20	7.80	5.70	4.50	3.30	2.10	1.80
45	14.85	11.25	8.10	6.30	4.50	2.70	2.25
60	19.20	15.00	10.20	7.80	5.40	3.00	3.00
75	24.00	18.00	12.75	9.75	6.00	3.75	3.00
90	28.80	21.60	14.40	10.80	6.30	3.60	3.60

Таблица 6.40**Касательные напряжения на поверхности бронзового порошка БрОФ10-1, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	2	4	6	8	10	12
15	6.75	5.40	4.95	4.50	3.60	1.80	1.20
30	11.40	9.60	8.70	6.90	5.40	3.30	2.10
45	15.75	13.50	12.15	9.45	7.20	4.50	2.70
60	20.40	17.40	15.60	12.00	9.00	6.00	3.00
75	24.75	21.75	18.75	15.00	10.50	6.75	3.00
90	28.80	25.20	21.60	17.10	12.60	7.20	3.60

Таблица 6.41**Касательные напряжения на поверхности порошка твердого сплава ВН-8, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	10.35	10.05	9.45	9.00	7.35	5.25	3.75
30	18.90	18.30	17.70	16.80	13.20	8.70	6.30
45	27.90	27.00	25.20	24.30	18.45	11.25	7.65
60	37.20	36.00	33.00	31.80	23.40	13.80	8.40
75	45.75	44.25	41.25	39.75	27.75	16.50	9.00
90	54.00	52.20	48.60	45.90	30.60	18.00	9.90

Таблица 6.42**Касательные напряжения на поверхности порошка тяжелого сплава ВНЖ-90, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	8.10	7.65	7.20	5.40	4.35	3.45	3.00
30	15.30	14.70	13.80	10.20	8.10	6.60	5.40
45	26.10	21.15	19.80	14.40	11.25	8.55	7.20
60	32.40	25.20	24.60	18.00	13.80	10.20	8.40
75	39.75	30.75	30.00	21.75	16.50	12.00	9.75
90	47.70	36.90	35.10	25.20	19.80	13.50	10.80

Таблица 6.43**Касательные напряжения внутри медного порошка ПМС-1, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	13.80	12.90	12.00	10.80	9.00	7.20	6.00
30	27.00	24.60	22.20	19.20	15.90	13.20	11.40
45	39.60	35.10	30.60	26.10	21.60	18.00	16.20
60	51.60	44.40	38.40	32.40	25.20	22.80	21.00
75	63.75	54.00	46.50	39.00	30.00	27.00	25.50
90	76.50	63.90	54.90	45.90	36.00	31.50	30.60

Таблица 6.44**Касательные напряжения внутри железного порошка ПЖЗМЗ, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	13.50	12.15	10.80	9.30	8.10	6.90	5.70
30	26.40	23.10	20.40	17.40	15.00	12.30	10.80
45	38.70	33.30	28.80	24.30	20.70	17.10	15.75
60	50.40	43.20	37.20	30.60	24.60	21.60	20.40
75	62.25	52.50	45.00	36.75	28.50	26.25	24.75
90	73.80	62.10	53.10	43.20	33.30	30.60	29.70

Таблица 6.45**Касательные напряжения внутри стального порошка ПХ-30, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	3	6	9	12	15	18
15	13.20	11.85	10.50	9.00	7.80	6.45	6.00
30	25.80	23.10	19.80	16.80	15.00	12.30	11.40
45	37.80	32.40	27.90	23.85	20.70	17.55	16.20
60	49.20	42.00	36.00	30.60	25.80	22.20	21.00
75	60.75	51.75	44.25	36.75	30.75	27.00	26.25
90	72.00	61.20	52.20	43.20	35.10	31.50	30.60

Таблица 6.46**Касательные напряжения внутри бронзового порошка БрОФ10-1, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	2	4	6	8	10	12
15	13.50	12.30	11.10	9.90	8.40	6.90	5.70
30	26.10	24.00	21.30	18.90	16.20	13.20	10.80
45	37.80	35.10	31.05	27.45	23.40	18.90	15.30
60	49.20	45.60	40.20	36.00	30.00	24.00	19.20
75	60.75	55.50	49.50	44.25	36.00	29.25	23.25
90	72.00	65.70	58.50	52.20	42.30	34.20	27.00

Таблица 6.47**Касательные напряжения внутри порошка твердого сплава ВН-8, МПа**

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	14.40	12.90	11.55	10.20	9.00	8.10	7.50
30	28.20	25.20	22.50	19.80	17.40	15.60	14.40
45	41.40	36.90	32.85	28.80	25.20	22.50	20.70
60	54.00	48.00	42.60	37.20	32.40	28.80	26.40
75	66.00	58.50	52.50	45.75	39.00	35.25	31.50
90	78.30	69.30	62.10	54.00	45.90	41.40	36.90

Таблица 6.48

Касательные напряжения внутри порошка тяжелого сплава ВНЖ-90, МПа

Давление, МПа	Содержание парафина, % мас.						
	0	1	2	3	4	5	6
15	13.20	11.70	10.35	9.00	8.10	7.05	5.70
30	25.80	22.80	20.10	17.70	15.60	13.50	10.80
45	37.80	33.30	28.80	25.65	22.50	19.35	14.85
60	49.20	43.20	37.20	33.00	28.80	24.60	18.60
75	60.75	53.25	45.75	39.75	35.25	29.25	21.75
90	72.00	63.90	54.00	46.80	41.40	33.30	26.10

Таблица 6.49 – Таблица 6.52 содержат результаты вычислений триботехнических констант. Коэффициент сцепления a оказался достаточно малым (около 0.0001 МПа) для всех материалов; на процесс экструзии он никакого влияния не оказывает и интересен лишь для теории. Коэффициент b является аналогом коэффициента трения, но численно с ним не совпадает. Коэффициент c характеризует нелинейность закона трения; он тем больше, чем больше в материале пластификатора. Нелинейность закона внутреннего трения больше, чем внешнего.

Можно заключить, что отклонение от закона Кулона-Амонтона тем больше, чем сильнее пластифицирован материал; однако и для чистого (непластифицированного) порошка коэффициент c нулю не равен.

Таблица 6.49

Зависимость коэффициента b от материала (внешнее трение)

Порошковый материал	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	0.45	0.22	0.13	0.12	0.11	0.10
ПЖЗМЗ	0.39	0.25	0.14	0.13	0.09	0.06
ПХ-30	0.32	0.29	0.17	0.13	0.12	0.05
БрОФ10-1	0.38	0.30	0.23	0.16	0.10	—
ВН-8	0.66	0.53	0.22	—	—	—
ВНЖ-90	0.68	0.34	0.18	—	—	—

Таблица 6.50

Зависимость коэффициента b от материала (внутреннее трение)

Порошковый материал	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	0.90	0.82	0.72	0.62	0.50	0.46
ПЖЗМЗ	0.88	0.80	0.70	0.59	0.53	0.40
ПХ-30	0.86	0.74	0.64	0.59	0.51	0.41
БрОФ10-1	0.86	0.73	0.64	0.48	0.36	—
ВН-8	0.98	0.66	0.52	—	—	—
ВНЖ-90	0.86	0.63	0.39	—	—	—

Таблица 6.51

Коэффициент $c \cdot 10^4$, МПа⁻¹ (внешнее трение)

Порошковый материал	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	-1.42	-2.33	-3.30	-4.36	-5.40	-6.67
ПЖЗМЗ	-1.45	-2.44	-3.50	-4.54	-5.60	-6.70
ПХ-30	-1.45	-2.37	-3.46	-4.48	-5.51	-6.69
БрОФ10-1	-1.47	-2.35	-3.34	-4.38	-5.42	-6.65
ВН-8	-1.49	-2.47	-3.55	—	—	—
ВНЖ-90	-1.48	-2.49	-3.57	—	—	—

Таблица 6.52

Коэффициент $c \cdot 10^4$, МПа⁻¹ (внутреннее трение)

Порошковый материал	Содержание парафина, мас. %					
	0	3	6	9	12	15
ПМС-1	-2.43	-3.36	-5.30	-7.36	-9.40	-11.7
ПЖЗМЗ	-2.44	-3.46	-5.50	-7.54	-9.60	-11.8
ПХ-30	-2.45	-3.38	-5.46	-7.48	-9.51	-11.7
БрОФ10-1	-2.47	-3.36	-5.34	-7.38	-9.42	-11.8
ВН-8	-2.49	-3.44	-5.55	—	—	—
ВНЖ-90	-2.50	-3.49	-5.57	—	—	—

6.3.3. Влияние температуры на триботехнические свойства пластифицированных порошков

Термопластичный пластификатор делает ППМ чрезвычайно чувствительным к температуре. Сильная зависимость всех технологических свойств пластифицированных порошков от температуры требует тщательного соблюдения технологии формования. Как было показано выше, производительность процесса формования ограничивает, прежде всего, допустимый тепловой режим. А он, в свою очередь, определяется коэффициентами внешнего и внутреннего трения.

Влияние температуры материала на коэффициенты внешнего (Таблица 6.53 – Таблица 6.55) и внутреннего (Таблица 6.56 – Таблица 6.58) трения неодинаково. Коэффициент внешнего трения уменьшается с увеличением температуры скачкообразно: резкое его падение в интервале температур 40...50 °С зафиксировано для всех исследованных порошков. Уменьшение внешнего трения связано с переходом через температуру плавления парафина (42 °С) — сухое трение при этом сменяется жидкостным. Этот эффект был использован при поиске оптимального режима работы шнекового пресса. Коэффициент внешнего трения несколько увеличивается при переходе через температуру плавления парафина и становится нестабильным. Поэтому материал следует формовать при более низкой температуре, не доводя пластификатор до плавления по всему объему.

Таблица 6.53

Коэффициенты внешнего трения медного порошка ПМС-1

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0.35	0.28	0.23	0.19	0.15	0.13
30	0.34	0.27	0.22	0.18	0.14	0.13
40	0.34	0.26	0.21	0.17	0.13	0.12
50	0.34	0.21	0.14	0.10	0.07	0.06
60	0.34	0.20	0.13	0.09	0.06	0.05
70	0.34	0.20	0.13	0.09	0.06	0.05

Таблица 6.54

Коэффициенты внешнего трения железного порошка ПЖ4МЗ

Температура материала, °C	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0.32	0.25	0.20	0.16	0.13	0.12
30	0.32	0.24	0.19	0.16	0.13	0.11
40	0.32	0.24	0.18	0.15	0.12	0.11
50	0.31	0.19	0.11	0.09	0.07	0.06
60	0.31	0.18	0.10	0.08	0.06	0.05
70	0.31	0.18	0.10	0.08	0.06	0.05

Таблица 6.55

Коэффициенты внешнего трения стального порошка ПХ-30

Температура материала, °C	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0.40	0.32	0.25	0.20	0.16	0.14
30	0.39	0.31	0.25	0.20	0.16	0.14
40	0.39	0.30	0.24	0.20	0.15	0.13
50	0.39	0.25	0.18	0.13	0.09	0.07
60	0.39	0.24	0.17	0.12	0.08	0.06
70	0.39	0.24	0.17	0.12	0.08	0.06

Таблица 6.56

Коэффициенты внутреннего трения медного порошка ПМС-1

Температура материала, °C	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0.41	0.33	0.28	0.24	0.21	0.20
30	0.40	0.32	0.28	0.23	0.21	0.20
40	0.40	0.31	0.27	0.23	0.20	0.19
50	0.40	0.36	0.35	0.35	0.30	0.25
60	0.40	0.38	0.36	0.35	0.35	0.29
70	0.40	0.36	0.34	0.34	0.34	0.32

Таблица 6.57

Коэффициенты внутреннего трения железного порошка ПЖ4МЗ

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0.44	0.36	0.30	0.26	0.22	0.20
30	0.44	0.36	0.30	0.25	0.22	0.20
40	0.44	0.35	0.30	0.25	0.21	0.20
50	0.44	0.40	0.38	0.33	0.29	0.29
60	0.43	0.42	0.40	0.35	0.31	0.29
70	0.43	0.44	0.39	0.35	0.32	0.31

Таблица 6.58

Коэффициенты внутреннего трения стального порошка ПХ-30

Температура материала, °С	Содержание парафина, % об.					
	0	10	20	30	40	50
20	0.45	0.37	0.31	0.27	0.24	0.22
30	0.45	0.37	0.31	0.27	0.24	0.22
40	0.45	0.37	0.30	0.27	0.24	0.22
50	0.45	0.43	0.39	0.36	0.33	0.30
60	0.45	0.44	0.40	0.38	0.33	0.32
70	0.45	0.45	0.42	0.38	0.35	0.31

6.4. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ПЛАСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Обобщенно реологические свойства пластифицированных порошков характеризует давление истечения материала через капилляр. По этой величине вычисляют вязкость и другие реологические константы. Пластические свойства ППМ лучше всего отражает такая интегральная характеристика, как структурно-пластическая прочность, представляющая собой наибольшее касательное напряжение, которое структура выдерживает без разрушения.

6.4.1. Давление истечения материала

Давление истечения материала через капилляр представляет собой реологическую характеристику шихты, по которой судят о возможности ее формирования методом экструзии. Это давление исследовано в зависимости от содержания пластификатора (Рис. 6.7), степени радиального обжатия материала (Рис. 6.8) и температуры (Рис. 6.9).

Видно, что давление истечения резко возрастает при уменьшении концентрации пластификатора ниже 6% мас. Такого количества парафина недостаточно для пластификации всего объема порошка, экструзия в этом случае невозможна. При температуре плавления парафина давление истечения минимально, однако даже небольшой перегрев материала выше этой температуры резко затрудняет экструзию.

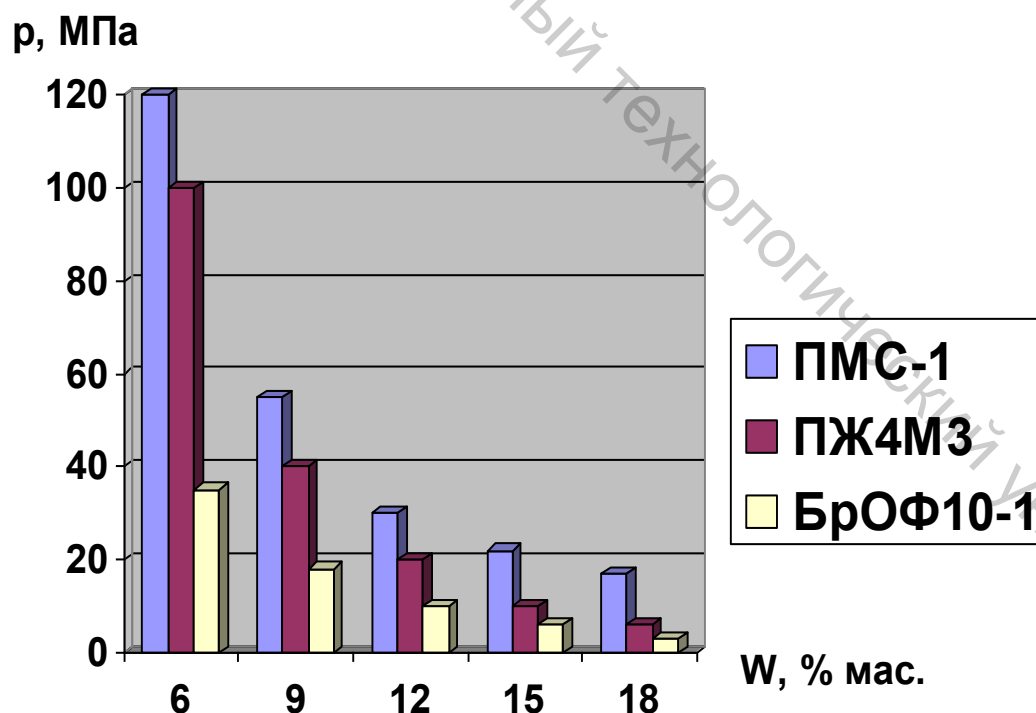


Рис. 6.7. Зависимость давления истечения от содержания парафина ($T = 40^{\circ}\text{C}$, $K = 90\%$)

