

621.76  
К49

**БЕЛОРУССКОЕ РЕСПУБЛИКАНСКОЕ  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ  
ПОРШКОВОЙ МЕТАЛЛУРГИИ**

---

Для служебного пользования  
Экз. №

На правах рукописи

**КЛИМЕНКОВ Степан Степанович**

**УДК 621.762.4**

---

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ  
РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИЙ  
МЕТОДОМ ШНЕКОВОГО ПРЕССОВАНИЯ, СОЗДАНИЕ  
ОБОРУДОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ В НАРОДНОЕ ХОЗЯЙСТВО**

**05.16.06—Порошковая металлургия и композиционные  
материалы**

**А в т о р е ф е р а т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**доктора технических наук**

**Минск—1991**

17

Работа выполнена в Белорусском республиканском институте легкой промышленности.

**Официальные оппоненты:**

Член-корреспондент АН БССР, доктор технических наук, профессор **Клубович В. В.**

Доктор технических наук, профессор **Жданович Г. М.**

Доктор технических наук, профессор **Миронов В. А.**

Ведущая организация — Физико-технический институт АН БССР (г. Минск).

Защита диссертации состоится 14 октября 1991 г. в 14 часов на заседании специализированного совета Д 162.01.01 по присуждению ученой степени доктора наук при Белорусском республиканском научно-производственном объединении порошковой металлургии по адресу: 220600, г. Минск, ул. Платонова, 41.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке объединения.

Автореферат разослан « \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 1991 г.

**Ученый секретарь специализированного совета, доктор технических наук, профессор**

**В. К. ШЕЛЕГ**

(Роспись)

Белорусское республиканское научно-производственное объединение порошковой металлургии, 1991.

ВИТУС  
БЕЛОРУССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению важной народнохозяйственной проблемы — получению длинномерных изделий широкого целевого назначения методом шнекового прессования реологических порошковых композиций на основе разработки и внедрения новых научно обоснованных технологических процессов, оборудования и инструмента.

Комплекс проведенных теоретических и экспериментальных исследований включает разработку модели уплотнения порошковых реологических композиций и выявление закономерностей процессов шнекового прессования, позволивших определить пути управления технологическими параметрами и прогнозировать конечные свойства изделий.

На основе предложенных способов и устройств разработаны эффективные технологии и создано соответствующее промышленное оборудование, обеспечивающие получение изделий с заданными свойствами, повышение производительности в условиях безопасности труда, экономию материальных и трудовых ресурсов. Открывается перспектива для реализации автоматизированного производства изделий из порошковых композиций.

Суммарный годовой экономический эффект от внедрения результатов работы с учетом долевого участия составил 630,3 тыс. руб., а ожидаемый эффект от реализации предложенных разработок составляет 732 тыс. руб. Новизна технических решений по теме диссертации защищена 165 авторскими свидетельствами и 12 положительными решениями на изобретения.

**Актуальность проблемы.** В «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на период до 2000 года» особое внимание уделяется проблеме освоения композиционных материалов, разработки прогрессивных технологий, создания высокоэффективного оборудования и повышения качества изделий. Технологическим условиям получения композиционных материалов наиболее полно отвечают

методы порошковой металлургии. Ориентировочно около половины порошковых композиционных материалов в готовом виде или на промежуточной технологической стадии представляют собой реологические порошковые композиции: металлополимеры, керметы, ферриты, твердые, тяжелые, тугоплавкие сплавы и т. д. Внедрение композиционных материалов значительно ускоряется, если изделия из них поступают в виде стандартного сортамента: труб, стержней, полос, уголков и др. Формообразование таких изделий целесообразно методами непрерывного прессования.

На основе обобщения и критического анализа известных способов прессования можно заключить, что непрерывное прессование по сравнению с дискретным отличается более высокой однородностью и стабильностью свойств изделий, их неограниченной длиной, повышенной производительностью, экономичностью. Однако, технологические возможности известных традиционных способов непрерывного прессования (прокатка, конформметод, последовательное прессование) в большинстве случаев ограничиваются получением изделий простой формы и относительно небольших размеров поперечного сечения. Широкое внедрение непрерывных способов прессования сдерживается отсутствием специального оборудования и соответствующей технологической оснастки.

Новые технологии непрерывного прессования на основе шнекового экструдирования призваны обеспечить формообразование изделий широкого диапазона размеров от капиллярных до крупногабаритных; изделий с направленной пористостью по сечению; изделий сложной наружной и внутренней формы; слоистых изделий с чередованием слоев в поперечном, продольном направлениях; изделий, армированных дискретными волокнами, длинномерными порошковыми или проволочными жилами, сеткой и т. д.; изделий с наружным или внутренним порошковым покрытием.

Комплексное исследование закономерностей формообразования реологических порошковых композиций методом шнекового прессования, направленное на разработку научно обоснованных технологий и создание соответствующего промышленного оборудования, инструмента, технологической оснастки для производства изделий большого ассортимента, широкого целевого назначения, является актуальной научной и практической задачей. Решение поставленных задач послужит мощным импульсом для разработки новых композиционных материалов, развития методов непрерывного прессования, в частности, и порошковой металлургии в целом.

Работа выполнена на кафедре «Технология конструкционных материалов» Витебского технологического института легкой промышленности в соответствии с заданием программы «Яблоня-РВО» (постановление Совета Министров и ЦК КПСС); заданием Межвузовской целевой комплексной научно-технической программы «Порошковая металлургия» на 1985—1990 гг. (приказ Минвуза СССР № 600 от 18.08.86 г.); заданием Республиканской целевой научно-технической программы 71.03 рц «Осуществить широкое внедрение в производство технологических процессов поверхностного упрочнения деталей машин и оборудования, обеспечивающих повышение их эксплуатационных свойств, надежности, долговечности, экономии металлов»; заданием Республиканской целевой научно-технической программы 71.04рц «Создать и освоить высокопроизводительные технологические процессы и оборудование для производства новых материалов и изделий из металлических порошков, обеспечивающих повышение их прочности на 15... 20% и износостойкости в 1,5... 2 раза.

**Целью работы** является решение важной народнохозяйственной задачи—разработка теоретических и практических основ шнекового прессования и на их базе новых технологических процессов формообразования изделий из реологических порошковых композиций, внедрение и организация выпуска соответствующего промышленного оборудования.

В соответствии с поставленной целью в работе решены следующие задачи:

1. Выявлены основные закономерности уплотнения порошков в каналах шнеков и формообразующем инструменте.

2. Разработана теория расчета главных напряжений, плотности, температуры порошка по длине каналов шнеков и на выходе из них. Исследовано напряженное состояние порошка в формообразующем инструменте. Получены математические выражения для вычисления энергосиловых параметров процессов уплотнения порошков в каналах шнеков и формообразующем инструменте. Оптимизированы геометрические параметры винтовых каналов и элементов формообразующего инструмента.

3. В условиях, приближенных к шнековому прессованию, исследованы триботехнические, реологические, технологические свойства пластифицированных порошков и установлены области наиболее эффективного применения технологий шнекового прессования.

4. На базе предложенных новых способов разработаны

оснвы промышленных технологий шнекового прессования изделий широкого целевого назначения.

5. Создано новое технологическое лабораторное и промышленное оборудование, заложены исходные предпосылки для его машинного проектирования и организации серийного изготовления. Определены перспективы развития шнекового прессования и предложены оригинальные решения средств для их реализации.

**Научная новизна.** Разработана математическая модель уплотнения порошков в каналах шнеков. Предложены критерии, в соответствии с которыми осуществлена классификация транспортирующих каналов шнековых устройств. Получены системы уравнений, позволяющие выполнить численный расчет напряжений и плотности порошка по длине каналов и на их выходе. Выявлены важнейшие закономерности уплотнения порошков в каналах шнеков и формообразующем инструменте, что в конечном итоге позволило разработать технические основы системы управления процессом шнекового прессования.

Получены формулы для расчета момента, мощности, осевого усилия, коэффициента полезного действия уплотнения порошков в конических, цилиндрических, плоских каналах шнековых устройств. На основе минимизации мощности уплотнения порошков в каналах шнеков и формообразующем инструменте предложен метод аналитического расчета оптимальных геометрических параметров каналов шнеков и элементов формообразующего инструмента. Аналитические зависимости легли в основу разработанной системы автоматизированного расчета на ЭВМ энергосиловых параметров шнекового оборудования. Выполнен анализ численных расчетов, экспериментальных данных и установлено влияние силовых, скоростных, геометрических параметров на величину общих энергозатрат.