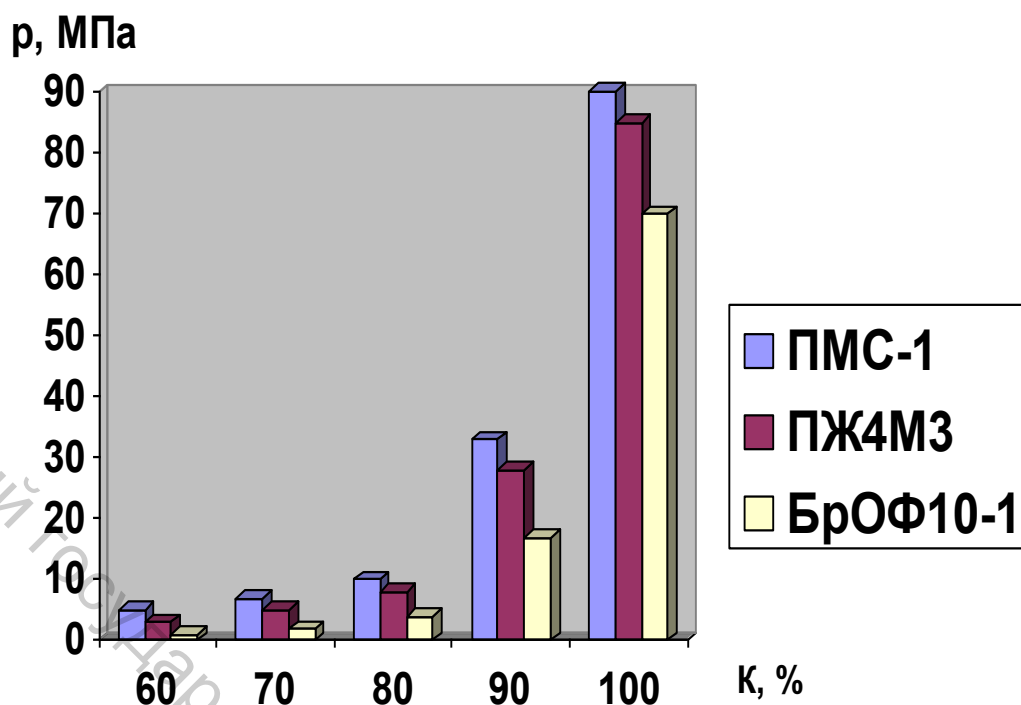


Рис. 6.8. Зависимость давления истечения от степени обжатия материала
($T = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $W = 15\%$)

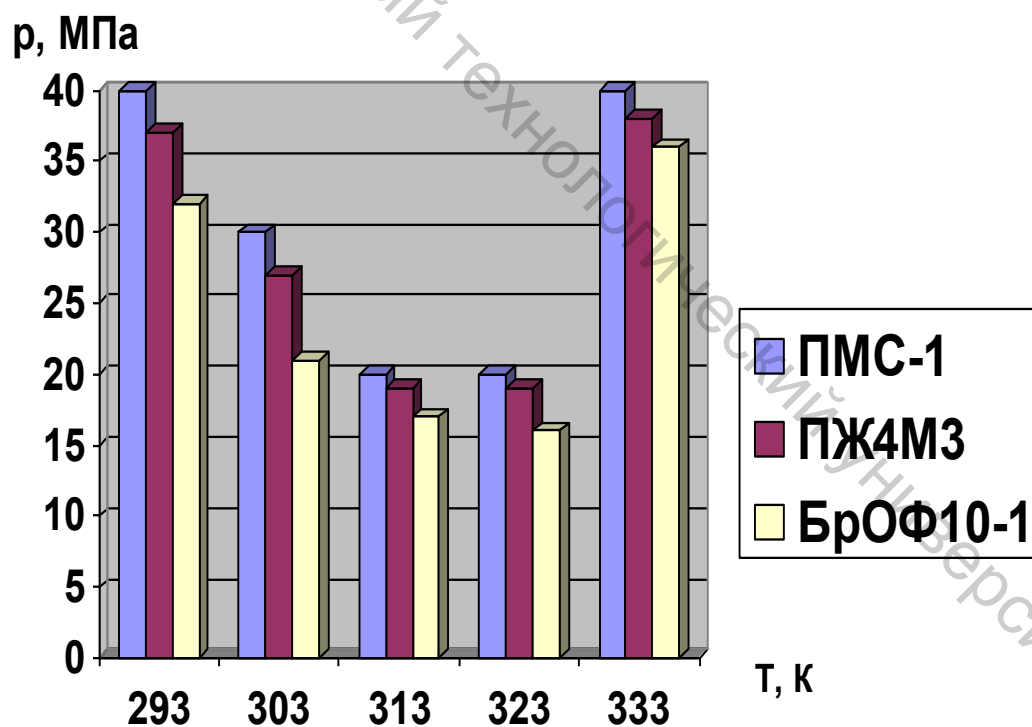


Рис. 6.9. Зависимость давления истечения от температуры материала
($K = 90\%$, $W = 15\%$)

6.4.2. Структурная прочность пластифицированного материала

Результаты измерения пластической прочности структуры представлены на Рис. 6.10 – Рис. 6.12. Эта характеристика вязко-сыпучих сред возрастает с увеличением давления прессования и уменьшается с увеличением концентрации пластификатора; обе зависимости близки к линейной.

С ростом количества парафина в материале различия между порошками уменьшаются и практически исчезают при концентрации пластификатора свыше 12% мас. У высокопластифицированных материалов пластическая прочность структуры определяется химическим составом пластификатора, а не порошка.

τ , МПа

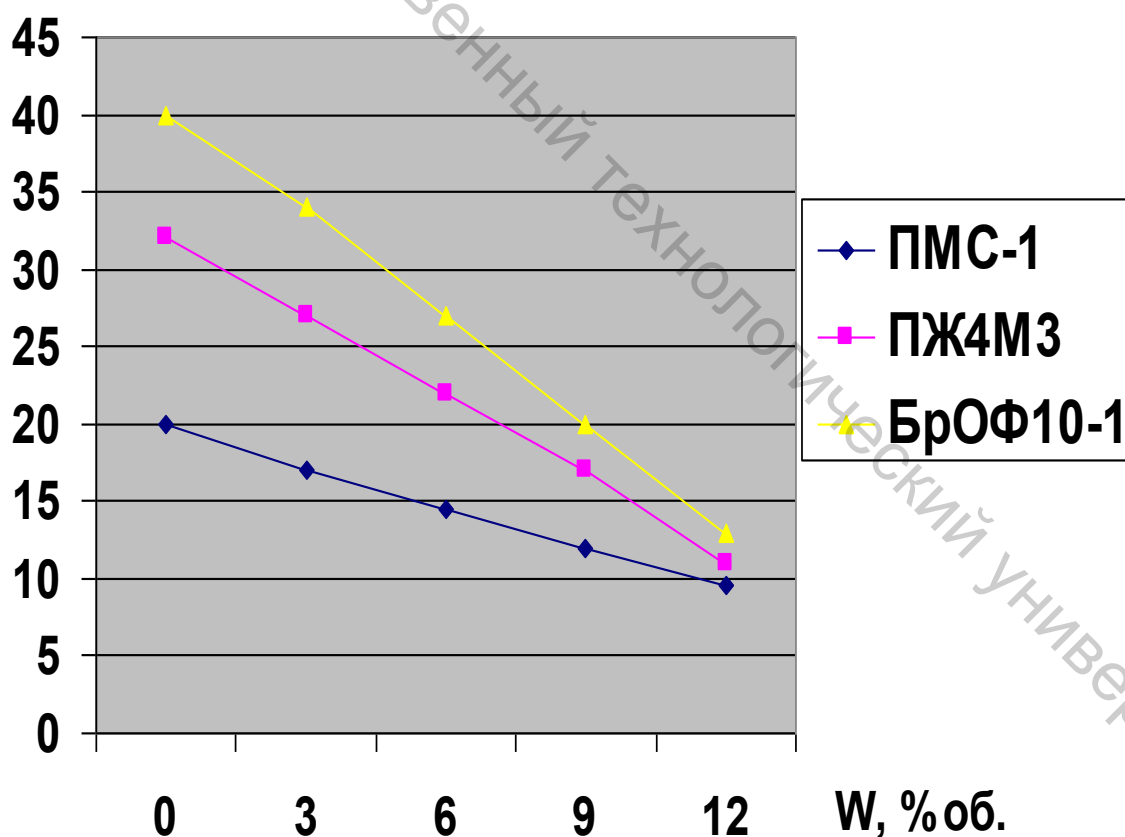


Рис. 6.10. Структурная прочность при давлении 30 МПа

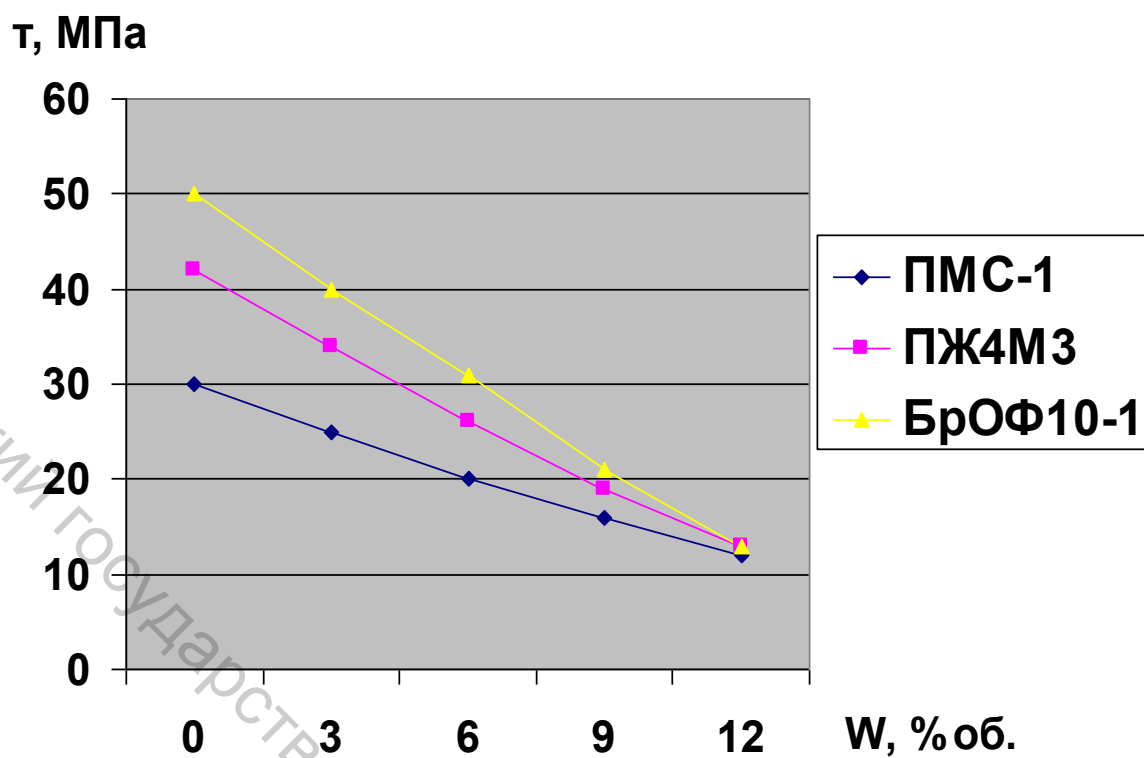


Рис. 6.11. Структурная прочность при давлении 60 МПа

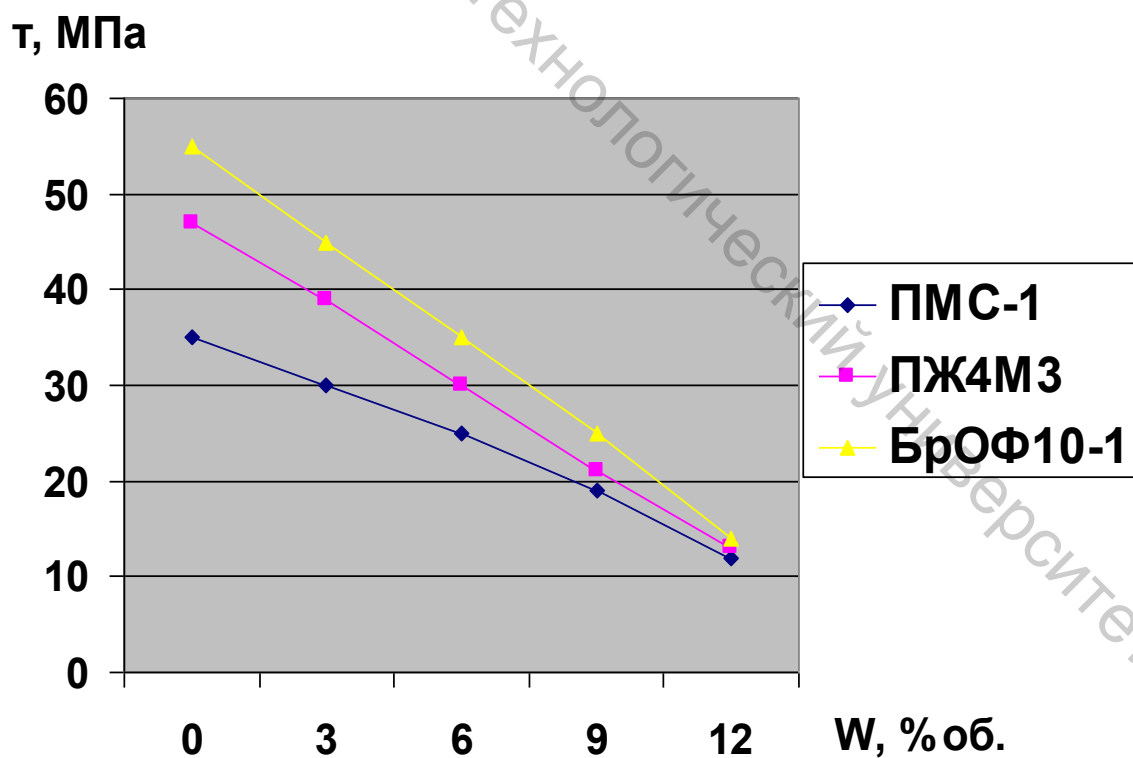


Рис. 6.12. Структурная прочность при давлении 90 МПа

ГЛАВА 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ

В этой главе описаны результаты экспериментального исследования процесса экструзии и проведено их сравнение с расчетными значениями, полученными ранее теоретическим путем. Здесь измерены также некоторые параметры, трудно поддающиеся аналитическому определению, но необходимые для проведения расчетов с помощью полученных выше соотношений. Одним из таких параметров является коэффициент окружного проскальзывания при шнековом формовании материалов.

7.1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРУЗИИ

Схема экспериментальной установки изображена на Рис. 7.1, а общий вид — на Рис. 7.2. Установка состоит из шнекового пресса, протяжного стана и блока управления.

Шнековый пресс собран на отдельной плите. Шнек 1 установлен с возможностью вращения в неподвижном корпусе 2 с закрепленной на нем матрицей 3. К матрице плотно прижато обрабатываемое изделие 4 (на схеме изображено нанесение покрытия на внутреннюю поверхность трубы). Внутри трубы заходит оправка 5, установленная в сквозном осевом отверстии шнека с возможностью продольного перемещения. На конце оправки имеется центрирующий наконечник 6. Шнековый пресс содержит также редукторы 7 и 8, соединенные с электродвигателем постоянного тока 9.

Протяжной стан состоит из барабана 10 с тросом, редуктора 11 и электродвигателя 12. Блок управления 13 содержит тиристорные преобразователи переменного тока в постоянный для питания двигателей шнека и протяжного стана. Цифровые тахометры позволяют с помощью фотоэлектрических датчиков контролировать частоту вращения двигателей. Блок управления содержит также электроизмерительную аппаратуру и органы управления прессом и станом.

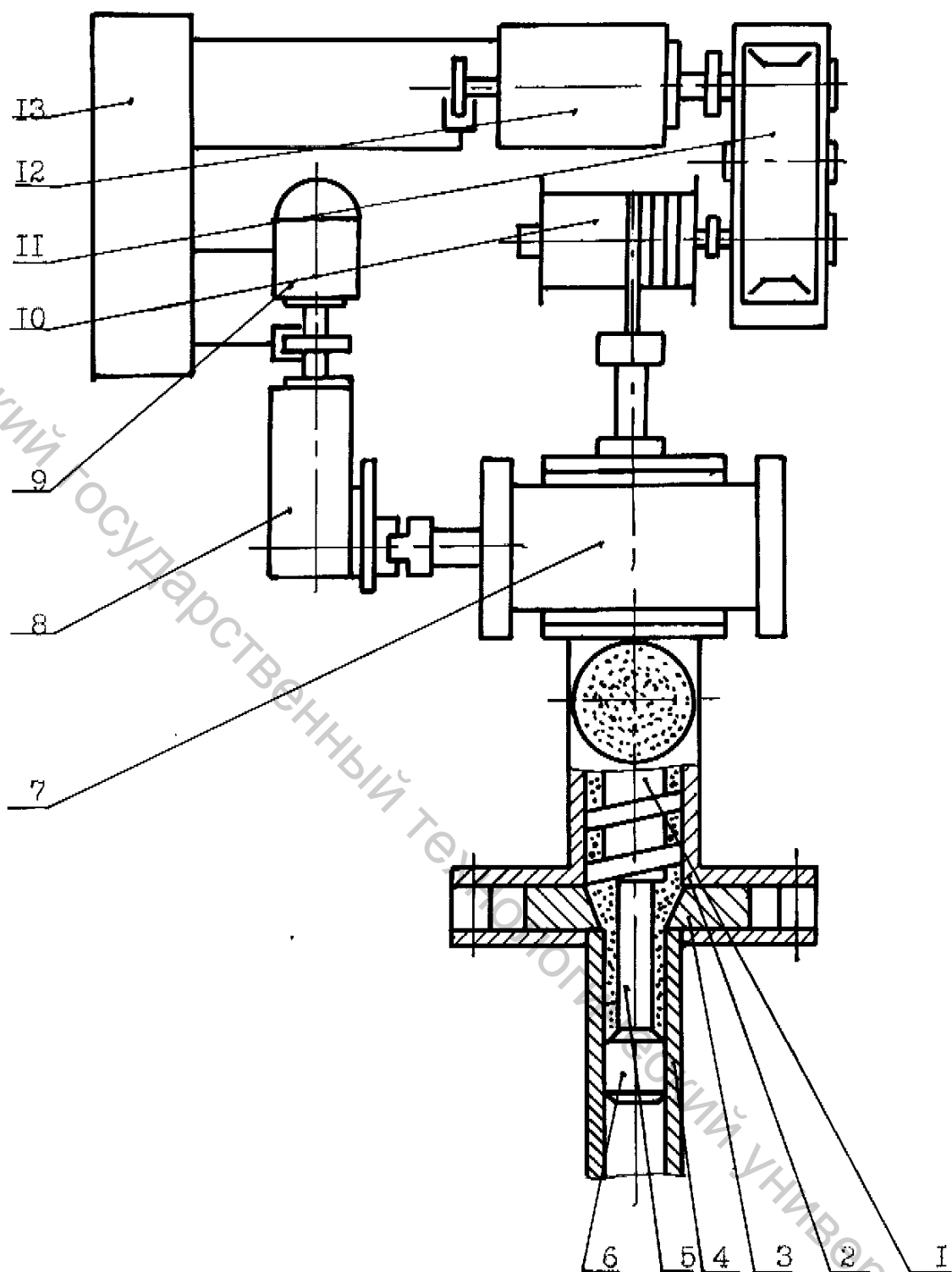


Рис. 7.1. Схема установки для исследования процесса экструзии

Установка укомплектована набором матриц, оправок, шнеков и наконечников к шнекам (Рис. 7.3), позволяющим провести практически любой эксперимент по формованию различных изделий. Кронштейны с блоками позволяют прикладывать усилие как в прямом, так и в обратном прессованию направлениях.

Имеется возможность измерения различных параметров режима формования: усилий, моментов, температур, скоростей и т.д.

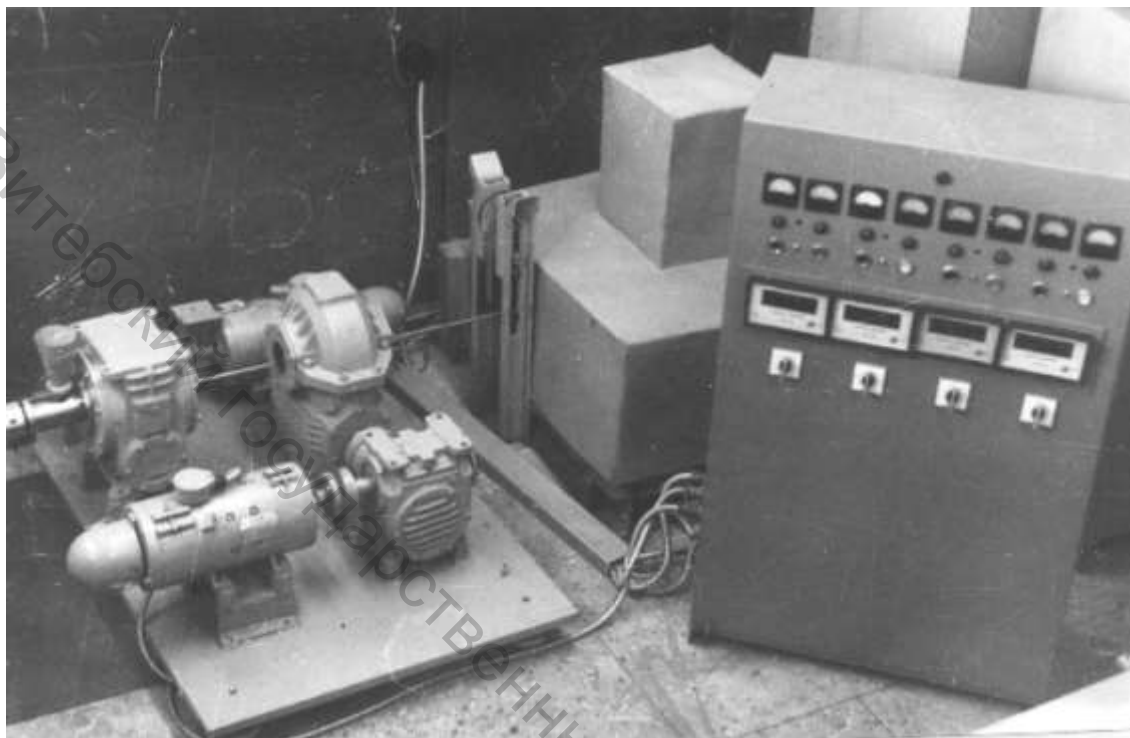


Рис. 7.2. Общий вид экспериментальной установки

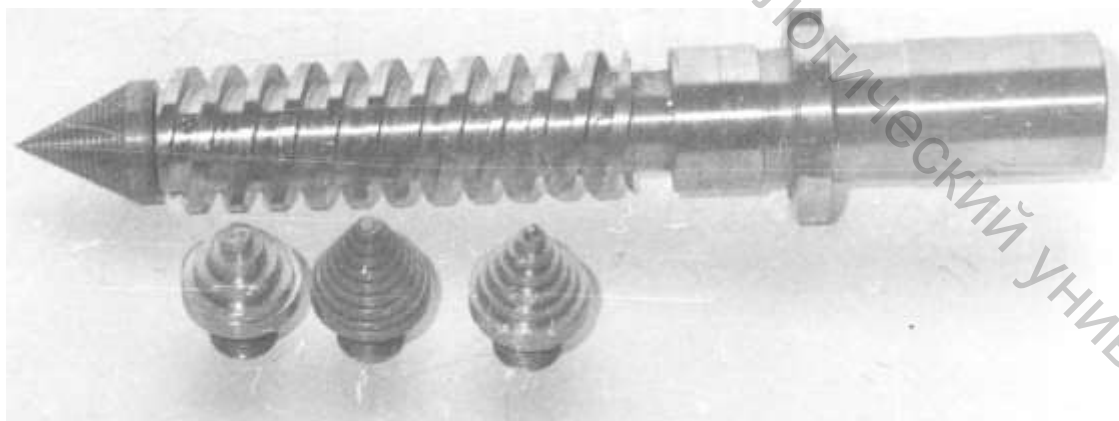


Рис. 7.3. Шнек и наконечники с винтовой нарезкой

Таблица 7.1 содержит основные технические характеристики установки.

Таблица 7.1

Технические характеристики экспериментальной установки

Усилие выдавливания, кН	200
Усилие протягивания, кН	250
Частота вращения шнека, с^{-1}	0.01 – 0.32
Скорость протягивания, м/с	0.0005 – 0.1
Максимальный диаметр шнека, мм	60
Мощность электродвигателей, кВт	2.0

7.2. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНА РАБОЧИХ СКОРОСТЕЙ ШНЕКА

Теоретические расчеты показывают, что при формовании термопластичных материалов существуют ограничения на допустимые скорости вращения шнека. Рабочий диапазон скоростей шнека ограничен как сверху, так и снизу (5.11). В этом разделе описаны результаты экспериментальной проверки этого полученного теоретическим путем соотношения. Исследована зависимость допустимых скоростей шнека от давления, коэффициентов трения, особенностей конструкции пресса. В качестве пластификатора, как и прежде, использован парафин.

Методика проведения экспериментов следующая. Скорость шнека плавно увеличивалась от нуля до наступления т.н. «срыва» (полного проворота материала вместе со шнеком). Нижняя и верхняя границы рабочего диапазона фиксировались визуально, по получению прессовок приемлемого качества. Давление прессования регулировалось изменением диаметра очка матрицы (все матрицы предварительно тарировались на давление истечения различных материалов, как это описано в предыдущей главе). Коэффициент внешнего трения материала варьировался путем изменения концентрации парафина в порошке.

Результаты исследований представлены на Рис. 7.4 — Рис. 7.10. Сплошными линиями изображены результаты эксперимента, а пунктирными — расчетные значения. Нижние линии соответствуют исчезновению окружного проскальзывания материала, а верхние — т.н. «срыву» (резкому увеличению окружного проскальзывания, останавливающему процесс

формования). Рабочий диапазон скоростей шнека лежит между нижней и верхней линией.

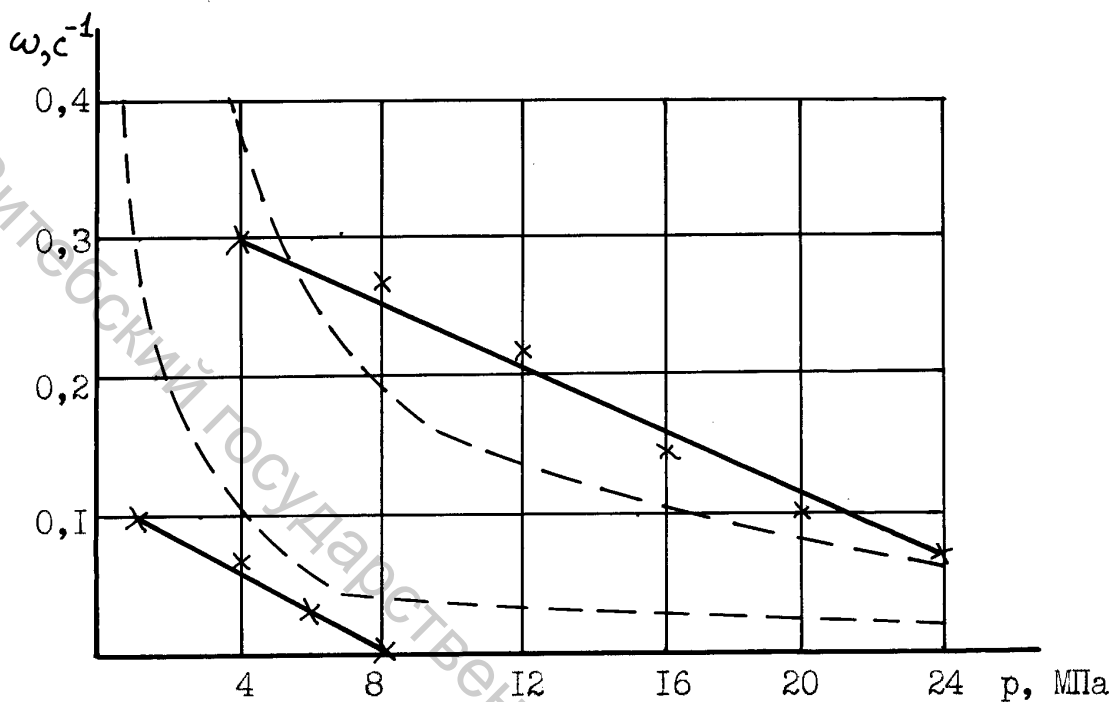


Рис. 7.4. Зависимость рабочих скоростей шнека от давления прессования

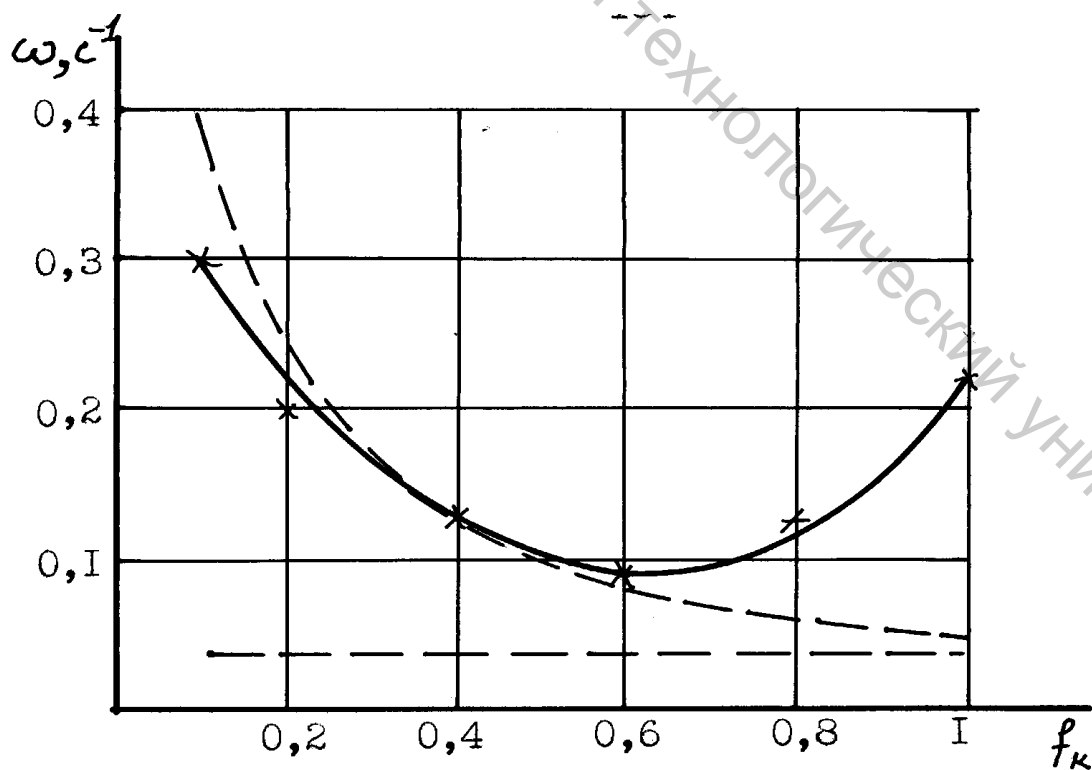


Рис. 7.5. Зависимость рабочих скоростей шнека от коэффициента трения материала о цилиндр