Получены математические соотношения между температурой порошка, его физическими, реологическими характеристиками и кинематическими параметрами движения конструктивных элементов. Созданы исходные теоретические предпосылки для реализации горячего шнекового прессования.

Предложен и апробирован комплекс методик, приборов, устройств для исследования процессов шнекового прессования, а также для определения физических, реологических характеристик пластифицированных порошков. Исследовано распределение нормальных напряжений по объему очага формообразования и выявлены важнейшие закономерности периодического изменения напряжений. Экспериментально исследованы зависимости энергосиловых параметров прессования пластифицированных порошков от геометрических параметров

формообразующего инструмента и реологических характеристик порошков. Определены критерии технологичности порошковых композиций и в зависимости от степени обжата материала в формообразующем инструменте установлены предельные значения вязкости.

**Практическая ценность и реализация результатов работы.** На базе разработанных методик, приборов и устройств для исследования процессов шнекового прессования создана серия, не имеющих аналогов, экспериментальных шнековых установок, обеспечивающих прессование изделий в широком интервале давлений, температур, скоростей.

Новые способы и устройства, защищенные авторскими свидетельствами на изобретения; разработанные математические модели уплотнения порошков в каналах шнеков и формообразующем инструменте; комплекс проведенных теоретических и экспериментальных исследований позволяют осуществить выбор наиболее рациональных схем прессования и явились основой для разработки систем управления технологическими параметрами, а также послужили исходной базой для проектирования и создания специализированного промышленного шнекового оборудования, инструмента, технологической оснастки.

Разработаны основы промышленных технологий непрерывного пластифицирования порошков и шнекового прессования из них изделий широкого целевого назначения. В частности, разработаны технологии непрерывного прессования проницаемых элементов широкого диапазона размеров; композиционных изделий, армированных длинномерными проволочными или порошковыми жилами, дискретными волокнами, объемным проволочным каркасом; слоистых изделий с чередованием слоев в продольном и поперечном направлениях; изделий с наружным и внутренним порошковым покрытием; порошковых жгутов и т. д. Для реализации разработанных технологий создана и внедрена в народное хозяйство серия опытно-промышленных установок и технологических линий.

Практическая направленность проведенных исследований подтверждается внедрением: технологий и оборудования для формования композиционных изделий из порошковых смесей сложного состава на предприятии п/я А-1928; технологий формования длинномерных пористых порошковых материалов и установки в Белорусском республиканском научно-производственном объединении порошковой металлургии; технологии прессования и спекания стержней и трубок из вольфрамодержащих сплавов в научно-производственном объединении «Прибор»; опытно-промышленных партий длинномерных эле-

ментов из твердых и тяжелых сплавов на предприятии п/я Х-5998; проницаемых элементов переменной по сечению пористости на предприятии п/я А-7527.

В стадии внедрения находятся: технология непрерывного формования ферритовых изделий на предприятии п/я Р-6082; технология непрерывного формования проницаемых элементов и опытно-промышленная линия для ее реализации на Краснопахорском экспериментальном заводе металлокерамических изделий; технологическая линия формования изделий из промышленных отходов на Кричевском заводе резиновых изделий; технологическая линия формования изделий из твердых и тяжелых сплавов в Чирчикском филиале Всесоюзного научно-исследовательского института тугоплавких металлов и твердых сплавов; технологическая линия формования порошковой жгута из отходов шлифовального производства в инженерном центре АН Киргизской ССР; модульный блок линии для прессования слоистых изделий на предприятии п/я А-1928.

Материалы выполненной работы послужили исходной посылкой для проектирования участка порошковой металлургии на строящемся при Витебском технологическом институте экспериментальном заводе. В соответствии с проектом завода на участке порошковой металлургии предусматривается доводка в промышленных условиях разработанных технологий, серийное изготовление соответствующего оборудования и передача заказчикам в комплексе технологий и оборудования.

**Апробация работы.** Материалы диссертации были доложены и обсуждены на: Всесоюзном научно-техническом семинаре «Актуальные вопросы горячего прессования» (г. Новочеркасск, 1984); координационном совещании-семинаре исполнителей межвузовской целевой комплексной научно-технической программы «Порошковая металлургия» (г. Новочеркасск, 1985); Всесоюзной VI научно-технической конференции «Горячее прессование в порошковой металлургии» (г. Новочеркасск, 1985); Уральской региональной конференции по порошковой металлургии и композиционным материалам (г. Пермь, 1985); Всесоюзном совещании «Теория и практика газотермического нанесения покрытий» (г. Дмитриев, 1985); республиканской научно-технической конференции «Прогрессивные процессы обработки материалов давлением» (г. Минск, 1985); республиканской научно-технической конференции «Технологические процессы и оборудование для упрочнения деталей машин» (г. Гомель, 1985); республиканской школе-семинаре по применению металлоорганических соединений для получения покрытий (г. Минск, 1985); республиканской научно-практи-



ческой конференции «Опыт научно-исследовательских организаций, предприятий истроек по антикоррозионной защите материалов» (г. Гродно, 1985); научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава Всесоюзного заочного института легкой промышленности (г. Москва, 1986); совещании исполнителей программы «Яблоня-РВО» (г. Москва, 1986); Ученом совете научно-исследовательского института прикладной химии (г. Загорск, 1987, 1991); кафедрах БПИ: «Машины и технология обработки металлов давлением» (г. Минск, 1988, 1990), «Порошковая металлургия и композиционные материалы» (1988); секции Ученого совета Белорусского республиканского научно-производственного объединения порошковой металлургии (г. Минск, 1990).

**Публикации.** Сформулированные в диссертации научные результаты изложены в 43 статьях и 165 описаниях авторских свидетельств на изобретения.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов по разделам, общих выводов и приложения. Работа содержит 200 страниц машинописного текста, список литературы из 303 наименований на 30 стр., 130 иллюстраций на 115 стр., приложение на 91 стр., включающее расчетные таблицы на 40 стр., экспериментальные таблицы на 17 стр., технические характеристики изделий и оборудования на 6 стр., акты внедрения на 15 стр.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** проведен критический анализ широкоизвестных и новых способов непрерывного прессования. Показана необходимость их дальнейшего развития. Научно обоснованы актуальность и перспективность разработки новых технологий на базе шнекового прессования. Сформулированы цель работы, первоочередные задачи и основные положения, выносимые на защиту.

**Первый раздел** посвящен теоретическому и экспериментальному исследованию закономерностей уплотнения вязких и вязкопластичных порошковых композиций в каналах шнеков. Разработана система классификации каналов шнековых устройств, дано математическое описание поверхностей, ограничивающих каналы, и получены математические соотношения между геометрическими параметрами каналов и скоростью движения порошковых материалов. Для теоретического исследования процессов уплотнения порошковых материалов в каналах шнеков необходимо иметь замкнутую систему, включающую уравнения движения, уравнение нераз-

ривности и соотношения, определяющие модель сплошной среды.

В цилиндрической системе координат уравнения движения имеют вид

$$\rho \frac{dU_1}{dt_1} = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_z}{r},$$

$$\rho \frac{dU_2}{dt_1} = \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r},$$

$$\rho \frac{dU_3}{dt_1} = \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r},$$

где  $\rho$  — плотность среды;  $U_1, U_2, U_3$  — скорости движения порошка в направлении координат соответственно  $r, \theta, z$ ;  $t_1$  — время.

Для установившегося процесса движения уравнение неразрывности имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{\partial \rho U_1 r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \rho U_2}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho U_3}{\partial z} = 0.$$

Модель вязкой порошковой композиции определим реологическими соотношениями:

$$\sigma_{ij} = 2\eta e_{ij} + \left( \gamma - \frac{2}{3}\eta \right) \sum_{i=1}^3 e_{ij}$$

где  $e$  — скорости деформаций;  $\eta, \gamma$  — коэффициенты соответственно сдвиговой и объемной вязкости.

$$\eta = \left( \rho / \rho_k \right)^2 \eta_k, \quad \gamma = 4\eta \rho / 3 (\rho_k - \rho).$$

Обозначим

$$C = 4\eta / 3 + \gamma, \quad D = \gamma - 2\eta / 3.$$

Модель вязкопластичной порошковой композиции определим следующими соотношениями:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \left( \frac{A}{\sqrt{\sum e_{ij}^2}} + 2\eta \right) e_{ij}, \quad \gamma_\sigma = B + 3\gamma \gamma_e,$$

где  $\gamma_\sigma, \gamma_e$  — соответственно первые инварианты тензоров напряжений и скоростей деформации;  $A$  и  $B$  — коэффициенты

$$A = A(\rho, \gamma_e, \gamma_s), \quad B = B(\rho, \gamma_e, e_{ij}),$$

после вычисления которых получим

$$\sigma_{ij} = \left(2\eta + \frac{\beta_1}{\lambda_2}\right) e_{ij} + \left(\lambda - \frac{2}{3}\eta + \frac{\beta_1}{\lambda_2} \frac{\alpha_1}{1-3\alpha_1}\right) \gamma_e \delta_{ij},$$

$$\beta_1 = \beta_K \cdot (\rho/\rho_K)^2, \quad \beta_K = \text{const},$$

$$\lambda_2 = \sqrt{\sum e_{ij}^2 + \alpha_1 \gamma_e^2 / (1-3\alpha_1)}, \quad \alpha_1 = \rho / 3\rho_K.$$

Полагаем, что на подвижной  $\Sigma_2$  и неподвижной  $\Sigma_1$  поверхностях (рис. 1) порошок подвергается действию контактных сил трения, величина которых пропорциональна нормальному давлению, и направлены контактные силы против движения.

Тогда

$$\begin{aligned} \left( T_\sigma \cdot \frac{\bar{u}}{|\bar{u}|} \right) \bar{n} \Big|_{\Sigma_1} &= \kappa_1 (T_\sigma \cdot \bar{n}) \bar{n} \Big|_{\Sigma_1}, \\ \left( T_\sigma \cdot \bar{t}_2 \right) \bar{n} \Big|_{\Sigma_2} &= \kappa_2 (T_\sigma \cdot \bar{n}) \bar{n} \Big|_{\Sigma_2}, \\ \left( T_\sigma \cdot \bar{e}_2 \right) \bar{n} \Big|_{\Sigma_2} &= -\kappa (T_\sigma \cdot \bar{n}) \bar{n} \Big|_{\Sigma_2}, \end{aligned}$$

где  $T_\sigma$  и  $\bar{u}$  — выражения тензора напряжений и вектора скорости в физических компонентах;  $\bar{n}$  — внешняя нормаль к соответствующей поверхности;  $\bar{t}_2$  — единичный вектор, совпадающий по направлению с вектором скорости порошка относительно подвижной поверхности  $\Sigma_2$ ;  $\bar{e}_2$  — единичный вектор, соответствующий координатам (0, 1, 0).

Полагаем, что главные напряжения и плотность по объему канала зависят только от координаты  $\theta$ , т. е. под  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  и  $\rho$  будем понимать средние значения соответствующих параметров по сечению канала плоскостью  $\theta = \text{const}$ .

Применительно к вязким порошковым композициям на основе приведенных выше уравнений с учетом допущений получена

система уравнений для расчета главных напряжений и плотности по длине канала шнека и на его выходе.

$$\sigma_1 = -D \frac{u}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{d\theta} - (C - D) \sigma_1 u$$

$$\sigma_2 = -C \frac{u}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{d\theta} + (C - D) \left( \sigma_1 + \frac{a_1 - a_2}{b} \right) u$$

$$\sigma_3 = -D \frac{u}{\rho} \cdot \frac{d\rho}{d\theta} - (C - D) \frac{a_1 - a_2}{b} u$$

$$\frac{d\sigma_2}{d\theta} = \frac{\kappa b [r_2^2(x_1) + r_2(x_1)r_2(x_2) + r_2^2(x_2)]}{3m \sqrt{1 + \beta^2}} \times$$

$$\times [(1 + 2\beta^2 + 2\kappa_2\beta + 4\kappa_2^2\beta^2)\sigma_1 - \beta^2\sigma_3] + (br_1/m) \times$$

$$\times [\alpha\sigma_2 - (\alpha + \kappa_1 r_1 + 2\kappa_1^2\alpha)\sigma_1] + [a_1[r_1^2(x_1) - r_1]/2m -$$

$$- (a_2[r_2^2(x_2) - r_1]/2m)](\sigma_2 - \sigma_3 - 2\kappa_1^2\sigma_3) -$$

$$- (\kappa_1/3m)[r_2^3(x_1) + r_2^3(x_2) - 2r_1^3]\sigma_3$$

где

$$m = \int_{x_1}^{x_2} \int_{r_1}^{r_2} r dr dx, \quad \sigma_1 = \frac{1}{m} \int_{x_1}^{x_2} \int_{r_1}^{r_2} r \frac{d + \beta a}{r_2 - r_1} dr dx$$

Граничные условия имеют вид

$$\theta = \theta_0 = 0, u = u_0, \rho = \rho_0, \sigma_2 = \sigma^{(0)}, \theta = \theta_1, \sigma_2 = \sigma^{(1)}$$

где  $\theta_0, \theta_1$  — угловые координаты, соответствующие начальной и конечной точкам отсчета винтового канала;  $u_0$  и  $u_1$  — начальная и текущая угловые скорости порошка;  $\beta_0$  и  $\beta_1$  — напряжения, соответствующие угловым координатам  $\theta_0, \theta_1$ ;  $\rho_0$  — начальная плотность;  $a_1, a_2, \beta$  — геометрические параметры канала.

Аналогичные системы уравнений получены для всех классифицированных каналов: конических, цилиндрических, плоских; наружного и внутреннего исполнения; постоянного и переменного по длине профиля.

Применительно к прессованию вязкопластичных порошковых композиций расчет плотности по длине винтовых цилиндрических каналов прямоугольного профиля производится на основе уравнения

$$\frac{d}{d\theta} \left\{ \left[ \frac{4}{3} \eta_k + \frac{\beta_k}{\lambda_2} (1 - 2\alpha_1) \right] u_0 s_0 \frac{s'}{1 - \beta} \right\} =$$

$$= (2\eta_k + \frac{\beta_k}{\lambda_2}) \times \frac{W_2 u_2}{W_1^2} s(s - s_0) - \frac{W_3}{v_0 W_0 W_1} |\bar{r}|,$$

где  $W_0 = \frac{1}{2} h (r_1 + r_2)$ ,  $W_1 = \frac{2r_1 + r_2}{3(r_1 + r_2)} h$ ,  $s = \frac{\rho}{\rho_k}$

$$W_2 = 2 \left[ \frac{r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2}{3(r_1 + r_2)} \right]^2,$$

$$W_3 = \beta r_1^2 h + \frac{1}{6} h^2 (r_2^2 + 2r_2 r_1 + 3r_1^2),$$

$$\lambda_2^2 = \frac{1 - 2\alpha_1}{1 - 3\alpha_1} \left( \frac{u_0 s_0 s'}{s^2} \right) + \frac{W_2}{W_1} u_0^2 \left( \frac{s - s_0}{s} \right)^2,$$

$$\bar{r} = \frac{1}{3} \kappa_1 \left[ 2 - (3\beta - 1) \eta_k + \frac{\beta_k}{\lambda_2} s \right] u_0 s_0 \frac{s'}{1 - \beta}$$

Для полученных систем уравнений разработаны алгоритмы, составлены программы и выполнен на ЭВМ числовой расчет напряжений и плотности для различных условий прессования. Расчет осуществлялся в разработанной системе безразмерных параметров, которая позволила провести сопоставительный анализ процессов уплотнения реологических порошковых композиций в различных каналах шнековых устройств.

На основе численных расчетов, подтвержденных экспериментально, установлено, что напряжения и плотность по длине каналов фиксированного профиля не зависят от их геометрической формы и размеров. Конструктивное исполнение каналов, т.е. их расположение относительно активных поверхностей снаружи, внутри или между ними также не оказывает влияния на распределение плотности по длине каналов. Уплотняемость порошков в каналах шнеков зависит от начальной скорости подачи порошка в канал шнека и давления подпора на выходе канала, определяемого сопротивлением истечению порошка через формообразующий инструмент.

Графические зависимости изменения плотности вдоль каналов фиксированного профиля имеют ступенчатообразный вид (рис. 2). Можно выделить следующие отчетливо различимые зоны уплотнения: зоны постоянной плотности I, V (кривые 3, 5), зоны замедленного уплотнения II, IV и зона ускоренного уплотнения III. Зоны постоянной плотности (горизонтальные участки) соответствуют начальной (I) и конечной 100% относительной плотности (V). Основную часть канала шнека составляет зона транспортирования (I), длина которой определяется степенью гомогенизации порошковой композиции и составляет (3... 4) D шнека. Второй горизонтальный участок вообще может отсутствовать, если конечная плотность меньше 100% (кривые 1, 2). Поэтому зоны замедленного и ускоренного уплотнения не занимают по длине канала строго постоянного положения. По отношению к выходному торцу шнека они могут приближаться или удаляться.