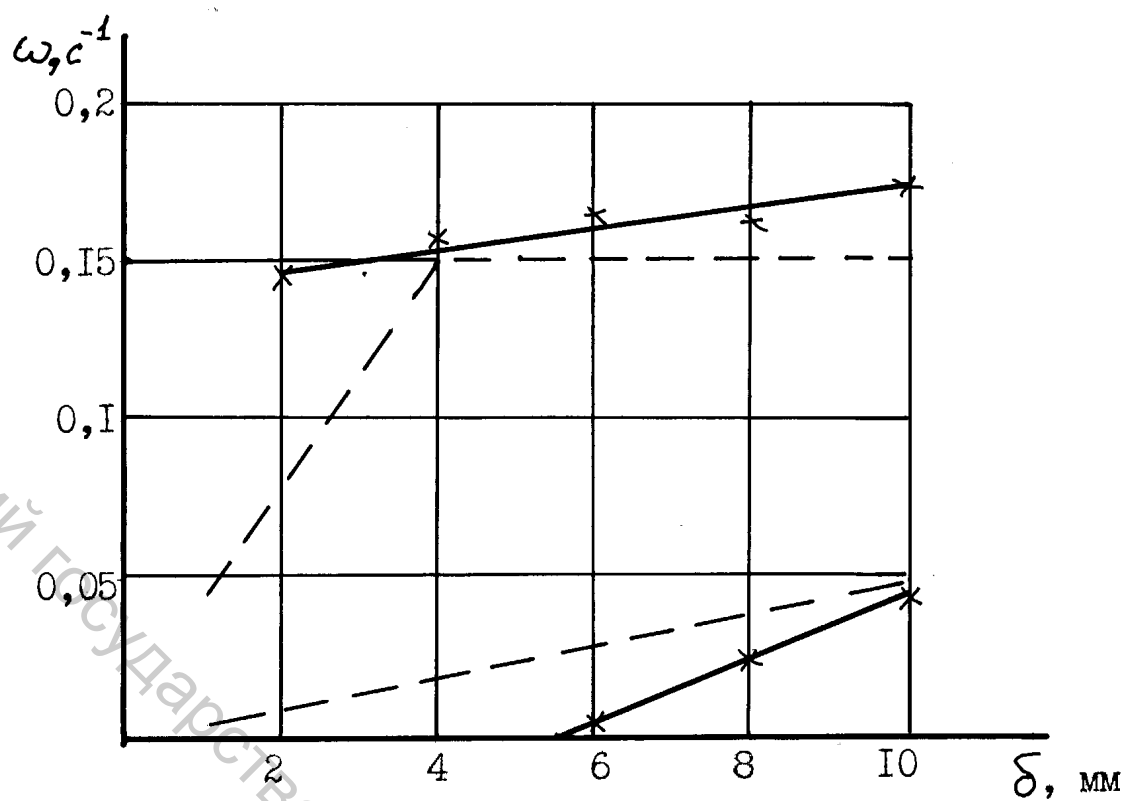


Рис. 7.6. Зависимость рабочих скоростей шнека от толщины гребня винтовой нарезки

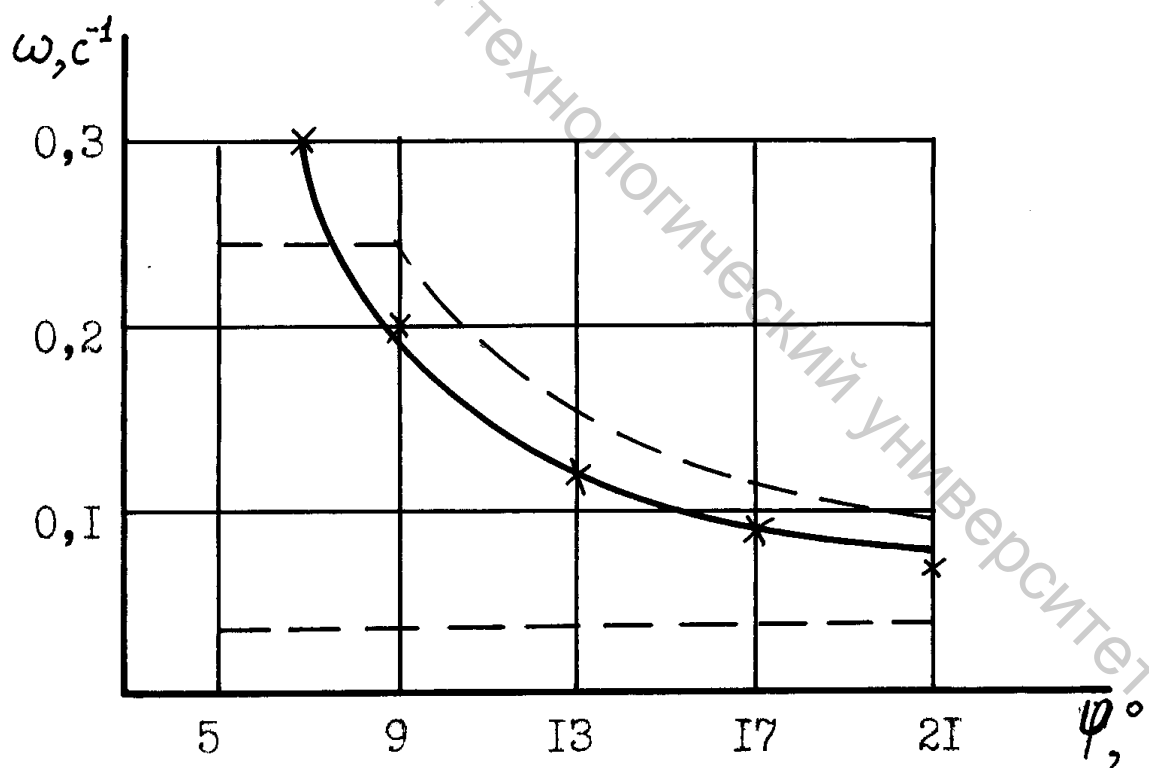


Рис. 7.7. Зависимость рабочих скоростей шнека от угла подъема винтовой нарезки

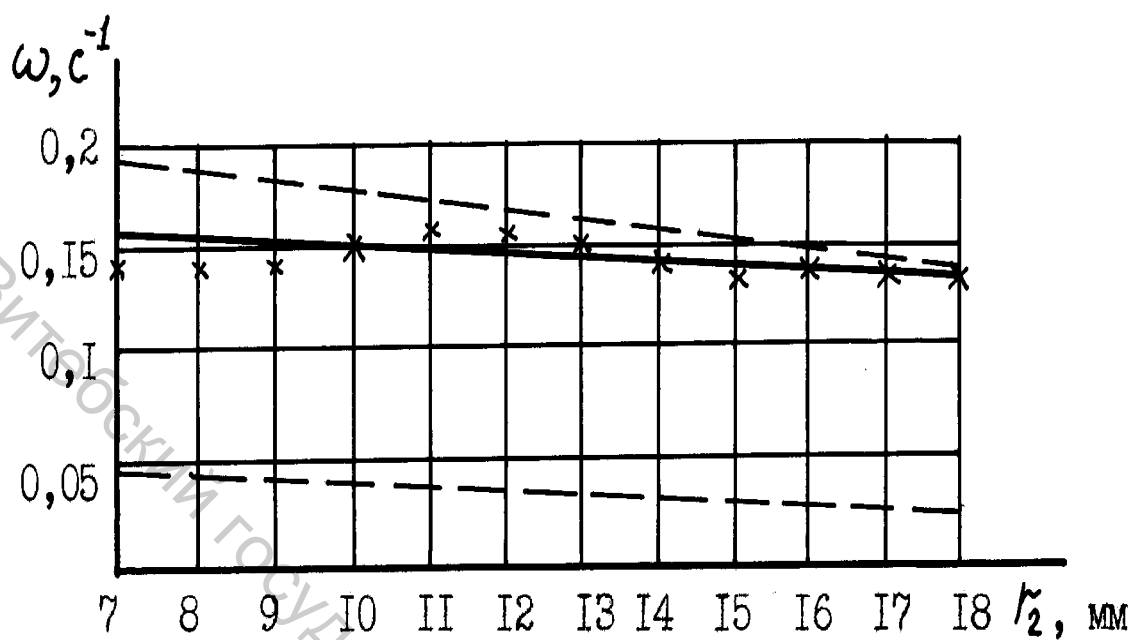


Рис. 7.8. Зависимость рабочих скоростей шнека от радиуса внутренней поверхности винтовой нарезки

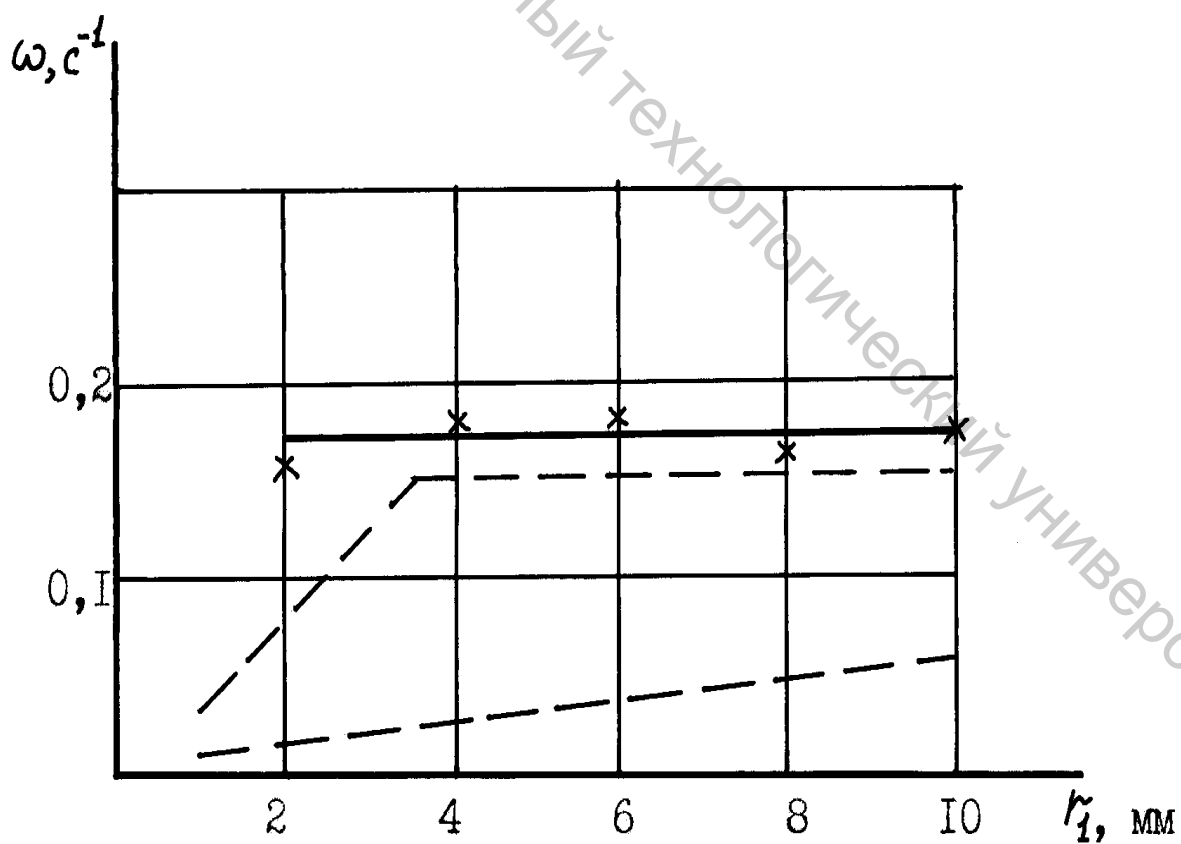


Рис. 7.9. Зависимость рабочих скоростей шнека от радиуса его осевого отверстия

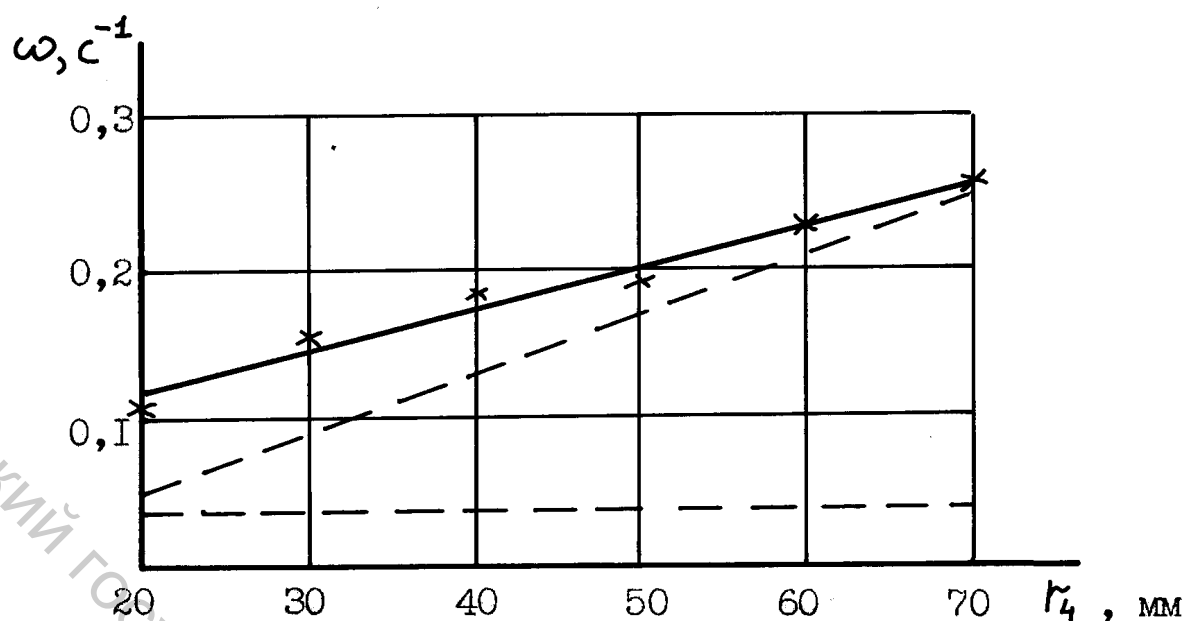


Рис. 7.10. Зависимость рабочих скоростей шнека от радиуса наружной поверхности цилиндра

Зависимость рабочего диапазона скоростей шнека от давления в матрице изображена на Рис. 7.4. По расчетам этот диапазон заключен между двумя гиперболами. Экспериментально удалось зафиксировать наличие как нижней, так и верхней границы диапазона. Максимальная ширина рабочего диапазона скоростей шнека лежит в интервале давлений 4...8 МПа и составляет 0.25 с⁻¹. С ростом рабочего давления ширина диапазона убывает. Теоретически рассчитанный диапазон лежит внутри экспериментально найденного, что позволяет пользоваться расчетными формулами без дополнительной их корректировки. При этом обеспечивается некоторый запас как по нижней, так и по верхней границе диапазона скоростей. Максимальная относительная погрешность для верхней границы наблюдается при давлении 12 МПа и составляет 25%.

На Рис. 7.5 представлена зависимость рабочих скоростей шнека от коэффициента трения материала о цилиндр, в котором установлен шнек. Наличие нижней границы диапазона экспериментально обнаружить не удалось. Дело в том, что теоретически рассчитанная величина этой границы довольно низкая — 0.03 с⁻¹, а установка позволяет вращать шнек с минимальной скоростью 0.01 с⁻¹. Практически можно считать нижнюю границу нулевой.

Экспериментально измеренные значения верхней границы хорошо совпадают с расчетными величинами — погрешность не превышает 10% в широком интервале коэффициентов трения (0.2...0.6). При дальнейшем увеличении коэффициента внешнего трения экспериментальная и теоретически рассчитанная кривые начинают расходиться. Дело в том, что математическая модель процесса деформации построена в предположении несжимаемости материала в последнем витке шнека и матрице устройства (пластификатор занимает все межчастичное пространство в порошке). Для получения больших коэффициентов внешнего трения использовался низкопластифицированный порошок; указанное условие не выполнялось. Связных прессовок на таких смесях получить не удастся.

Может показаться неожиданным, что и теоретическая, и экспериментальная кривая убывают с увеличением коэффициента внешнего трения. Действительно, чем лучше сцепление материала с цилиндром пресса, тем стабильнее процесс (при постоянном трении на шнеке — за счет смазывающего эффекта расплавленного пластификатора). Рабочий диапазон скоростей шнека в таких условиях должен расширяться, а его верхняя граница возрастать. Фактически же она убывает, по крайней мере, до коэффициента трения, равного 0.6.

Объясняется этот эффект следующим образом. На графике указаны не реальные коэффициенты трения, действующие при температуре формования, а предварительно измеренные при комнатной температуре. Чем выше начальный коэффициент трения, тем быстрее поверхность цилиндра достигает температуры плавления пластификатора, после чего происходит резкое уменьшение внешнего трения. Другими словами, при проведении эксперимента не учитывалась зависимость коэффициента трения от температуры. Регистрация же текущей температуры и соответствующего ей коэффициента трения в каждой точке является технически сложной задачей.

На Рис. 7.6 показана зависимость рабочего диапазона скоростей шнека от толщины гребня винтовой нарезки шнека. Ширина диапазона уменьшается с ростом толщины гребня, однако для используемых практи-

чески шнеков это уменьшение несущественно — специально увеличивать толщину гребня не имеет никакого смысла.

С увеличением угла подъема винтовой нарезки верхняя граница рабочего диапазона уменьшается (Рис. 7.7), поэтому при формировании изделий сложного профиля целесообразно применять шнеки с малым углом подъема нарезки. Глубина нарезки на исследуемый параметр не влияет (Рис. 7.8). Экспериментально не зарегистрирована также зависимость рабочего диапазона от радиуса сквозного осевого отверстия шнека (Рис. 7.9). Зависимость диапазона скоростей шнека от радиуса наружной поверхности цилиндра (Рис. 7.10) близка к расчетной.

7.3. ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОКРУЖНОГО ПРОСКАЛЬЗЫВАНИЯ МАТЕРИАЛА

Для измерения коэффициента окружного проскальзывания материала, проходящего по каналу шнека, изготовлено устройство, конструкция которого защищена авторским свидетельством на изобретение [84]. Схема этого устройства изображена на Рис. 7.11а. Рис. 7.11б поясняет конструкцию шкалы, а Рис. 7.11в — разложение скорости материала на окружную и продольную составляющие.

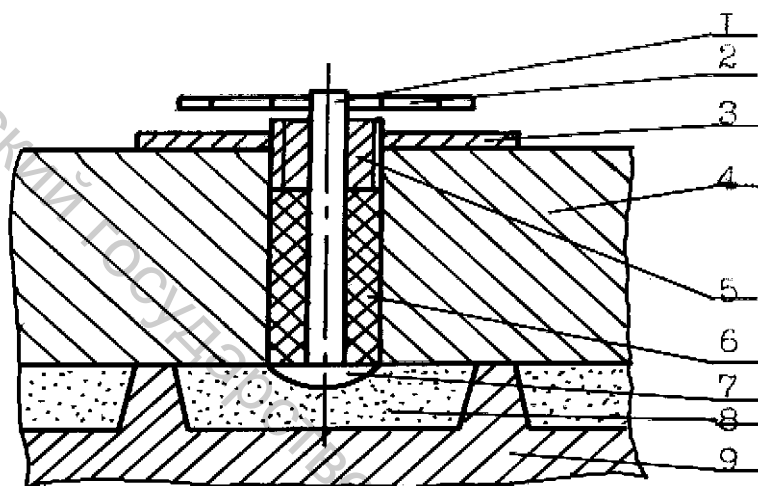
Устройство состоит из штока 1 с указательной стрелкой 2. Круговая шкала 3 установлена на корпусе 4 пресса. В сквозном радиальном отверстии корпуса находится опорная гайка 5 с упругим элементом 6. Шток установлен в центральном отверстии опорной гайки с возможностью поворота и осевого перемещения. Направляющая часть 7 штока прижимается упругим элементом к материалу 8, находящемуся между витками шнека 9.