Уплотняемость порошков в каналах переменного по длине профиля, кроме начальной скорости подачи порошка в канал и давления подпора, дополнительно зависит от степени обжатия. Конструктивное исполнение каналов и их размеры также оказывают влияние на уплотняемость. В частности, уплотняемость порошков в наружных сужающихся каналах выше, чем в аналогичных внутренних. Увеличение

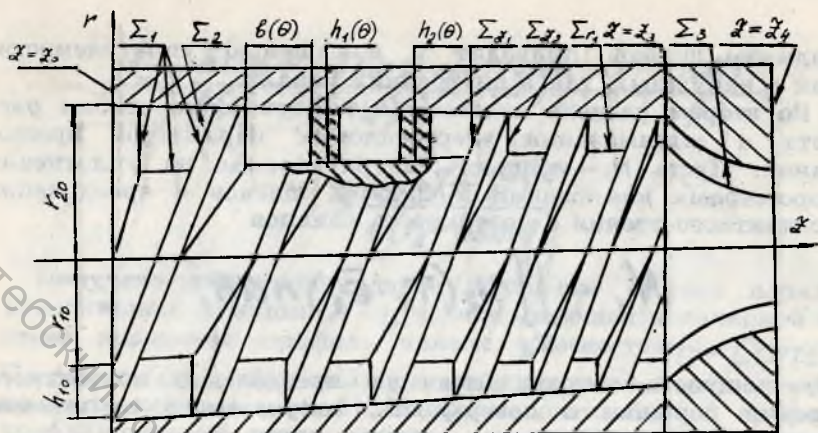


Рис. 1. Схема шнекового прессового узла.

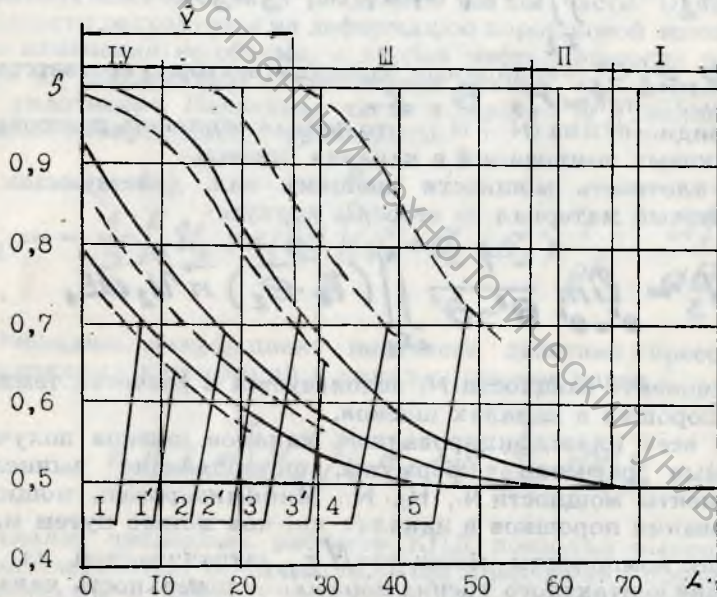


Рис. 2. Изменение относительной плотности по длине канала шнека. (—) — теоретические, (---) — экспериментальные кривые. Параметры прессования:  $S_0=0,5$ ;  $\omega_0=1,1$  сек<sup>-1</sup>. Параметры шнека:  $r=0,03$  м;  $h=b=0,01$  м. Состав: порошок меди + 3% (мас) парафина. Давление подпора: 1,1'—98 МПа; 2,2'—128 МПа; 3,3'—260 МПа; 4—310 МПа; 5—450 МПа.

радиуса шнеков приводит к повышению уплотняемости, как в наружных, так и внутренних каналах.

Во втором разделе излагаются теоретические основы расчета и минимизации энергосиловых параметров прессования. Пусть  $N_1$  — мощность, затрачиваемая на уплотнение порошковых композиций в каналах шнеков и преодоление контактного трения о поверхность каналов

$$N_1 = \iint_{\Sigma_2} u_2 (\tau_\sigma \cdot \bar{e}_2) \bar{n} ds_1 ;$$

$N_2$  — мощность, затрачиваемая на преодоление контактного трения порошка о поверхность, сопрягаемого со шнеком конструктивного элемента

$$N_2 = - \iint_{\Sigma_2} (\tau_\sigma (u_1 \bar{e}_1 + u_3 \bar{e}_3)) \bar{n} ds_1 ,$$

где  $e_1, e_2, e_3$  — единичные базисные векторы, соответствующие координатам  $r, \theta, z$ .

Очевидно, сумма  $(N_1 + N_2)$  — это полная мощность прессования порошковых композиций в каналах шнеков.

$N_3$  — плотность мощности внешних сил, действующих на порошковый материал со стороны корпуса

$$N_3 = \lim_{\theta' \rightarrow \theta''} \frac{1}{\theta' - \theta''} \iint_{\Delta \Sigma_2} (\tau_\sigma \cdot \bar{e}_2) \bar{n} u_2 ds_1 .$$

Компонента мощности  $N_3$  используется в расчетах температуры порошка в каналах шнеков.

Для всех классифицированных каналов шнеков получены конечные расчетные формулы, позволяющие вычислить компоненты мощности  $N_1, N_2, N_3$ . Минимизировать мощность прессования порошков в каналах шнеков можно путем минимизации компоненты мощности  $N_{\Sigma_1}$ , затрачиваемой на преодоление контактного трения порошка о поверхность каналов

$$N_{\Sigma_1} = - \iint_{\Sigma_1} (\tau_\sigma \cdot \bar{e}_2) \bar{n} u_2 ds_1 .$$

Опуская математические преобразования по минимизации компоненты  $N_{\Sigma_1}$ , в конечном виде имеем



$$A'' = 2 \frac{A' \cos \varphi - A \sin \varphi}{A(r_2 - A \sin \varphi)} (A^2 + (A')^2) + A + \frac{2(A')^2}{A} + \lambda \frac{(A^2 + (A')^2)^{3/2}}{A(r_2 - A \sin \varphi)}$$

Получено дифференциальное уравнение второго порядка относительно функции  $A(\varphi)$ , описывающей в полярной системе координат профиль канала плоскостью  $\theta = \text{const}$ .

По результатам численных расчетов построены оптимальные профили каналов (рис. 3). По форме оптимальный профиль приближается к части эллипса, симметричной относительно малой оси.

Условно мощность прессования порошковых композиций в каналах шнеков можно разделить на две части. Одна часть мощности расходуется на деформацию порошковой композиции без изменения ее объема, а вторая часть мощности расходуется на деформацию с изменением объема, т. е. используется на уплотнение. Последняя часть мощности  $N_{II}$  является полезной и определяется уравнением

$$N_{II} = - \frac{1}{3} \int_{\theta_0}^{\theta_1} \mu_0 m(\theta) \int (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \frac{1}{r^2} \cdot \frac{dP}{d\theta} d\theta$$

Очевидно, коэффициент полезного действия прессования порошковых композиций в каналах шнеков равен

$$K.П.Д. = \left[ N_{II} / (N_1 + N_2) \right] \cdot 100\%$$

Анализ численных расчетов КПД позволил выявить ряд закономерностей. В частности, КПД прессования порошковых материалов в каналах фиксированного профиля изменяется в широких пределах (4... 75%). При одинаковых условиях прессования КПД уплотнения порошковых материалов в наружных винтовых каналах выше, чем в аналогичных внутренних. Увеличение давления подпора на выходе каналов фиксированного профиля приводит к повышению КПД, а увеличение начальной скорости порошка

на входе, наоборот, к понижению КПД. На величину КПД существенное влияние оказывает ширина винтовых каналов, с увеличением которой КПД заметно возрастает. Отсюда следует практическая рекомендация о целесообразности минимизации общих энергозатрат путем максимального увеличения ширины каналов, например, за счет уменьшения ширины перемычки между соседними витками.

Мощность, расходуемая на деформацию частиц и преодоление контактного трения, преобразуется в тепловую. Для условий адиабатического процесса, как минимально энергоемкого, распределение температуры порошка по длине каналов шнеков вычисляется в соответствии с полученным уравнением

$$\begin{aligned} & \alpha m_2 \frac{d^2 T}{d\theta^2} + \frac{d\alpha}{d\rho} \cdot \frac{d\rho}{d\theta} m_2 \frac{dT}{d\theta} + \alpha \frac{dm_2}{d\theta} \cdot \frac{dT}{d\theta} - \\ & - c_1 \rho_0 u_0 m(\theta_0) \frac{dT}{d\theta} + \rho_0 u_0 m(\theta_0) \times \\ & + \left[ \frac{1}{\rho} \frac{d\sigma_2}{d\theta} - \frac{\sigma_2}{\rho^2} \cdot \frac{d\rho}{d\theta} \right] + N_3 = 0, \end{aligned}$$

а средняя температура порошка по сечению каналов на их выходе определяется по формуле

$$T_{cp} = T_0 + \frac{\sigma^{(1)}}{c_1 \rho(\theta_1)} - \frac{\sigma^{(0)}}{c_1 \rho_0} + \frac{N_1 + N_2}{c_1 \rho_0 u_0 m(\theta_0)},$$

где  $\alpha = \alpha(\rho)$  — коэффициент теплопроводности;  $c_1$  — теплоемкость;

$$m_2(\theta) = \iint_{\Sigma\theta} \frac{1}{r} dS_1,$$

Анализ численных расчетов показал, что в условиях отсутствия теплообмена с окружающей средой при одинаковых условиях прессования температура порошка на выходе внутренних винтовых каналов выше, чем на выходе аналогич-

ных наружных. Увеличение давления подпора на выходе наружных и внутренних каналов однозначно приводит к повышению температуры. Более интенсивно нагрев порошка происходит в каналах переменного по длине профиля по сравнению с фиксированными каналами. Увеличение ширины каналов приводит к понижению температуры, а увеличение длины шнека или его радиуса, наоборот, вызывает повышение температуры.

Мощность прессования порошковых композиций в формообразующем инструменте, у которого отсутствует цилиндрический калибрующий пояс (рис. 1), вычисляется по формуле

$$N_0 = \tau \int_{\Sigma_{24}} |\bar{u}| ds_1 + \int_V (2\eta_k \sum e_{ij}^2 + \beta_k \sqrt{\sum e_{ij}^2}) dv.$$

В результате минимизации мощности формообразования получено дифференциальное уравнение, позволяющее рассчитать оптимальный профиль продольного сечения формообразующего инструмента.

$$\frac{d}{d\psi} \left\{ 2\bar{\eta}_k y y' + \frac{\bar{\beta}_k y'}{\sqrt{4+(y')^2}} \right\} = \frac{1}{r^3} - \frac{1}{r\varphi^2} + \bar{\eta}_k [4+(y')^2]$$

Применительно к прессованию полых и сплошных профилей разработаны программы и выполнен числовой расчет элементов формообразующего инструмента (рис. 4).

Третий раздел посвящен экспериментальному исследованию свойств реологических порошковых композиций, особенностей их формообразования и разработке основ промышленных технологий получения изделий широкого целевого назначения.

Введение в порошки технологических пластифицирующих компонентов резко меняет физические, реологические и технологические свойства. Так, коэффициенты внешнего и межчастичного трения уменьшаются до 10 раз и изменяются в зависимости от давления прессования. При увеличении давления прессования до 31,2 МПа коэффициенты трения снижаются. В диапазоне давлений 31,2... 46,8 МПа коэффициенты трения стабилизируются и дальнейшее повышение давления не приводит к заметному их изменению. Образование жидкой составляющей, например, в результате расплавления одного из твердых компонентов при нагреве трущейся поверхности, позволяет уменьшить коэффициенты трения до трех раз. Наиболее эффективно влияние жидких составляющих при экструдировании высокопластифицированных порошков, спрес-

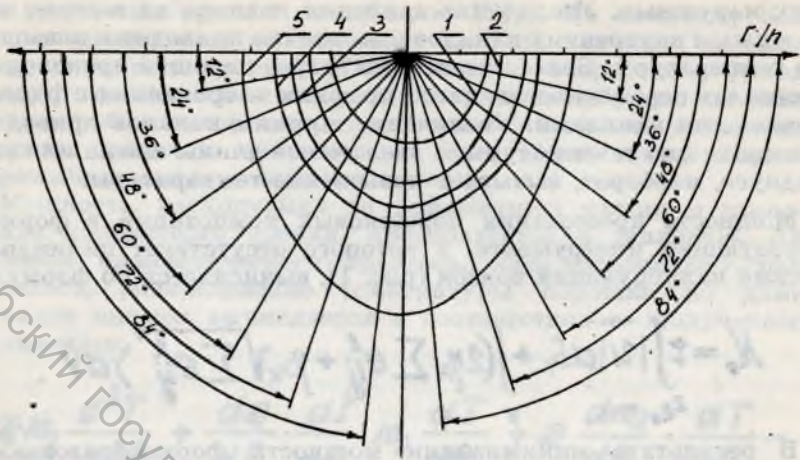


Рис. 3. Расчетные оптимальные профили продольного сечения каналов шнеков.

1— $R_2=6 m_0$  3; 2— $R_2=6 m_0$  5; 3— $R_2=6 m_0$  7; 4— $R_2=8 m_0$  10;  
5— $R_2=16 m_0$  16.

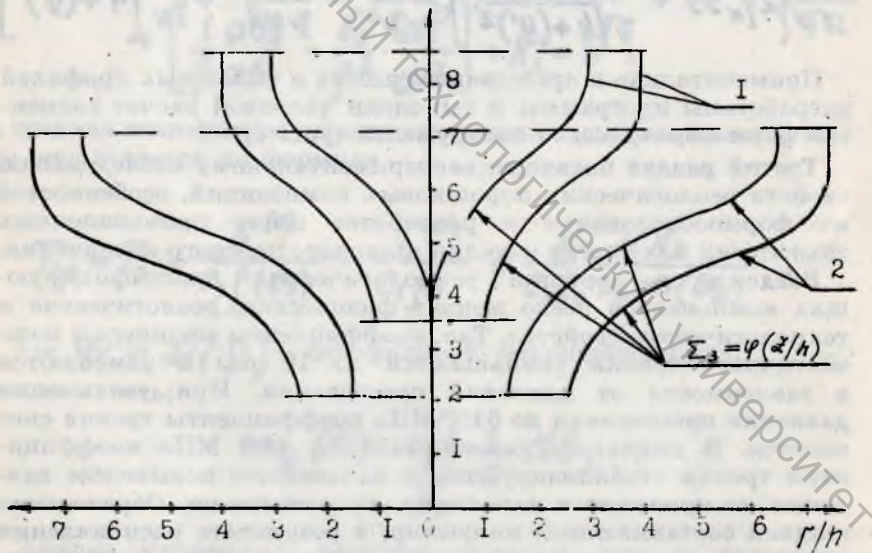


Рис. 4. Оптимальные профили внутреннего и наружного формообразующего инструмента

1— $\varphi(z_3)=3.5$ ,  $\varphi(z_4)=0.5$ ; 2— $\varphi(z_3)=7$ ,  $\varphi(z_4)=2$ .

сованных до беспористого состояния, у которых все межчастичное пространство заполнено пластификатором. В этом случае жидкая составляющая не имеет возможности вдавливаться внутрь прессовки и образует между порошком и трущейся поверхностью тонкую антифрикционную прослойку.

Установлено, что пластическая прочность прессовок в зависимости от содержания в них пластификатора в температурном интервале 307... 316 К может уменьшаться более чем в пять раз. Увеличение размеров фракций твердых частиц порошковой композиции до 0,3 мм также приводит к снижению пластической прочности в пределах двух раз.

Основным требованием, предъявляемым к реологическим порошковым композициям, можно считать их технологичность, т. е. способность к экструдированию при гарантированном качестве изделий и стабильности процесса. За критерий технологичности принято максимально предельное значение вязкости, превышение которого может привести к нарушению целостности изделий или к дестабилизации процесса формообразования. На основе многочисленных исследований установлены предельные значения вязкости в зависимости от степени обжарки порошковой композиции в формообразующем инструменте.

Для теории и практики шнекового прессования очень важно оценить уплотняемость порошковых композиций в сравнении с ближайшим аналогом — мундштучным прессованием. В условиях шнекового прессования порошковая композиция поступает в формообразующий инструмент только по части его поперечного сечения, ограниченного размерами канала. В очаге формообразования возникают локальные осевые перемещения прессуемой порошковой композиции, что является причиной возникновения продольных сдвиговых деформаций. Поскольку поступление материала в формообразующий инструмент возможно только в процессе вращения шнека, то продольные сдвиговые деформации последовательно перемещаются по всему объему очага и периодически повторяются за каждый оборот шнека. Скольжение торца шнека относительно прессуемого материала также вызывает сдвиговые деформации только в поперечном направлении. Таким образом, шнековое прессование осуществляется в условиях объемных продольных и поперечных сдвиговых деформаций, которые являются причиной повышенной уплотняемости процессов шнекового прессования. Так, для уплотнения до относительной плотности 76% медного пластифицированного порошка методом шнекового прессования требуется давление порядка 46,8 МПа, а методом мундштучного прессования 93,7 МПа, т. е. практи-

чески в два раза выше. С увеличением содержания реологических компонентов эффективность сдвиговых деформаций понижается.