Полная скорость материала складывается из продольной и окружной составляющих,

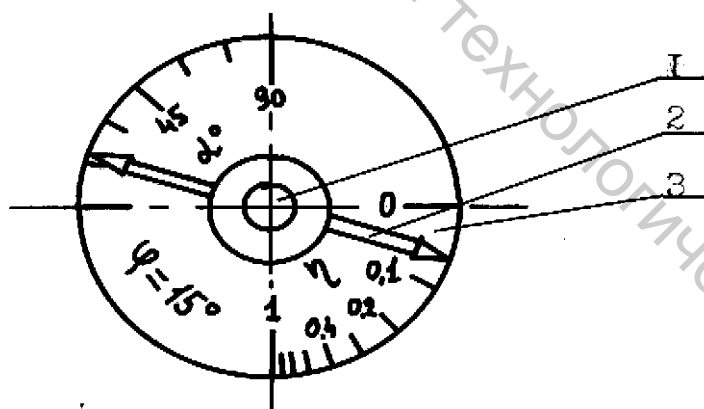
$$\vec{V} = \vec{V}_{пр} + \vec{V}_{окр} \quad [7.1]$$

в результате чего он движется по винтовой линии.

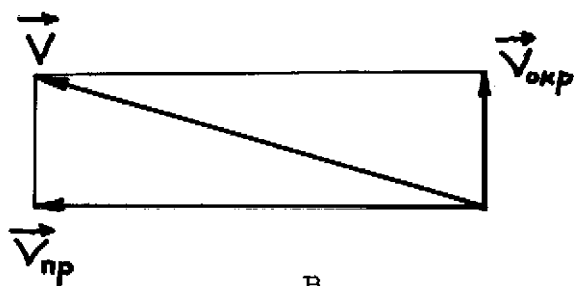
Направляющая часть штока, представляющая собой тонкое ребро, ориентируется вдоль направления движения материала. Это направление и показывает стрелка прибора. Упругий элемент, а также округлая форма направляющей части предохраняет шток от срезания гребнем винта — при набегании гребня шток отжимается вверх.



а



б



в

Рис. 7.11. Схема измерения коэффициента окружного проскальзывания

Стрелка устройства отклоняется при измерении на угол α — угол между направлением полной скорости материала и ее продольной составляющей. Шкала устройства проградуирована непосредственно в значениях коэффициента окружного проскальзывания, причем пересчет произведен из следующих соображений. Продольная и окружная составляющие скорости движения материала определяются выражениями

$$V_{np} = R(\omega - \omega_m) \operatorname{tg} \varphi; \quad V_{окр} = \omega_m R \quad [7.2]$$

где R — расстояние от оси шнека до места измерения; ω и ω_m — угловые скорости шнека и материала соответственно; φ — угол подъема канала шнека. Так как

$$\operatorname{ctg} \alpha = \frac{\omega - \omega_m}{\omega_m} \operatorname{tg} \varphi = \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \operatorname{tg} \varphi \quad \text{где} \quad \eta = \frac{\omega_m}{\omega} \quad [7.3]$$

то коэффициент окружного проскальзывания равен

$$\eta = \frac{1}{1 + \operatorname{ctg} \alpha \operatorname{ctg} \varphi} \quad [7.4]$$

Полученная шкала нелинейна. Таблица 7.2 содержит коэффициенты окружного проскальзывания в зависимости от углов α и φ , использованные при градуировке шкалы.

Таблица 7.2
Коэффициенты окружного проскальзывания для градуировки шкалы

$\alpha^\circ \backslash \varphi^\circ$	5	10	15	20	25
0	0	0	0	0	0
15	0.02	0.05	0.07	0.09	0.11
30	0.05	0.09	0.13	0.17	0.21
45	0.08	0.15	0.21	0.27	0.32
60	0.13	0.23	0.32	0.39	0.45
75	0.25	0.40	0.50	0.58	0.64
90	1	1	1	1	1

7.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ С РЕБРАМИ

При проведении этого эксперимента на шнековом прессе формовали длинномерные изделия с продольными ребрами различной геометрии. Для каждой прессовки определялась величина отношения общей длины дефектных ребер к полной длине всего оребрения. Исследовалась зависимость этой величины от отношения высоты ребра к его ширине и от давления прессования. Геометрические параметры ребер изменялись путем замены формующих матриц. Давление прессования варьировалось изменением степени радиального обжатия материала.

Для проведения эксперимента выбран медный порошок ПМС-1, пластифицированный парафином. Исходный режим формования характеризуется следующими параметрами: давление прессования 15 МПа, отношение высоты ребра к его ширине 1, коэффициенты трения материала о поверхность матрицы 0.14, 0.13 и 0.12 для смесей, содержащих соответственно 12, 15 и 18 % мас. парафина. Пластическая прочность структуры 8.2, 6.0 и 4.1 для тех же смесей. В исходном режиме последовательно изменялось отношение высоты ребра к его ширине и давление прессования. Результаты исследования показаны на Рис. 7.12 — Рис. 7.13. Пунктирными вертикальными линиями отмечены критические значения аргументов, подсчитанные по формуле (4.106). Согласно теории, при этих значениях должен начинаться срез ребер.

Эксперимент показал, что срез ребер наступает в интервале значений изменяемого параметра, а не строго при критической величине, рассчитанной теоретически. Чем больше парафина в материале, тем уже этот интервал. Совпадение теории и эксперимента довольно хорошее. С уменьшением содержания парафина в исследованном диапазоне концентраций и давлений увеличивается возможность формования более тонких и высоких ребер, что довольно неожиданно. Объясняется это следующим образом. Уменьшение концентрации парафина в материале ведет к увеличению давления прессования. При этом прочность структуры возрастает быстрее, чем коэффициент внешнего трения. Однако сформовать ребра при содержании парафина менее 12% мас. не удалось из-за низкой текучести материала.

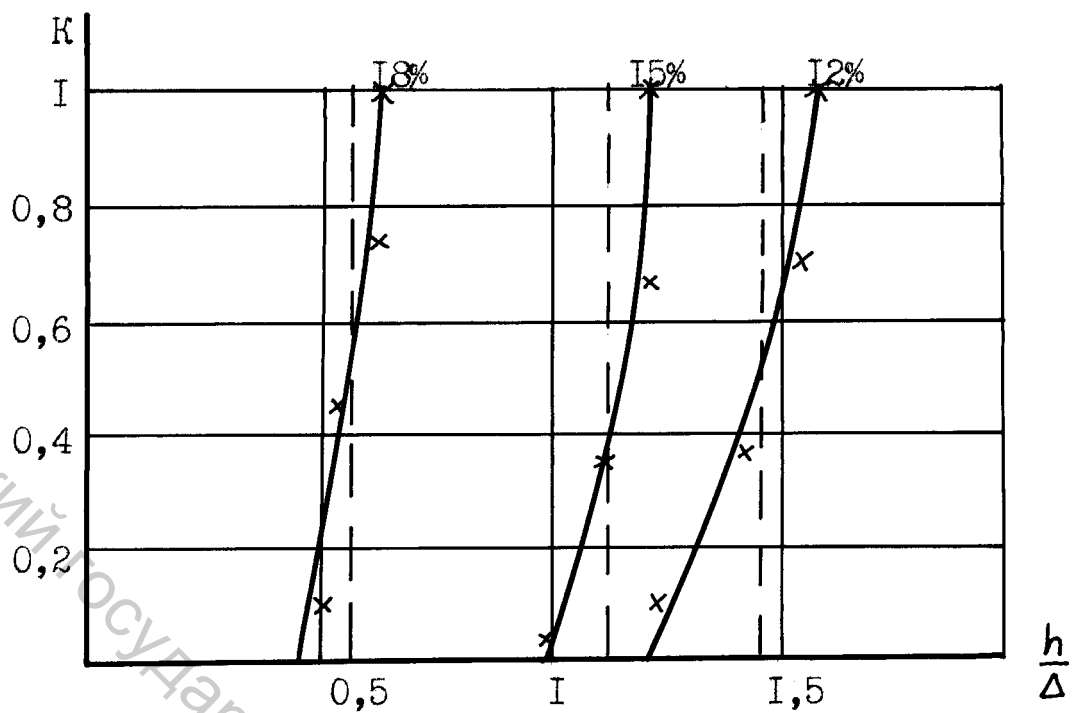


Рис. 7.12. Зависимость относительной величины среза ребер от геометрических параметров ребра

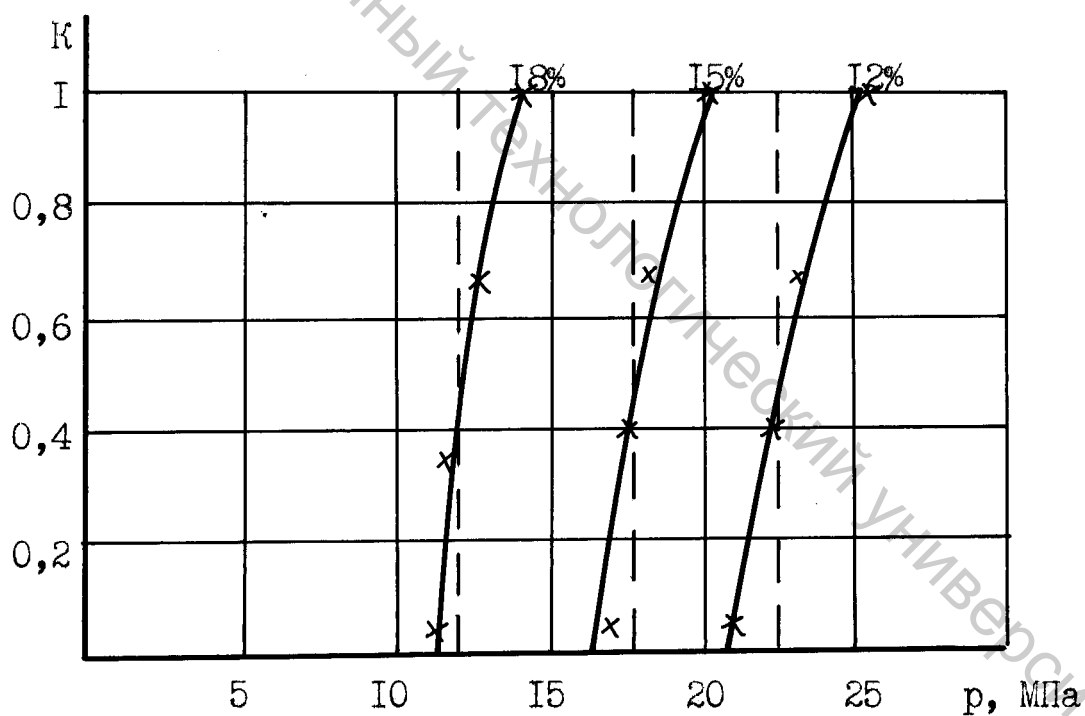


Рис. 7.13. Зависимость относительной величины среза ребер от давления прессования

Анализ результатов этого исследования показывает, что для формирования качественных ребер предельно допустимая величина отношения высоты ребра к его ширине должна быть на 10...30% меньше расчетной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса экструзии пластифицированных порошковых материалов получены следующие результаты.

1. Предложена классификация методов экструзии порошковых материалов, основанная на четырех критериях: температуре деформации, состоянии материала, степени стационарности процесса формования и методе его реализации. Введено понятие высокопластифицированных порошковых композиций как материалов, способных к течению без пластической деформации содержащихся в них частиц. Доказано, что только такие материалы пригодны для холодной экструзии. Уточнено определение холодной экструзии для пластифицированных порошков.
2. Показано, что экструзией формуют разные порошковые материалы: металлы, керамику, твердые и тяжелые сплавы, ферриты, различные химические соединения и композиции. Общим для всех этих технологий, относящихся к разным отраслям промышленности и исторически развивающихся независимо, является использование связующе-пластифицирующих добавок, вводимых в порошок перед прессованием и удаляемых при спекании. **Представляется целесообразным объединение разрозненных процессов формования, базирующихся на выдавливании пластифицированной шихты, в отдельное направление порошковой металлургии — холодную экструзию порошковых материалов. Создание нового направления позволит ускорить научно-технический прогресс в данной области и сократить расход бюджетных средств на дублирующие друг друга исследования в разных отраслях народного хозяйства.**
3. Разработаны основы теории деформации пластифицированных порошковых материалов. Построена математическая модель, связывающая основные параметры процесса экструзии со свойствами материала и геометрическими особенностями зоны формования. Исследовано напряженно-деформированное состояние, возникающее в процессе экструзии порошковых материалов, а также процесс уплотнения пластифицированного порошка в канале сложной формы, ограниченном как подвижными, так и неподвижными поверхностями. Предложена методика проведения технических расчетов с использованием разработанной математической модели.
4. Исследована механика и термодинамика процесса деформации пластифицированного порошка вращающимся шнеком. Температурный

режим, необходимый для стабильной работы шнекового пресса при формировании термопластичных материалов, имеет вид $T_k < T_{пл} < T_{ш} < T_{кип}$, где T_k и $T_{ш}$ — температуры трущихся поверхностей корпуса и шнека; $T_{пл}$ и $T_{кип}$ — температуры плавления и кипения пластификатора. Построена термодинамическая модель процесса шнекового формирования, позволяющая определить диапазон скоростей вращения шнека, обеспечивающий такой температурный режим без дополнительного нагрева или охлаждения элементов пресса.

5. Экспериментально показано, что технологические свойства пластифицированных порошков сильно отличаются от свойств непластифицированных материалов. Уравнения прессования, используемые в порошковой металлургии, не описывают адекватно процесс деформации высокопластифицированных композиций. Различие в свойствах порошков уменьшается с увеличением концентрации пластификатора в материале и практически исчезает при содержании пластификатора около 40% об.
6. На основе построенных математических моделей разработаны методики проектно-конструкторских расчетов экструзионного оборудования. Приведены примеры расчета геометрических параметров матрицы и шнека, привода пресса и опорных узлов. Описана методика расчета некоторых технологических параметров: диапазона допустимых скоростей вращения шнека и мощности, необходимой для его вращения.
7. Экспериментально исследованы физические и технологические свойства порошковых материалов. Описаны методики и оборудование для измерения уплотняемости материалов, их триботехнических и реологических характеристик. Приведены конструкции капиллярного вискозиметра, конического пластомера, порошкового трибометра, устройства для исследования уплотняемости при разных видах напряженного состояния. Описана оригинальная методика измерения коэффициента бокового давления, не использующая тензометрию.
8. Проведен ряд экспериментов по исследованию процесса экструзии порошковых материалов на шнековом прессе. Измерен диапазон рабочих скоростей шнека и коэффициент окружного проскальзывания материала. Исследован процесс формирования изделий с ребрами. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов и экспериментально полученных значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Состояние природной среды Беларуси за 1996 год: Сб. информ. материалов / Под ред. В.Ф. Логинова. — Мн., 1997. — 256 с.
2. Джонсон В., Кудо Х. Механика процесса выдавливания металлов. — М.: Металлургия, 1965.
3. Береснев Б.И., Трушин Е.В. Процесс гидроэкструзии. — М.: Наука, 1976.
4. Колпашиников А.И., Вялов В.А. Гидропрессование металлов. — М., 1973.
5. Прозоров Л.В. Прессование стали и тугоплавких сплавов. — М., 1969.
6. Мальцев М.В., Доронькин Е.Д., Езерский К.И. Гидростатическая обработка тугоплавких металлов. — М., 1978.
7. Касьян М.В., Манукян Н.В., Саркисян Ш.Э. Исследование процесса экструзии железокерамического материала // В кн. Металлокерамические материалы и изделия. — Ереван: ЕрПИ, 1969. — С. 123–128.
8. Грифф А. Технология экструзии пластмасс. — М., 1965.
9. Фишер Э. Экструзия пластических масс. — М.: Химия, 1970. — 340 с.
10. Швецов Г.А., Алимова Д.У., Барышникова М.Д. Технология переработки пластических масс. — М.: Химия, 1988. — 512 с.
11. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс. — М.: Мир, 1965. — 293 с.
12. Бокшицкий М.Н., Гурфинкель Ф.Я. Формующий инструмент экструзионных машин. — М., 1965.
13. Степаненко А.В., Исаевич Л.А., Харлан В.Е. Обработка давлением порошковых сред. — Мн.: Навука і тэхніка, 1993. — 167 с.
14. А.с. 557875 СССР. Устройство для прокатки порошков / В.П. Северденко, А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич. — 1977. — Бюл. № 18.
15. Виноградов Г.А., Радомысльский И.Д. Прессование и прокатка металлокерамических материалов. — М.-Киев: Машгиз, 1963. — 200 с.
16. Степаненко А.В., Исаевич Л.А. Непрерывное формование металлических порошков и гранул. — Мн.: Наука и техника, 1980. — 256 с.
17. Афенченко О.Г. Клиновое прессование металлических порошков // Порошковая металлургия. — 1964. — № 4.
18. Бальшин М.Ю. Порошковая металлургия. — М.: Машгиз, 1938. — 288 с.
19. Демин Е.Н. Практическая технология холодного выдавливания. — М., 1949.