В условиях мундштучного прессования внутренние порошковые слои в формообразующем инструменте движутся быстрее относительно наружных, что вызывает в последних дополнительные растягивающие напряжения и, как следствие, образование трещин и разрывов. Поэтому обеспечить качество изделий и стабильность процесса формообразования методом мундштучного прессования не всегда представляется возможным.

Шнековое прессование при использовании винтовых каналов трапецеидального профиля также сопровождается возникновением дополнительных напряжений в наружных слоях. В этом плане отличие мундштучного прессования от шнекового состоит в том, что при мундштучном прессовании возникают дополнительные напряжения растяжения, а при шнековом — сжатия. Дополнительные напряжения сжатия компенсируют контактные силы трения наружных слоев о формообразующую поверхность. Возможность компенсации контактных сил трения путем предварительного прессования в канале шнека соответствующей винтовой заготовки трапецеидального профиля обеспечивает стабильность формообразования качественных изделий независимо от их размеров.

Локальное поступление материала в формообразующий инструмент вызывает в нем пульсации напряжений. В каждой точке по объему формообразующего инструмента за один оборот шнека в соответствии с числом заходов винтовых каналов несколько раз имеет место подъем давлений до максимума и последующий их спад. Подъем давлений происходит медленно, а затем резко увеличивается. Спад давлений происходит аналогично, только в обратной последовательности. Амплитуда пульсаций давлений, т. е. разность между максимальным и минимальным значениями нормальных давлений с увеличением содержания реологических компонентов имеет тенденцию к уменьшению. Наибольшего значения амплитуда пульсаций достигает при прессовании чистых порошков. Амплитуда пульсаций максимальна у торца шнека и по мере удаления от торца амплитуда интенсивно снижается.

Пульсации напряжений в формообразующем инструменте при недостаточной пластической прочности порошковой композиции могут быть причиной образования продольных трещин. Для выравнивания деформаций и предотвращения трещинообразования между торцем шнека и формообразующим инструментом должна быть предусмотрена «буферная зона», назначе-

ние которой—снижение пульсаций давлений. Длина «буферной зоны» выбирается в соответствии с результатами экспериментальных исследований.

Пульсаций напряжений можно вообще избежать, если формообразующий инструмент расположить таким образом, чтобы он являлся продолжением винтового канала. Шнек остается неподвижным, а вращательное движение сообщается сопрягаемому с ним корпусу. Отсутствие перемещения канала шнека относительно формообразующего инструмента обеспечивает однородность деформаций. Однако, при таком расположении формообразующего инструмента размеры изделий ограничиваются размерами сечения канала. Такой способ экструдирования целесообразно применять преимущественно для тонких проволочных изделий: прутков, стержней, полос и т. д.

**Пластифицирование и гомогенизация** порошковых материалов производятся отдельно или совмещаются с процессом формообразования. Раздельное приготовление порошковых композиций осуществляется на стандартном смесительном оборудовании, а непрерывность процесса формования осуществляется путем технологической состыковки смесительного и прессующего оборудования. Совмещение пластифицирования с формообразованием осуществляется путем подачи в канал шнека раздельно всех компонентов порошковой композиции с последующим их смешиванием в процессе движения по каналу шнека. Гомогенизация порошковой композиции в канале шнека реализуется за счет наложения дополнительных продольных, поперечных или винтовых сдвиговых деформаций (а. с. 1146893, 1142222, 1199447, 908522, 1199448, 1197773, 1047589, 1358204, 1452656).

**Прессование полых профилей.** Экспериментально исследованы энергосиловые параметры прессования реологических порошковых композиций в зависимости от их состава, степени обжатия и геометрических параметров формообразующего инструмента. Установлено, что сообщение элементам формообразующего инструмента вращательного движения в пределах оптимальных частот 0,16... 0,5 сек<sup>-1</sup> позволяет более чем на порядок снизить осевую составляющую контактного трения. Поэтому вращательное движение элементов формообразующего инструмента в условиях шнекового прессования можно рассматривать как радикальное средство предотвращения трещинообразования.

Предложены оригинальные решения прессования полых профилей широкого диапазона геометрических

размеров от крупногабаритных до капиллярных (а. с. 1258626, 1387315, 1586256, 1603641); полых профилей переменной пористости по сечению (а. с. 1403482, 1245444, 1366289, 1538999); полых профилей сложной формы (а. с. 1503176, 1510220). Разработанные технологии обеспечивают экструдирование изделий  $\varnothing 0,7... 150$  мм, пористость которых составляет 26...73%. Изменение направленной пористости по сечению возможно в пределах 15...57%.

**Прессование сплошных профилей.** В основу технологий формообразования сплошных профилей положены разработанные средства послойного воздействия, для реализации которых предложен комплекс специальных формообразующих инструментов и установлены математические соотношения между основными параметрами элементов формообразующего инструмента (а. с. 1167821, 1154812, 1252054, 1134295, 1374566). Разработанные технологии позволяют прессовать стержни  $\varnothing 1...120$  мм плотностью 99...100% практически из любых реологических композиций.

Разработанные технологии прессования сплошных стержней при необходимости предусматривают возможность одновременного армирования. В качестве армирующих элементов могут быть использованы дискретные волокна, металлическая или порошковая проволока, сетчатый каркас и т. д. В основу технологий армирования положены новые способы и устройства для их осуществления (а. с. 1394556, 1110545, 8992278, 984675, 1029497, 1041213, 1406924).

Прессование порошковых жгутов следует рассматривать как частный случай технологий прессования сплошных профилей. Преимущественно используются порошковые жгуты в качестве технологического материала в процессах нанесения покрытий. Разработанные технологии обеспечивают формование порошковых жгутов, как оголенных, так и в полимерной оболочке. В последнем случае возможно получение порошковых жгутов из чистых непластифицированных порошков. Технологии позволяют получать порошковые жгуты  $\varnothing 0,5...4$  мм. Минимальный радиус изгиба составляет 3 мм. Прессование порошковых жгутов осуществляется в соответствии с предложенными новыми технологическими решениями (а. с. 1586008, 1338210, 1187360, 1502196, 1492575, 1177058, 1304986, 1471411, 1621289).

Продолжением дальнейшего развития технологий прессования полых и сплошных профилей стали технологии прессования слоистых профилей, в основу которых положен принцип совместной или отдельной подачи в формообразующий инструмент соответствующих порошковых материалов.



Разработанные технологии обеспечивают прессование бислойных и многослойных труб, стержней, полос. Порошковые слои могут чередоваться в продольном, поперечном или одновременно в том и другом направлениях. Соединение слоев производится по плоской, цилиндрической или волнистой поверхностям. Для практической реализации прессования обширного ассортимента слоистых изделий предложена серия альтернативных технологических решений (а. с. 852446, 935213, 1036453, 1245413, 1225690, 1252049, 1419806, 1353578, 1047593, 1253737, 1342597, 1353575, 1357134).

Технологии формообразования порошковых покрытий на наружных или внутренних поверхностях исходных заготовок можно рассматривать, как частный случай прессования слоистых изделий. Технологии формообразования наружных покрытий основаны на принудительной подаче в формообразующий инструмент порошкового материала и исходной заготовки. Технологии формования внутренних покрытий предусматривают подачу внутрь полой исходной заготовки порошкового материала или предварительно спрессованного полого порошкового тела, которые внутри исходной заготовки подвергаются радиальному прессованию. Технологии позволяют формировать наружное покрытие максимального диаметра 100 мм, внутреннего минимального — 3 мм. Толщина порошкового слоя 0,3...90 мм, пористость — 25...70% (а. с. 1073954, 926858, 1043905, 1205555, 1067696, 1099095, 1190584, 1041214, 1183299, 1163993, 1347279, 1029498, 1223519, 1380072, 1320977).

Формообразование на наружном или внутреннем порошковом слое продольных или винтовых ребер позволяет резко увеличить площадь поверхности изделий и тем самым расширить области их применения. Формообразование ребер традиционными способами, как правило, сопровождается нарушением целостности. В основу новых технологий положены разработанные средства объемного сжатия порошковых материалов в формообразующем инструменте. Технологии обеспечивают получение ребер с минимальной толщиной стенок порядка одного миллиметра (а. с. 1398239, 1457279, 1210319, 1441607, 1266074, 1292270, 1332658).

**Четвертый** раздел посвящен разработке, созданию и внедрению специального лабораторного и промышленного оборудования. Для проведения экспериментальных исследований разработан ряд оригинальных методик: способ определения технологических характеристик порошковых материалов (а. с.

1553884), способы определения энергосиловых параметров процесса экструдирования (а. с. 1378163, 1290135); создан ряд приборов: трибометр для порошковых материалов (а. с. 1176695), конический пластомер (а. с. 1274848), устройство для измерения окружного проскальзывания порошка в канале шнека (а. с. 1341034).

Разработанные методики реализованы на специально созданном комплексе лабораторных установок—ЭШ-1...ЭШ-3, ЭШК-4, ЭШЦ-5, ЭД-6. Каждая из установок универсальна и предназначена для решения широкого круга экспериментальных и технологических задач. Установки выполнены в одношнековом и двухшнековом вариантах. Приводы вращения шнеков характеризуются широким интервалом мощности (2.2...122 кВт) и поэтому обеспечивают усилие прессования до 750 кН. На всех установках применяется только плавный бесступенчатый электромеханический или гидравлический привод. Установки оснащены средствами автоматизированного контроля параметров прессования и термостабилизации загрузочных, прессующих и формообразующих устройств. Лабораторное оборудование предназначено для прессования реологических порошковых композиций, однако допускается прессование чистых пластичных порошков. Диаметр прессуемых моно- и бислойных изделий находится в интервале 1...150 мм.

Результаты исследований процессов шнекового прессования и на их основе сформулированные принципы управления технологическим процессом, а также накопленный опыт создания и эксплуатации экспериментальных установок позволили выработать практические рекомендации по проектированию промышленных установок. В большинстве случаев промышленные установки включают смесительные, гомогенизирующие, прессующие, формообразующие, разделительные, приемные и другие устройства, каждое из которых должно работать в полной согласованности с остальными. Поэтому, в обязательном порядке, установки оснащаются средствами автоматического управления. По существу, промышленные шнековые установки являются линиями, обеспечивающими реализацию всего комплекса технологических процессов формообразования готовых изделий.

Конечная плотность изделий, производительность процесса экструдирования определяются начальной плотностью порошкового материала и скоростью его подачи в канал шнека. Для предварительного уплотнения порошкового материала и подачи его с требуемой скоростью должны быть предусмотрены специальные загрузочные устройства, обеспечивающие

принудительную подачу. Предложена серия оригинальных технических решений непрерывной принудительной загрузки порошков (а. с. 1284687, 1560401, 1560400, 1049188, 1528621, 1292915, 1337196).

Прессующие устройства предназначены обеспечить при минимальных энергозатратах стабильность процесса экструдирования. Эта задача решается путем оптимального выбора в каждом конкретном случае скорости экструдирования, зазора между шнеком и корпусом, рабочей длины канала шнека. Поэтому прессующие устройства должны быть оснащены средствами автоматизированной настройки для работы в оптимальных режимах. Предложен ряд оригинальных решений средств настройки прессующих устройств (а. с. 1320019, 1369874, 1379092, 1445573, 1289604).

Управление технологическим процессом на стадии формообразования сводится к двум основным задачам: гарантированному обеспечению качества изделий и возможности перехода от одного типоразмера изделий к другому. Эти задачи решаются путем соответствующего изменения геометрии формообразующего инструмента. Для этого формообразующий инструмент выполняется сборным, составные элементы которого имеют возможность относительных перемещений. Разовые наладочные перемещения составных элементов позволяют переходить от одного типоразмера к другому, а постоянные перемещения в процессе экструдирования обеспечивают формообразование изделий переменного по длине профиля. Технические решения средств наладки формообразующего инструмента защищены авторскими свидетельствами: 1289605, 1033263, 1423283, 1093395, 1412888, 1252047, 1417999, 1336354, 1469689, 1561340.

Группирование и анализ многовариантных решений средств приготовления порошковых композиций, загрузки, прессования, формообразования, разделения и приемки готовых изделий позволили разработать схему классификации технологического оборудования, которая в сочетании с разработанной теорией шнекового прессования является основой для создания системы автоматизированного проектирования технологических линий.

Внедрение осуществлялось путем совместной разработки технологии и соответствующего промышленного оборудования для ее реализации. Для каждого конкретного вида изделий из множества разработанных технологических вариантов предлагалось возможным выбрать наиболее рациональный. Создание опытно-промышленного оборудования осуществлялось на

базе унифицированных узлов и агрегатов. Поэтому стоимость опытно-промышленных образцов оборудования, несмотря на единичное производство, практически не отличалось от аналогичного серийного оборудования.

Созданы и переданы в эксплуатацию: опытно-промышленная установка для прессования проницаемых элементов ОПЭШ-7; установки для прессования металлополимерных изделий ОПЭШ-8, ОПЭШ-9; технологическая линия для прессования изделий из твердых сплавов ОПТЛ-10; линия для прессования крупногабаритных проницаемых элементов ОПТЛ-11; линия для прессования порошкового жгута ОПТЛ-12; линия для прессования изделий специального назначения ОПТЛ-13; модульный блок линии для прессования слоистых изделий ОПТЛ-14. Комплексная разработка технологии и оборудования, относительно невысокая стоимость оборудования, быстрое его изготовление способствовали в кратчайшие сроки его внедрению в народное хозяйство.

Разработанные технологии и оборудование легли в основу проекта цеха порошковой металлургии строящегося экспериментального завода при Витебском технологическом институте.

Пятый раздел посвящен прогнозированию дальнейшего развития шнекового прессования. В ближайшей перспективе следует ожидать смещения НИР и ОКР из области прессования реологических порошковых композиций в область прессования чистых порошков. Можно предположить, что шнековое прессование чистых порошков будет развиваться по двум основным направлениям:

— разработка теории, технологии, оборудования холодного и горячего прессования порошков;

— интенсификация процессов шнекового прессования.

Естественно, на первом этапе разработка процессов холодного прессования чистых порошков будет осуществляться применительно к изделиям относительно простой наружной формы: прутки, стержни, полосы и т. д. Для таких изделий представляется целесообразным устанавливать формообразующий инструмент по касательной к винтовому каналу таким образом, чтобы отверстие формообразующего инструмента было продолжением канала. В процессе экструдирования канал остается неподвижным относительно отверстия формообразующего инструмента, а движение сообщается наружной, внутренней или одновременно той и другой активным поверхностям (а. с. 1621289, 1289603, 1445573, 1502196).

Реализация горячего шнекового прессования открывает перспективу получения готовых изделий, резко сокращая опера-

цию спекания спрессованных полуфабрикатов. Совмещение в непрерывном режиме процессов прессования и спекания позволит качественно изменить существующие технологии, значительно повысить производительность, свести до минимума потребление энергии. Предлагается горячее прессование осуществлять путем предварительного подогрева порошка перед его подачей в канал шнека и последующего окончательного нагрева в процессе прессования. При этом, нагрев осуществляется преимущественно за счет интенсивного скольжения относительно порошка вращающихся роторов, дисков, валков и т. д. (а. с. 1435405, 1589493, 1496923 и др.).

Можно предположить, что интенсификация процессов прессования чистых порошков будет осуществляться в направлении повышения плотности экструдированных изделий и производительности. Следует ожидать, что средствами повышения плотности будут сдвиг, вибрации, дополнительные деформации, а местом наложения могут быть загрузочное устройство, канал шнека или формообразующий инструмент. Для этого шнеку, корпусу, элементам загрузочного устройства, формообразующего инструмента сообщаются продольные, круговые, поворотные колебательные движения (а. с. 1555965, 1160650, 1353579, 1323234, 1416271, 1274849, 1053968).

Наиболее эффективным средством повышения плотности являются дополнительные локальные деформации, которые реализуются внутри канала, в формообразующем инструменте или на его выходе. Дополнительные деформации осуществляются в процессе комбинированного прессования, основанного на совмещении шнекового прессования с другими способами непрерывного прессования: прокаткой, конформ-методом, последовательным циклическим прессованием (а. с. 1561340, 1041212, 884801, 1195540, 1287410, 1605408, 1504889).