20. Порошковая металлургия в СССР: История. Современное состояние. Перспективы. — М.: Наука, 1986. — 294 с.

21. Каспаров А.М. Советские твердые и сверхтвердые сплавы и способы их применения. — М.: Цветметиздат, 1932. — 120 с.

22. Брохин И.С., Федермеер Д.Л., Шапиро С.С. Формование порошков твердосплавных смесей методом выдавливания // В кн.: Твердые сплавы. — М.: ВНИИТС, 1959. — С. 100–101.

23. Плющ Г.В. Исследование закономерностей мундштучного прессования металлокерамических твердых сплавов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Киев, 1970. — 29 с.

24. Исследование процесса мундштучного прессования порошков твердых сплавов / Г.В. Самсонов, Г.В. Плющ, В.Б. Орденко, Г.А. Прядко // Порошковая металлургия. — 1968. — № 9. — С. 14–19.

25. Исследование закономерностей мундштучного прессования твердосплавных смесей / Г.В. Самсонов, Г.В. Плющ, А.И. Слезко, Г.А. Прядко // Порошковая металлургия. — 1969. — № 7. — с. 18–22.

26. Перельман В.Е., Слободкин В.Ю. Определение оптимальных углов наклона переходных поверхностей рабочего инструмента в процессе экструзии твердых порошковых материалов // Научные труды Московского института сталей и сплавов. — 1977. — № 99. — С. 23–28.

27. Получение биметаллических твердосплавных изделий методом мундштучного прессования / Г.В. Плющ, Г.А. Прядко, А.И. Слезко, В.И. Остапчук // Порошковая металлургия. — 1971. — № 10. — С. 82–87.

28. Злобин Г.П. Формование изделий из порошков твердых сплавов. — М.: Металлургия, 1980. — 224 с.

29. Высокотемпературные неметаллические нагреватели / П.С. Кислый, А.Х. Бадян, В.С. Киндышева, Ф.С. Габриян. — Киев: Наук. думка, 1981. — 160 с.

30. Самсонов Г.В., Кислый П.С. Высокотемпературные неметаллические термопары и наконечники. — Киев: Наук. думка, 1965. — 181 с.

31. Струк Л.И. Исследование процесса прессования дисилицида молибдена // Порошковая металлургия. — 1966. — № 4. — С. 1–6.

32. Андриевский Р.А., Стивак И.И. Нитрид кремния и материалы на его основе. — М.: Металлургия, 1984. — 137 с.

33. Куницкий Ю.А., Морозов В.В., Шлюко В.Я. Высокотемпературные электродные материалы. — Киев: Вища шк., 1977. — 261 с.

34. Самсонов Г.В. Силициды и их использование в технике. — Киев: Изд-во АН УССР, 1959. — 204 с.

35. Самсонов Г.В. Нитриды. — Киев: Наук. думка, 1960. — 380 с.

36. Самсонов Г.В., Серебрякова Т.И., Неронов В.А. Бориды. — М.: Атомиздат, 1975. — 375 с.

37. Самсонов Г.В., Упадхья Г.Ш., Нешпор В.С. Физическое материаловедение карбидов. — Киев: Наук. думка, 1974. — 456 с.

38. Самсонов Г.В., Виницкий И.М. Тугоплавкие соединения. — М.: Металлургия, 1976. — 558 с.

39. Hewitt R.L., Wallace W., Malherbe M.C. // Powder Metallurgy. — № 16. — 1973, p. 88.

40. Perry E.R., Jenkins I. Proc. 2nd Plansee Seminar, Springer, Vienna, 1956, p. 326.

41. Гессингер Г.Х. Порошковая металлургия жаропрочных сплавов. — Челябинск: Металлургия, 1988. — 320 с.

42. Макаров Б.В., Каморина Г.И., Летюк Л.М. Пластификация ферритовых порошков // Порошковая металлургия. — 1979. — № 11. — С. 6–9.

43. Порошковая металлургия. Материалы, технология, свойства, области применения: Справочник / И.М. Федорченко. — Киев: Наук. думка, 1985. — 624 с.

44. Гарднер Н.Р., Дональдсон А.Д., Йенс Ф.М. Экструзия металлокерамических порошков // Новое в порошковой металлургии. — М.: Металлургия, 1970.

45. Живов Л.И., Олесов Ю.Г., Павлов В.А. Экструзия титановых сварочных электродов // Цветные металлы. — 1968. — № 2. — С. 84–85.

46. Szartzwelder J.H. Extrusion of aluminum powder compacts // Int. J. Powder Metallurgy, 1967. — v. 3. — № 3. — p. 53–57.

47. Sheppard T. and Greasley. Densification and pressure requirements during extrusion of atomized aluminum powder // Powder Metallurgy. — 1972. — v. 15. — № 29. — p. 17.

48. Sheppard T. and Greasley. Structure and properties of some tin bronzes produced by extrusion of atomized powder // Powder Metallurgy. — 1978. — v. 21. — № 3. — p. 155.

49. Андриевский Р.А. Фильтры и пористые изделия. — М.: ЦИТЭИН, 1963.

50. Chare P.J.M. and Sheppard T. Powder Extrusion as a Primary Fabricating Process for Al-Fe Alloys // Powder Metallurgy. — 1973. — v. 16. — № 32. — p. 437.

51. Shaker H.D. Cold extrusion of powder material. Material flow and work piece properties. “Proceeding 18th International Machine Tool Design and Research Conference”. — London, September. — 1977. — p. 233.

52. А. с. 1627322 СССР, МКИ В 22 F 3/10. Устройство для получения спеченных порошковых изделий / С.С. Клименков, К.С. Матвеев, В.В. Пятов, А.Н. Красновский // БИ. — 1991. — № 6.

53. Степаненко А.В., Исаевич Л.А., Веремейчик А.А. Непрерывное формование труб из металлических порошков // Порошковая металлургия. — 1983. — № 11. — С. 12–17.

54. А.с. 664751 СССР. Способ формования трубных заготовок из порошков / В.П. Северденко, А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич. — БИ. — 1979. — № 20.

55. А.с. 952439 СССР. Устройство для непрерывного формования труб из порошка / А.В. Степаненко, Л.А. Исаевич, А.А. Веремейчик. — БИ. — 1982. — № 31.

56. Wassink R.J. Klein. Continuous hot pressing of reactive materials. — High Temp. — High Pressure, 1971, 3. — № 4. — p. 411–418.

57. Okimoto Kunio, Shima Susumu, Oyane Moria. Соединение под давлением прессовок из металлических порошков. — Сосэй то како, J. Jap. Soc. Technol. Plast., 1977, 18. — № 195. — p. 319–324.

58. Груздев И.Э., Мирзоев Р.Г., Янков В.И. Теория шнековых устройств. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. — 144 с.

59. Дмитриев Л.М. Устройства для переработки пластических масс литьем под давлением. — М., 1964.

60. Ильинский Д.Я. Расчет и конструирование червячных машин для легкой промышленности. — М., 1965.

61. Королев К.М. Исследование ленточных шнековых прессов пластического формования керамических изделий. — М.: Машиностроение, 1960. — 210 с.

62. Геррман Х. Шнековые машины в технологии. — Л.: Химия, 1975. — 230 с.

63. Каплун Я.Б. Формующее оборудование экструдеров. — М.: Машиностроение, 1969.

64. Лукинов М.И. Производство керамических дренажных труб. — М.: Стройиздат, 1981. — 216 с.

65. Производство керамических канализационных труб / Зайонц Р.М. и др. — М.: Стройиздат, 1971.

66. Производство электрических кабелей и проводов с резиновой и пластмассовой изоляцией / О.Ш. Бабицкий и др. — М.: Высшая школа, 1972. — 400 с.

67. Сторож Б.Д., Грабчук Б.Л., Заверуха О.В. Формование многослойных изделий из материалов на основе тугоплавких соединений на вакуумном прессе // В кн.: Развитие методов формования изделий из порошков. — Киев: Наук. Думка, 1976. — С. 151–155.

68. Сторож Б.Д., Кислый П.С. Исследование особенностей процесса формования пластифицированной порошковой шихты на вакуумном червячном прессе // Развитие методов формования изделий из порошков. — Киев: изд-во АН УССР, 1976. — С. 142–150.

69. Исследование особенностей процесса формования ППМ на вакуумном червячном прессе / *Б.Д. Сторож, П.С. Кислый* // В кн.: Развитие методов формования изделий из порошков. — Киев: Институт проблем материаловедения АН УССР. — 1976. — С. 142–151.

70. *Алексеев И.С.* Разработка процесса непрерывного формования пористых длинномерных изделий из порошковых материалов методом экструзии шнеком: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.05. — Мн., 1985.

71. *Кулагин В.И.* Разработка теории и технологии непрерывного формования сплошных профилей: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.05. — Мн., 1985.

72. *Жемчужный М.И.* Разработка способов и технологии формования из порошковых композиций изделий с переменными свойствами: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.05. — Мн., 1986.

73. *Пятов В.В.* Разработка процесса непрерывного формования пористых изделий сложного профиля экструзией порошков на шнековом прессе: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.06. — Мн., 1988. — 187 с.

74. *Красновский А.Н.* Разработка технологии непрерывного формования изделий из порошковых материалов и композиций: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.16.05. — Мн., 1990.

75. А. с. 1671414 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для непрерывного формования порошковых материалов / *С.С. Клименков, В.В. Пятов, А.М. Лапшин* // БИ. — 1991. — № 31.

76. А.с. 1199447 СССР, МКИ В 22 F 3/02. Устройство для непрерывного прессования порошков / *А.В. Степаненко, С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.И. Кулагин*. — БИ. — 1987 — № 47.

77. А. с. 1577924 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для непрерывного прессования порошков / *А.Н. Красновский, А.В. Карпушко, В.В. Савицкий, В.В. Пятов, В.В. Петухов* // БИ. — 1990. — № 26.

78. А. с. 1154812 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для непрерывного прессования изделий из порошка / *С.С. Клименков, В.В. Пятов*. — 1985 г.

79. А. с. 1374566 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для прессования порошков / *С.С. Клименков, В.В. Пятов, В.В. Петухов, А.Н. Красновский*. — 1987 г.

80. А. с. 1548946 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для экструзии пластифицированных порошковых материалов / *А.Н. Красновский, В.В. Петухов, В.В. Пятов, В.В. Савицкий, А.В. Карпушко, К.С. Матвеев*. — 1989 г.

81. А. с. 1555966 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для экструзии непластифицированных металлических порошков / *А.Н. Красновский, В.В. Пятов, В.В. Савицкий, А.В. Карпушко, К.С. Матвеев*. — 1989 г.

82. А. с. 1694350 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ непрерывного формования изделий из порошковых материалов / В.В. Пятов, К.С. Матвеев, А.Н. Красновский, В.В. Савицкий, А.В. Карпушко // БИ. — 1991. — № 31.

83. А. с. 1619567 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для непрерывной экструзии порошковых материалов / В.В. Пятов, В.В. Савицкий, К.С. Матвеев, А.Н. Красновский, А.С. Шандриков, А.В. Карпушко. — 1990 г.

84. А. с. 1341034 СССР, МКИ В 22 F 3/20; В 30 В 15/02. Устройство для экструзии порошка / А.В. Степаненко, С.С. Клименков, В.В. Пятов, В.В. Петухов // БИ. — 1987. — № 36.

85. А. с. 1659179 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для экструзии порошковых композиций / А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, В.В. Пятов, А.Л. Коваленко, А.М. Лапшин // БИ. — 1991. — № 24.

86. А. с. 1806898 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для непрерывного формования порошковых материалов / В.В. Пятов, А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, А.Л. Коваленко, А.М. Лапшин // БИ. — 1993. — № 13.

87. А. с. 1823288 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для непрерывного формования изделий из порошков / В.В. Пятов, К.С. Матвеев, В.В. Савицкий, А.Н. Красновский, А.М. Лапшин, А.С. Шандриков. — 1992.

88. А. с. 1785143 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для экструзии пластифицированных порошковых материалов / В.В. Пятов, К.С. Матвеев, А.Н. Красновский, В.В. Савицкий, А.М. Лапшин, А.С. Шандриков. — 1992.

89. А. с. 1671413 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для непрерывного прессования порошка / А.В. Степаненко, А.Н. Красновский, В.В. Пятов, К.С. Матвеев, А.Л. Коваленко // БИ. — 1991. — № 31.

90. А. с. 1600142 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для экструдирования изделий из порошков / В.В. Пятов, А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, В.В. Савицкий, А.В. Карпушко. — 1990 г.

91. А. с. 1565725 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для прессования изделий из порошковых материалов / А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, В.В. Савицкий, В.В. Пятов, А.В. Карпушко // БИ. — 1990. — № 19.

92. А. с. 1656773 СССР, МКИ В 22 F 3/02. Устройство для формирования длинномерных заготовок из порошка / В.В. Пятов, А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, А.М. Лапшин, А.Л. Коваленко. — 1991 г.

93. А. с. 1323234 СССР, МКИ В 22 F 3/20; В 30 В 12/00. Устройство для экструдирования полых изделий из порошка / П.А. Витязь, С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.В. Пятов, В.В. Савицкий // БИ. — 1987. — № 26.

94. Остапчук Ю.Г., Язловицкий М.Л. Дисковые экструдеры. — Киев: Наукова думка, 1972.

95. Патент США № 4552520, МКИ В 22 F 3/02, 1985.

96. А. с. 1683235 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для непрерывного прессования порошков / *В.В.Пятов, О.Н. Ахтанин, И.С. Алексеев, К.С. Матвеев, А.Н. Красновский*. — 1991 г.

97. А. с. 1623836 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для непрерывного формования изделий из порошков / *С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.В. Пятов, О.Н. Ахтанин, А.С. Шандриков, В.В. Савицкий* // БИ. — 1991. — № 4.

98. А. с. 1219253 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ непрерывного формования порошков / *С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.В. Пятов, О.Н. Ахтанин* // БИ. — 1986. — № 11.

99. А. с. 1400779 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ непрерывного формования порошка / *С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.В. Пятов* // БИ. — 1988. — № 21.

100. А. с. 1671410 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для формования порошковых материалов / *А.В. Карпушко, В.В. Савицкий, К.С. Матвеев, В.В. Пятов, А.Н. Красновский, А.С. Шандриков* // БИ. — 1991. — № 31.

101. А. с. 1804021 СССР, МКИ В 22 F 3/02. Способ получения изделий из труднодеформируемых порошковых материалов / *В.В. Пятов, К.С. Матвеев, А.Н. Красновский, В.В. Савицкий, А.Л. Коваленко, А.М. Лапшин*. — 1992.

102. А. с. 1783691 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ экструзии порошковых материалов / *А.Н. Красновский, В.В. Пятов, А.Л. Коваленко, К.С. Матвеев, В.В. Савицкий*. — 1992.

103. А. с. 1555965 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ прессования изделий из порошковых материалов / *А.В. Степаненко, С.С. Клименков, В.В. Пятов, А.Н. Красновский, К.С. Матвеев*. — 1989 г.

104. А. с. 1601883 СССР, МКИ В 22 F 7/04. Способ изготовления тепловых труб / *А.В. Карпушко, А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, В.В. Пятов, В.В. Савицкий*. — 1990 г.

105. А. с. 1547949 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для нанесения покрытий на внутреннюю поверхность труб / *А.В. Карпушко, К.С. Матвеев, В.В. Пятов, В.В. Савицкий, А.Н. Красновский* // БИ. — 1990. — № 9.

106. Теоретический анализ процесса ротационного прессования / *В.В. Пятов, И.С. Алексеев, А.В. Карпушко* // В кн.: *Tendencje rozwojowe w technologii maszyn*. — Zielona Gora, 1991.

107. *Косторнов А.Г., Райченко А.И.* Реологические исследования пластифицированной порошковой смеси // Порошковая металлургия. — 1966. — № 5.

108. *Райченко А.И., Косторнов А.Г.* Реологические исследования пластифицированной порошковой шихты // Порошковая металлургия. — 1966. — № 6. — С. 11–12.

- 109.** Косторнов А.Г., Райченко А.И. Реологические исследования пластифицированной порошковой шихты // Порошковая металлургия. — 1966. — № 12.
- 110.** Уилкинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. — М.: Мир, 1964. — 216 с.
- 111.** Рейнер М. Деформация и поток. — М.: ИЛ, 1964.
- 112.** Берихардт Э. Переработка термопластических материалов. — М.: Госхимиздат, 1962. — 747 с.
- 113.** Виноградов Г.В., Малкин А.Я. Реология полимеров. — М.: Химия, 1977. — 438 с.
- 114.** Виноградов Г., Догадини Б., Прозоровская Н. Вязкостные свойства эластомера на примере дивинил-стерильного каучука // «Коллоидный журнал», 1968.
- 115.** Каргин В.А., Слонимский Г.Л. Краткие очерки по физико-химии полимеров. — М.: Химия, 1967. — 231 с.
- 116.** Косторнов А.Г., Райченко А.И. Свойства пластифицированной порошковой смеси и закономерности ее экструзии // В кн.: Порошковая металлургия. Сборник докладов VIII Всесоюзной конференции по прогрессивным методам производства деталей из порошков. — Мн.: Выш. школа, 1996. — С. 96–104.
- 117.** Друянов Б.А., Вартанов К.Б. Вязкопластическое течение сжимаемого порошкового материала // Порошковая металлургия. — 1984. — № 8. — С. 24–27.
- 118.** Гун Г.Я. Математическое моделирование процессов обработки металлов давлением. — М.: Металлургия, 1983. — 352 с.
- 119.** Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. — М.: Металлургия, 1986. — 688 с.
- 120.** Айзенкольб Ф. Порошковая металлургия. — М.: Metallurgizdat, 1959.
- 121.** Федорченко И.М., Андриевский Р.А. Основы порошковой металлургии. — Киев: Изд-во АН УССР, 1963.
- 122.** Жданович Г.М. Теория прессования металлических порошков. — М.: Металлургия, 1969.
- 123.** Дорофеев Ю.Г. Уравнения уплотнения пористых материалов // В кн.: Использование метода динамической металлокерамики в стружковой и порошковой металлургии. — Ростов, 1966. — С. 21–25.
- 124.** Раковский В.С. Основы порошкового металловедения. — М.: Оборонгиз, 1962.
- 125.** Дорофеев Ю.Г. // Порошковая металлургия. — 1966. — № 8. — С. 18–29.

126. Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д. // Порошковая металлургия. — 1967. — № 8. — С. 19–25.

127. Кунин Н.Ф., Юрченко В.Д., Конов А.Н. // Порошковая металлургия. — 1969. — № 10. — С. 17–23.

128. Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д. // Порошковая металлургия. — 1968. — № 2. — С. 13–16.

129. Кунин Н.Ф., Юрченко Б.Д. // Порошковая металлургия. — 1968. — № 8. — С. 15–17.

130. Бальшин М.Ю. Об определении контактного сечения и некоторых механических свойств пористых, порошковых и волокнистых материалов // В кн.: Порошковая металлургия в новой технике. — М.: Наука, 1968. — С. 51–55.

131. Жданович Г.М. // Порошковая металлургия. — 1969. — № 4. — С. 10–15.

132. Жданович Г.М. // Порошковая металлургия. — 1969. — № 5. — С. 24–28.

133. Жданович Г.М. // Порошковая металлургия. — 1969. — № 6. — С. 11–14.

134. Юрченко А.Г., Пугина Л.П., Щербань Н.И. // Порошковая металлургия. — 1969. — № 5. — С. 19–23.

135. Щербань Н.И., Петрова Е.М., Слепцов В.М. // Порошковая металлургия. — 1970. — № 2. — С. 6–10.

136. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых материалов. — М.: Наука, 1968. — 120 с.

137. Дорофеев Ю.Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок. — М.: Металлургия, 1977. — 216 с.

138. Ковальченко М.С. Теоретические основы горячей обработки пористых материалов давлением. — Киев: Наукова думка, 1980. — 238 с.

139. Дорофеев В.Ю., Лозовой В.И. Некоторые особенности уплотнения порошкового материала при горячей штамповке с элементами экструзии // Порошковая металлургия. — 1985. — № 3. — С. 11–14.

140. Уплотнение материалов в жестких конических и цилиндрических матрицах / Г.Л. Петросян и др. // Порошковая металлургия. — 1982. — № 5. — С. 22–27.

141. Петросян Г.Л., Мусаелян Г.В., Петросян Х.Л. Исследование процесса выдавливания спеченного пористого материала через коническую матрицу // Порошковая металлургия. — 1985. — № 3. — С. 19–23.

142. Петросян Г.Л., Нерсисян Г.Г., Аветян С.С. Исследование напряженно-деформированного состояния осесимметричной осадки пористых материалов методом конечных элементов. — Изв. АН АрмССР. Механика, 1980. — № 1 (33). — С. 65–76.

143. *Петросян Г.Л.* Формование пористых труб и стержней // Докл. АН АрмССР, 1977. — № 3 (14). — С. 176–181.

144. *Петросян Г.Л.* О теории пластичности пористых тел // Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1977. — № 5. — С. 10–13.

145. *Скороход В.В., Тучинский Л.И.* Условие пластичности пористых тел // Порошковая металлургия, 1978. — № 11. — С. 83–87.

146. Расчет процесса экструзии порошковой заготовки через коническую матрицу / *Осадчий В.А., Жадан В.Т., Гаврилов-Крямичев Н.Л., Горовой В.А., Долгий Н.И., Скорняков Ю.А.* — Известия ВУЗов: черная металлургия. — 1985. — № 11. — С. 81–84.

147. *Райченко А.И.* К вопросу об экструзии пластично-вязкой порошковой смеси // Порошковая металлургия. — 1967. — № 9. — С. 6–9.

148. *Райченко А.И.* Задачи, связанные с непрерывным прессованием труб из порошков // Порошковая металлургия. — 1964. — № 6. — С. 17–21.

149. *Райченко А.И.* Задачи, связанные с выдавливанием труб из вязкопластичной шихты // Порошковая металлургия. — 1965. — № 8. — С. 23–34.

150. *Янков В.И.* Создание и исследование автогенного растворителя непрерывного действия в производстве полиакрилонитрильных волокон. Дисс. ... канд. техн. наук. — Л., 1972. — 116 с.

151. *Багаугдинов И.И., Пелеев А.И.* Применение шнеков в мясной промышленности. — М.: ЦНИИТЭИминмясомолпрома, 1971.

152. *Шляхтер Г.Н.* Исследование двухстадийного пресса. — Дис. ... канд. техн. наук. — М., 1970.

153. *Акимов М.И.* О движении тяжелой точки по винтовой линии на шероховатой поверхности // «Записки Ленинградского горного института». — Л., 1936. — т. 10. — Вып. 1. — С. 1–21.

154. *Алтынбеков Ф.Е.* Исследование процесса транспортирования сыпучих грузов вертикальным быстроходным шнеком. — Дис. ... канд. техн. наук. — Л., 1968. — 116 с.

155. *Григорьев А.М.* Винтовые конвейеры. — М.: Машиностроение, 1972. — 184 с.

156. *Рыбаков И.Я.* Теория и расчет вертикальных шнеков // Торфяная промышленность. — 1951. — № 8.

157. Прессы пищевых и кормовых производств / Под ред. *А.Я. Соколова*. — М.: Машиностроение, 1973. — 288 с.

158. *Салазкин К.А., Кольман-Иванов Э.Э.* Таблеточные машины. — М.: Машиностроение, 1966.

159. Расчет усилия червячного пресса для формования изделий из пластифицированных порошковых масс / *Б.Д. Сторож, П.С. Кислый*. В кн.:

Развитие методов формования изделий из порошков. Киев: Институт проблем материаловедения АН УССР. — 1976 — С. 62–71.

160. Бернхард Т.Э. Переработка термопластичных материалов. — М.: Химия, 1965. — 747 с.

161. Клименков С.С. Теоретический анализ энергосиловых параметров экструдирования порошков на шнековых установках // В кн.: Высоко-энергетические процессы получения композиционных и порошковых изделий, материалов и покрытий. — Мн.: Вышэйшая школа, 1989. — С. 121.

162. Клименков С.С. Энергетические затраты при прессовании порошков на шнековых установках // В книге: Сборник научных трудов БРНПОПМ. — Мн., 1987. — № 11. — С. 68.

163. Injection molding for near-net-shape PM components / Hadfield D. // "Metals and Mater.". — 1985. — 1. — № 10. — p. 609–612.

164. Injection molding of metal powders-present state and development perspectives/ Kaczmar Jacek.: "Grundlag., Herstell und Eigenschaft pulvermet. Werkst. 8 Int. pulvermet. Tag., Dresden, 24-26 Sept., 1985. Bd 1: Hauptvortrag - Kurzfass.". — s. 1., a., 75.

165. Прессование тугоплавких соединений в вакуумной шнек-машине / П.С. Кислый, М.А. Кузнецова, А.Х. Бадян, Б.Д. Сторож, А.Н. Кацук // В кн.: Теория и практика прессования порошков. — Киев: изд-во АН УССР, 1975.

166. Попильский Р.Я., Пивинский Ю.Е. Прессование порошковых керамических масс. — М.: Металлургия, 1983. — 176 с.

167. Кудря Н.А., Романова Н.И. Исследование и экспериментальная проверка нового пластификатора для производства твердых сплавов // Научные труды Всесоюзного научно-исследовательского института тугоплавких металлов и твердых сплавов. — 1977. — № 17. — С. 53–61.

168. Kortovich C.S. Technical report AFML-TR-69-101, Wright-Paterson Air Force Base, Ohio, June 1969.

169. Moyer K.H. Modern developments in Powder metallurgy, Vol. 5, Plenum press, New York, 1971, p. 85.

170. Самсонов Г.В., Кислый П.С. Высокоугнеупорные неметаллические термодары и наконечники. — Киев: Наук. думка, 1965. — 256 с.

171. Корниенко П.А., Пугин В.С. Механические свойства пластификаторов // Порошковая металлургия. — 1969. — № 1. — С. 34–36.

172. Корниенко П.А., Пугин В.С. Исследование влияния синтетического пластификатора на свойства пористых металлокерамических материалов // В кн.: Порошковая металлургия. Сборник докладов восьмой Всесоюзной конференции по прогрессивным методам производства деталей из порошков. — Мн.: Высш. школа, 1966. — С. 207–214.

173. *Плющ Г.В., Слезко А.И.* Применение поверхностно-активных веществ в процессе мундштучного прессования твердых сплавов. — Порошковая металлургия. — 1970. — № 2. — С. 11–12.

174. *Грибовский П.О.* Горячее литье керамических изделий. — М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961.

175. *Кислый П.С., Самсонов Г.В.* Основы процесса мундштучного прессования труб и стержней из порошков тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. — 1962. — № 3. — С. 31–48.

176. *Либенсон Г.А.* Производство спеченных изделий. — М.: Металлургия, 1982. — 256 с.

177. *Булычев В.П., Тюрленев В.И.* Роль пластификатора при мундштучном прессовании заготовок из карбида циркония // Порошковая металлургия. — 1982. — с. 21–27.

178. А. с. 1146893 СССР, МКИ В 22 F 1/100. Способ пластифицирования порошковых материалов / *С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.В. Пятов.* — 1985 г.

179. *Худокормов Д.Н., Керженцева Л.Ф., Шелехина В.М.* Влияние способа введения пластификатора в дисперсные порошки на их свойства // В кн.: Порошковая металлургия. — 1980. — вып. 4.

180. А. с. 1638905 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для гранулирования порошковых материалов / *А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, А.М. Лапшин, В.В. Пятов, А.Л. Коваленко.* — 1990 г.

181. Пористые порошковые материалы и изделия из них / *П.А. Витязь, В.М. Капцевич, В.К. Шелег.* — Мн.: Выш. шк., 1987. — 164 с.

182. *Пятов В.В., Ковчур А.С.* Пластифицированный порошковый материал // В кн.: Сборник научных трудов ВГТУ. — Витебск: ВГТУ, 1995. — ч.2. — С. 35–36.

183. Новые процессы деформации металлов и сплавов / *А.П. Коликов, П.И. Полухин, А.В. Крупин* и др. — М.: Высшая школа, 1986. — 351 с.

184. *Бальшин М.Ю.* Научные основы порошковой металлургии и металлургии волокна. — М.: Металлургия, 1972. — 335 с.

185. Пористые проницаемые материалы / *С.В. Белов, П.А. Витязь, В.К. Шелег, В.М. Капцевич* и др. — М.: Металлургия, 1987. — 335 с.

186. *Белов С.В.* Пористые металлы в машиностроении. — М.: Машиностроение, 1981. — 247 с.

187. *Павловская Е.И., Шибряев Б.Ф.* Металлокерамические фильтры. — М.: Недра, 1967. — 164 с.

188. Свойства порошков металлов, тугоплавких соединений и спеченных материалов. — Киев: Наук. думка, 1978. — С. 82–95.

189. Низкотемпературные тепловые трубы / Под ред. *Л.Л. Васильева.* — Мн.: Наука и техника, 1976. — 134 с.

190. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов / Под ред. *Г.И. Воронина*. — М.: Машиностроение, 1976. — 44 с.

191. Изготовление и исследование криогенных тепловых труб со спеченной капиллярно-пористой структурой / *П.А. Витязь* и др. // Теплообмен в криогенных устройствах. — Мн.: АН БССР, 1979. — С. 124–137.

192. *Stengel R.F.* Stacked microorifice modules feed rocket fuel and oxidizer. — Design News, 1967. — v. 22. — № 3. — p. 32–33.

193. Локализация пламени пористыми металловолокнистыми пламепреградителями / *И.И. Стрижевский* и др. // Порошковая металлургия. — 1979. — № 6. — С. 88–89.

194. *Земо Ф.Д.* Передача тепла через пористые материалы // Новое в порошковой металлургии. — М.: Металлургия, 1970. — С. 168–179.

195. Интенсификация теплообмена в кольцевом канале / *В.М. Поляев* и др. // Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1976. — № 2. — С. 86–90.

196. *Зарубин В.С.* Об оптимальной геометрии оребрения на поверхности теплообмена // Изв. ВУЗов. Машиностроение. — 1963. — № 3.

197. *Калинин Э.К., Дрейцер Г.А.* Современные проблемы интенсификации теплообмена при движении двухфазных потоков в каналах // Повышение эффективности теплообмена в энергетическом оборудовании. — Л.: Наука, 1981. — С. 5–21.

198. *Василенко И.И., Нечипоренко Н.Н.* Изготовление пористых электродов из нитрида титана // Порошковая металлургия. — 1973. — № 3. — С. 39–41.

199. *Резников Г.Л.* Топливные элементы. — М.: Информстандарт-электро, 1968. — 36 с.

200. *Ермаков С.С., Вязников Н.Ф.* Металлокерамические детали в машиностроении. — Л.: Машиностроение, 1975. — 232 с.

201. *Артамонов А.Я., Заболотный Л.В.* Влияние некоторых факторов на качество обработанной поверхности пористых металлокерамических материалов // Порошковая металлургия. — 1962. — № 1. — С. 57–60.

202. *Фельдштейн Б.Э.* Токарная обработка порошковой стали, легированной хромом // Порошковая металлургия. — 1980. — № 5. — С. 104–106.

203. *Конonenков В.И.* Износ инструментов при резании металлокерамических материалов. — М.: Машиностроение, 1972. — 73 с.

204. *Белькевич Б.А.* Обработка металлокерамических материалов резанием. — Мн.: Наука и техника, 1965. — 100 с.

205. *Витязь П.А.* Теоретические и практические основы создания эффективных спеченных проницаемых материалов и их внедрение в народное хозяйство. — Дисс...докт. техн. наук. — Мн., 1983.

206. *Андреевский Р.А.* Пористые металлокерамические материалы. — М.: Металлургия, 1964. — 188 с.

207. *Гуляев А.И., Поднозов В.Г., Пырялов Л.А.* Контактная сварка спеченных порошковых материалов // Порошковая металлургия. — 1976. — № 6. — С. 98–102.

208. Изготовление ребристых труб из САПа и их аргонно-дуговая и диффузионная сварка / *П.В. Кишинев* и др. // Порошковая металлургия. — 1970. — № 2. — с. 90–94.

209. *Шибряев Б.Ф.* Пористые проницаемые спеченные материалы. — М.: Металлургия, 1982. — 168 с.

210. *Добровольский А.Г.* Шликерное литье. — М.: Металлургия, 1977. — 240 с.

211. *Трунов Г.В.* Метод литья термопластичных шликеров // Порошковая металлургия. — 1969. — № 5. — С. 33–42.

212. *Голубев Т.М., Иващенко В.В.* Применение вибрационного уплотнения для изготовления из порошковых материалов изделий сложной формы.

213. А. с. 1292270 СССР, МКИ В 22 F 3/20; В 30 В 11/24. Устройство для формования труб с винтовыми ребрами / *П.А. Витязь, С.С. Клименков, В.В. Пятов.* — 1986 г.

214. А. с. 1332658 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для формования трубчатых изделий с винтовым оребрением / *П.А. Витязь, С.С. Клименков, В.В. Пятов.* — 1987 г.

215. А. с. 1607198 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для формования пористых изделий из пластифицированных порошков / *К.С. Матвеев, А.Н. Красновский, В.В. Пятов, В.В. Савицкий, А.В. Карпушко.* — 1989 г.

216. *Дорожкин Н.Н.* Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками. — Мн.: Наука и техника, 1975. — 152 с.

217. *Дорожкин Н.Н., Абрамович Т.М., Жорник В.И.* Получение покрытий методом припекания. — Мн.: Наука и техника, 1980. — 176 с.

218. *Ярошевич В.К., Белоцерковский М.А.* Антифрикционные покрытия из металлических порошков. — Мн.: Наука и техника, 1981. — 174 с.

219. *Кашицын Л.П.* Способы и устройства для нанесения покрытий из металлических порошков // Порошковая металлургия. — Вып. 4. — Мн.: Вышэйшая школа, 1980. — С. 88–94.

220. *Бакалюк Я.Х.* Производство труб с металлическими покрытиями. — М.: Металлургия, 1975.

221. *Авдеев Н.В.* Металлирование. — М.: Машиностроение, 1978. — 184 с.

222. А.с.1183299 СССР. Способ нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных изделий / *П.А. Витязь, С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.К. Шелег.* — БИ. — 1985. — № 37.

223. А. с. 1223519 СССР, МКИ В 22 F 7/04. Способ нанесения покрытия из порошка на внутреннюю поверхность трубы / *П.А. Витязь, С.С. Клименков, В.В. Пятов.* — 1985 г.

224. А. с. 1380072 СССР, МКИ В 22 F 7/04. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы / *П.А. Витязь, С.С. Клименков, В.В. Пятов.* — 1987 г.

225. А. с. 1320977 СССР, МКИ В 22 F 3/20; В 30 В 15/02. Устройство для нанесения покрытий на внутренние поверхности труб / *П.А. Витязь, С.С. Клименков, В.В. Пятов.* — 1987 г.

226. А. с. 1093395 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для непрерывного формования порошков / *С.С. Клименков, В.В. Пятов* // БИ. — 1984. — № 19.

227. А. с. 1336354 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для непрерывного формования изделий из порошка / *С.С. Клименков, В.В. Пятов, К.С. Матвеев.* — 1987 г.

228. А. с. 1469689 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для непрерывного прессования изделий из порошка / *С.С. Клименков, В.В. Пятов, А.С. Шандриков.* — 1988 г.

229. А. с. 1412888 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для непрерывного формования длинномерных изделий из порошков / *С.С. Клименков, В.В. Пятов, К.С. Матвеев, А.Н. Красновский* // БИ. — 1988. — № 28.

230. А. с. 1739581 СССР, МКИ В 22 F 3/06. Устройство для центробежного формования изделий из порошка / *В.В. Пятов, К.С. Матвеев, В.В. Савицкий, А.Н. Красновский, А.М. Лапшин.* — 1992 г.

231. А. с. 1804026 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для прессования металлических порошков / *К.С. Матвеев, В.В. Пятов, А.Н. Красновский, В.В. Савицкий, А.М. Лапшин.* — 1992.

232. А. с. 1653900 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Устройство для получения многослойных трубчатых изделий из порошков экструзией / *С.С. Клименков, А.Н. Красновский, А.М. Лапшин, В.В. Пятов, К.С. Матвеев* // БИ. — 1991. — № 20.

233. А. с. 1110545 СССР, МКИ В 22 F 3/02; В 30 В 15/02. Устройство для непрерывного формования порошков / *С.С. Клименков, В.В. Пятов* // БИ. — 1984. — № 32.

234. *Плющ Г.В.* Удаление пластификатора из твердосплавных изделий, полученных методом мундштучного прессования // В кн.: Технология получения новых материалов. — Киев, 1972. — с. 104–111.

235. Федорченко И.М., Косторнов А.Г. Исследование свойств материалов, полученных экструзией и спеканием пластифицированных порошковых смесей // Порошковая металлургия. Сборник докладов VIII Всесоюзной конференции по прогрессивным методам производства деталей из порошков. — Мн.: Высш. школа, 1966. — С. 179–185.

236. Райченко А.И. Диффузионные расчеты для порошковых смесей. — Киев: Наук. думка, 1969.

237. Кислый П.С. Спекание заготовок, полученных методом мундштучного прессования порошков тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. — 1962. — № 5.

238. Харченко В.К., Струк Л.И. Некоторые данные о влиянии температуры на прочность и пластичность тугоплавких соединений // Порошковая металлургия. — 1962. — № 2. — С. 86–91.

239. Слепцов В.М., Щербина О.Д., Трунов Г.В. Удаление связки из образцов нитрида кремния. — Порошковая металлургия. — 1975. — № 7. — С. 99–101.

240. Усовершенствованные вакуумные печи для депарафинизации, предварительного спекания и агломерации / Ренни Эрик Т. // Британская промышленность и техника. — 1985, 60. — № 1. — С. 31–32.

241. Плющ Г.В., Прядко Г.А. Удаление пластификатора из твердосплавных заготовок // Порошковая металлургия. — 1970. — № 5. — с. 50–55.

242. Изготовление изделий сложной конфигурации из термопластичных шликеров / Ф.Д. Оболенцев, В.Г. Борщ // Порошковая металлургия. — 1985. — № 3. — с. 15–18.

243. Скороход В.В. Об электропроводности дисперсных смесей проводников с непроводниками // Инж.-физ. журнал — 1959. — № 8. — С. 51–58.

244. А. с. 1153455 СССР, МКИ В 22 F 3/10, 3/24. Способ обработки пластифицированных прессовок из металлических порошков / С.С. Клименков, В.В. Пятов, И.С. Алексеев, М.И. Жемчужный. — 1985 г.

245. А. с. 1664462 СССР, МКИ В 22 F 3/20, 3/02. Способ получения заготовок экструзией порошковых композиций и устройство для его осуществления / А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, В.В. Пятов, В.В. Савицкий, А.С. Шандриков, А.М. Лапшин // БИ. — 1991. — № 27.

246. А. с. 1694345 СССР, МКИ В 22 F 3/02, 3/20. Способ прессования фильтрующих элементов с переменной пористостью из ферромагнитных материалов / В.В. Пятов, К.С. Матвеев, А.Н. Красновский, В.В. Савицкий, А.С. Шандриков, А.В. Карпушко // БИ. — 1991. — № 44.

247. А. с. 1193891 СССР, МКИ В 22 F 3/16; Н 01 F 1/08; С 22 С 33/02. Способ спекания прессованных заготовок из пластифицированных ферромагнитных порошков / С.С. Клименков, В.В. Пятов. — 1985 г.

248. А. с. 1694351 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ формования порошковых материалов / С.С. Клименков, В.В. Пятов, А.С. Шандриков // БИ. — 1991. — № 44.

249. А. с. 1589493 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ экструдирования металлических порошков / С.С. Клименков, И.С. Алексеев, В.В. Пятов, А.С. Шандриков. — 1990 г.

250. А. с. 1435405 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ непрерывного изготовления изделий из порошков / С.С. Клименков, В.Г. Буткевич, В.В. Пятов // БИ. — 1988. — № 41.

251. А. с. 1650363 СССР, МКИ В 22 F 3/20. Способ непрерывного изготовления изделий из порошков / В.В. Пятов, А. с. Шандриков, А.В. Карпушко, А.Н. Красновский, К.С. Матвеев, В.В. Савицкий // БИ. — 1991. — № 19.

252. Заявка 59-185743, Япония. Способ производства проволоки из порошковых сплавов / Йокота Минору и др. — Б.И. — 22.10.84.

253. Чайников Н.А. Исследование коэффициента трения при прессовании металлических порошков // Порошковая металлургия. — 1979. — № 10. — С. 35–38.

254. Чайников Н.А. Расчетный коэффициент внешнего трения при прессовании металлических порошков. — Порошковая металлургия. — 1981. — № 5. — С. 11–15.

255. Меерсон Г.А., Рассказов И.И., Чулков В.П. Экспериментальное исследование процесса прессования порошкообразных материалов // Порошковая металлургии. — 1970. — № 1. — С. 21–29.

256. Кипарисов С.С., Либенсон Г.А. Порошковая металлургия. — М.: Металлургия, 1991. — 432 с.

257. Витязь П.А., Клименков С.С., Пятов В.В. Исследование трения металлических порошков, пластифицированных парафином / Витебск. технол. ин-т легк. пром. — Витебск, 1986. — 12 с. — Деп. в ВИНТИ № 4033. — 1987. — № 8. — С. 173.

258. Беркович И.И., Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Исследование трения и сопротивления сдвигу порошков железа и алюминия. — Порошковая металлургия. — 1971. — № 11.

259. Виноградов Г.А., Каташинский В.П. Теория листовой прокатки металлических порошков и гранул. — М.: Металлургия, 1979.

260. Устройства для определения коэффициента трения дисперсных материалов / Бесчастная Н.В. и др. // В кн.: Порошковая металлургия. — Пермь, 1979. — С. 63–68.

261. Алексеев И.С., Пятов В.В., Ковчур А.С. Исследование внешнего трения порошковых материалов // В кн.: Совершенствование технологических процессов, оборудования и организации производства в легкой про-

мышленности и машиностроении: ч.2. — Мн.: Университетское, 1994. — С. 176–179.

262. *Пятов В.В., Ковчур А.С.* Исследование внешнего трения пластифицированных порошков // В кн.: Научное обеспечение республиканской комплексной программы охраны окружающей среды на 1991 — 1995 годы. — Мн.: Изд-во АН РБ, 1995. — С. 94–96.

263. *Алексеев И.С., Пятов В.В., Ковчур А.С.* Методика определения триботехнических характеристик порошкового материала // В кн.: Совершенствование технологических процессов, оборудования и организации производства в легкой промышленности и машиностроении: ч.2. — Мн.: Университетское, 1994. — С. 91–93.

264. А. с. 1553884 СССР, МКИ G 01 N 11/04. Способ определения технологических характеристик порошковых материалов / *А.В. Степаненко, С.С. Клименков, В.В. Пятов, А.Л. Коваленко, А.Н. Красновский* // БИ. — 1990. — № 12.

265. *Коновалов Е.Г., Жданович Г.М.* Изменения коэффициентов бокового давления при прессовании порошков железа с наложением ультразвуковых колебаний // В кн.: Пластичность и обработка металлов давлением. — Мн.: Наука и техника, 1968. — С. 25–30.

266. *Роман О.В., Перельман В.Е.* Теоретический анализ зависимости давления на стенки матрицы от плотности прессуемого материала. — В кн.: Материалы IX Всесоюзной конференции по порошковой металлургии. — Рига: Знание, 1968. — С. 73–79.

267. *Верейкина А.А., Руденко В.Н., Самсонов Г.В.* Приспособление для определения предела прочности на сжатие образцов из тугоплавких соединений при высоких температурах. — Завод. лаб., 1960. — № 5. — С. 620–621.

268. *Ребиндер П.А.* Физико-химическая механика. — М.: Знание, 1958.

269. *Ничипоренко С.П.* Физико-химическая механика дисперсных структур в технологии строительной керамики. — Киев: Наук. думка, 1968. — 76 с.

270. *Ребиндер П.А., Семененко Н.А.* О методе погружения конуса для характеристики структурно-механических свойств пластично-вязких тел // Доклады АН СССР. — т. 64. — № 6. — 1949. — С. 835.

271. *Классен П.В., Гришаев И.Г.* Основы техники гранулирования. — М.: Химия, 1982. — 272 с.

272. *Корниенко П.А., Пугин В.С.* Структурно механические свойства пластификаторов // Порошковая металлургия. — 1968. — № 1. — С. 101–103.

273. А. с. 1274848 СССР, МКИ G 01 N 11/00. Устройство для определения структурно-пластической прочности пластифицированных порош-

ковых материалов / *П.А. Витязь, С.С. Клименков, В.В. Пятов, К.В. Шульков* // БИ. — 1986. — № 45.

274. *Корниенко П.А., Пугин В.С.* Исследование структурно-механических свойств пластификаторов // Порошковая металлургия. — 1967. — № 6. — С. 8–15.

275. *Ничипоренко С.П.* Основные вопросы теории процессов обработки и формования керамических масс. — Киев: АН УССР, 1960.

276. *Пятов В.В., Ковчур А.С.* Теоретический анализ процесса непрерывного формования порошков // В кн.: Вестник Витебского государственного технологического университета. — Витебск: ВГТУ, 1995. — С. 62–64.

277. *Пятов В.В., Ковчур А.С.* Анализ напряженно-деформированного состояния при формировании пластифицированного порошкового материала // В кн.: Сборник научных трудов ВГТУ. — Витебск: ВГТУ, 1995. — ч.2. — С. 31–34.

278. Исследование геометрии очага деформации при формировании материалов вращающимся шнеком / *А.В. Степаненко, С.С. Клименков, А.Н. Красновский, В.В. Пятов* // Витебск. технол. ин-т легк. пром. — Витебск, 1988. — 6 с. — Деп. в ЦНИИЭИ № 4960. — № 2. — С. 153.

279. *Пятов В.В., Ковчур А.С.* Динамика экструзии изотропного материала // В кн.: Сборник научных трудов ВГТУ. — Витебск: ВГТУ, 1995. — ч.2. — С. 37–39.

280. *Пятов В.В., Ковчур А.С.* Экструзия композиционных материалов, армированных дискретными волокнами // В кн.: Современные энергоресурсосберегающие и экологобезопасные технологии в машиностроении и легкой промышленности. — Витебск: ВГТУ, 1998. — С. 60–65.

281. Оптимизация геометрических параметров канала с подвижными и неподвижными стенками при формировании порошковых материалов / *В.В. Пятов, И.С. Алексеев, О.Н. Ахтанин* // В кн.: Tendencje rozwojowe w technologi maszyn: Sekcja II. — Zielona Gora, 1990. — С. 51–56.

282. Распределение напряжений в канале шнека при формировании порошковых материалов / *В.В. Пятов, А.Н. Красновский, А.Л. Коваленко* // В кн.: Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении. — Мн.: Университетское, 1990. — С. 128.

283. Теоретический анализ процесса шнекового прессования порошковых материалов / *А.В. Степаненко, С.С. Клименков, В.В. Пятов, А.Н. Красновский* // Витебск. технол. ин-т легк. пром. — Витебск, 1989. — 11 с. — Деп. в ЦНИИЭИ № 5302. — № 10. — С. 158.

284. Интегралы и ряды. Специальные функции / *А.П. Прудников и др.* — М.: Наука, 1983. — 752 с.

285. *Витязь П.А., Клименков С.С., Пятов В.В.* Расчет температурного поля в порошковом слое при формировании изделий на шнековом прессе /

Витебск. технол. ин-т легк. пром. — Витебск, 1985. — 8 с. — Деп. в ВИНТИ № 3245. — 1986. — № 4. — С. 164.

286. А. с. 1176695 СССР, МКИ В 22 F 3/02. Устройство для исследования внешнего и межчастичного трения порошка / С.С. Клименков, В.В. Пятов, К.В. Шульков. — 1985 г.

287. Разработать методику определения триботехнических свойств нестандартных порошков цветных металлов, полученных из производственных отходов: Отчет о НИР № 265; № ГР 19991312 / С.Г. Ковчур, В.В. Пятов, А.С. Ковчур, О.Н. Ахтанин. — Витебск: ВГТУ, 1999. — 48 с.

288. Пятов В.В. Прибор для комплексного исследования свойств порошковых материалов // В кн.: Современные энергоресурсосберегающие и экологобезопасные технологии в машиностроении и легкой промышленности. — Витебск: ВГТУ, 1998. — С. 51–54.

289. Klemm V., Sobek D. Crundlag Herstell und Eingenschaft pulvermet. Werkst. 8 Int. pulvermet. Tag., Dresden, 1985.

290. Gerritsen A.H. // Powder Tech.— №1. — 1985. — №1. — p. 61–70.

291. Патент РБ № , МКИ В 22 F 3/00. Способ определения коэффициента бокового давления / В.В. Пятов, О.Н. Ахтанин, С.С. Клименков, А.Н. Голубев. — 1999.