Достичь наибольшей для данных условий производительности представляется возможным за счет максимального снижения проскальзывания порошка относительно неподвижных (реактивных) поверхностей каналов шнеков и формообразующего инструмента. Решение этой задачи заключается в уменьшении площади реактивных при одновременном увеличении площади активных поверхностей. Отдельные решения этой задачи изложены в описаниях следующих изобретений: 1156855, 1496923, 1310112, 1470459, 1139565, 1319416, 1340905, 1490814, 1489058.

## ВЫВОДЫ

1. Предложена классификация и дано математическое описание каналов шнековых устройств. Получены системы для расчета напряжений и плотности вязких и вязкопластичных порошковых композиций по длине каналов шнеков.

2. Зависимости распределения плотности по длине каналов характеризуются наличием зон постоянной плотности, а также зон замедленного и ускоренного уплотнения. Процесс интенсивного уплотнения ограничивается по длине одним винтовым шагом. Поэтому длина шнеков, используемых для прессования реологических порошковых композиций по сравнению с экструдированием термопластов, может быть укорочена в 4...10 раз. Это позволяет резко снизить габариты, вес, стоимость оборудования и уменьшить размеры производственных площадей.

3. Плотность на выходе каналов фиксированного профиля не зависит от формы каналов, их размеров, конструктивного исполнения и определяется только начальной скоростью подачи порошка и давлением подпора. В каналах переменного по длине профиля на плотность дополнительно оказывают влияние конструктивное исполнение каналов и их размеры. При одинаковых условиях прессования уплотняемость в каналах наружного исполнения выше, чем в аналогичных внутренних. С увеличением радиуса шнеков уплотняемость повышается как в наружных, так и внутренних каналах.

4. Начальная скорость подачи порошковой композиции и давление подпора являются факторами управления, для практической реализации которых шнековое оборудование должно быть оснащено техническими средствами подачи порошка в канал шнека с заданной скоростью и средствами изменения давления подпора.

5. Для всех классифицированных каналов шнеков предложены аналитические формулы для расчета параметров мощности прессования, средней температуры порошковых композиций по длине каналов, коэффициента полезного действия, осевого усилия. В результате минимизации составляющих мощности прессования получены дифференциальные уравнения для расчета оптимальных профилей каналов шнеков и формообразующего инструмента. Полученные выражения служат исходной теоретической основой для разработки системы автоматизированного расчета параметров шнекового оборудования.

6. Анализ результатов расчетов показал, что при одинаковых условиях прессования порошковые композиции более интенсивно нагреваются во внутренних каналах, чем в наружных. Увеличение давления подпора, длины или

радиуса шнеков однозначно приводит к повышению температуры. Независимо от конструктивного исполнения каналов увеличение давления подпора приводит к росту КПД, а увеличение начальной скорости порошковой композиции, наоборот, к понижению. С целью повышения КПД, а следовательно, понижения общих энергозатрат порошковые композиции необходимо прессовать в каналах шнеков до максимально возможной плотности.

7. Введение в порошки реологических компонентов позволяет до 10 раз по сравнению с чистыми порошками уменьшить коэффициенты внешнего и межчастичного трения, а наличие жидкой прослойки между реологической порошковой композицией и трущейся поверхностью снижает коэффициент внешнего трения до 3 раз. Коэффициенты внешнего и межчастичного трения снижаются в диапазоне давлений прессования до 31,2 МПа, стабилизируются в диапазоне 31,2... 46,8 МПа и остаются неизменными при дальнейшем повышении давлений. Сообщение вращательного движения элементам формообразующего инструмента с частотой 0,16—0,5 сек<sup>-1</sup> позволяет более чем на порядок уменьшить осевую составляющую контактного трения.

8. Качественно и количественно оценено влияние содержания пластифицирующих компонентов, размеров твердых частиц, температуры на реологические свойства порошковых композиций. Установлены верхние пределы реологических параметров, определяющих технологичность порошкового материала, превышение которых приводит к снижению качества изделий и дестабилизации процесса прессования.

9. Экспериментально установлено, что изменение нормальных напряжений по объему формообразующего инструмента носит пульсирующий характер. Амплитуда пульсаций напряжений зависит от формы и размеров продольного сечения каналов шнеков, длины формообразующего инструмента, содержания пластификатора. Для нейтрализации пульсаций напряжений между торцем шнека и формообразующим инструментом должна быть предусмотрена «буферная зона» или формообразующий инструмент устанавливается по касательной к винтовому каналу и является одновременно его продолжением.

10. Шнековое прессование осуществляется в условиях объемных сдвиговых деформаций, которые позволяют до двух раз повысить уплотняемость по сравнению с мундштучным прессованием. Наибольший эффект от действия объемных сдвиговых деформаций имеет место при уплотнении чистых и малоластифицированных порошков. В отличие от мундштучного шнековое прессование обеспечивает получение

качественных изделий практически любых размеров поперечного сечения.

11. На основе комплекса выполненных исследований определены направления эффективного применения шнекового прессования. В соответствии с выбранными направлениями на базе предложенных способов и устройств разработаны эффективные групповые технологии прессования из порошков железа, меди, нержавеющей стали, твердых, тяжелых сплавов, керметов, ферритов, наплавочных порошков изделий широкого целевого назначения. Приведены результаты экспериментальных исследований, позволяющие определять энергосиловые параметры прессования, геометрические размеры каналов шнеков и очага формования, а также прогнозировать свойства изделий. Установлены математические соотношения между основными геометрическими параметрами элементов формообразующих инструментов. Разработаны новые экологически чистые пластификаторы. Проанализированы особенности спекания длинномерных изделий и предложен ряд новых перспективных способов спекания.

12. Разработаны новые методики экспериментального исследования свойств порошковых композиций и процессов шнекового прессования, на основе которых создан комплекс экспериментальных шнековых установок. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, а также накопленный опыт проектирования и эксплуатации лабораторных установок позволил выработать практические рекомендации по созданию промышленного оборудования. Создан и передан в народное хозяйство комплекс опытно-промышленных установок и технологических линий для прессования изделий широкого целевого назначения.

13. Основы теории шнекового прессования реологических порошковых композиций; результаты обширных экспериментальных исследований; многочисленные технологические варианты прессования изделий широкого ассортимента; оригинальные групповые технические решения смесительных, гомогенизирующих, прессующих, формообразующих, разделительных, приемных устройств составляют исходную базу для разработки системы автоматизированного проектирования технологических процессов шнекового прессования и соответствующего оборудования для их реализации.

14. Предложен и систематизирован обширный ряд новых способов и устройств для холодного и горячего прессования чистых порошков. Установлены математические соотношения между температурой порошка, его физическими свойствами и кинематическими параметрами движения контактируемых



с порошком подвижных конструктивных элементов. Предложены эффективные средства повышения уплотняемости порошков и производительности процесса экструдирования.

Основные положения диссертации содержатся в научно-технических отчетах (госрегистрации № 031788, 0082506, 0025943, 0033945, 0012602, 01.90.0020860, 01.86.0008709, научный руководитель Клименков С. С.) и изложены в 203 работах, основными из которых являются:

1. Клименков С. С. Расчет плотности экструдированного порошка по длине канавки шнека. / В сб. Высокоэнергетические процессы получения композиционных и порошковых изделий, материалов и покрытий. БРНПО. Минск: Вышэйшая школа. 1989, С. 119.

2. Клименков С. С. Теоретический анализ энергосиловых параметров экструдирования порошков на шнековых установках. / В сб. Высокоэнергетические процессы получения композиционных и порошковых изделий, материалов и покрытий. БРНПО. Минск: Вышэйшая школа. 1989. С. 121.

3. Клименков С. С., Селивончик В. В. Классификация транспортирующих каналов шнековых устройств и их математическое описание. / В сб. Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении. ВТИЛП. Минск: Университетское, 1990. С. 122...125.

4. Клименков С. С., Селивончик В. В. Мощность и момент шнекового прессования. / Там же. С. 125...127.

5. Клименков С. С. Энергетические затраты при прессовании порошков на шнековых установках. // Сб. науч. тр. / Научно-производственное объединение порошковой металлургии. Минск.—1987.— № 11.—С. 68...21.

6. Клименков С. С., Алексеев И. С. Экспериментальное исследование силовых параметров процесса непрерывного прессования порошков. // Сб. научн. тр. / Научно-производственное объединение порошковой металлургии.—1986.— № 10.—С. 74...77.

7. Клименков С. С., Алексеев И. С. Непрерывное формование длинномерных изделий из порошка методом экструзии. // Сб. научн. тр. / Научно-производственное объединение порошковой металлургии. Минск.—1989.— № 12.—С. 47.

8. Клименков С. С., Алексеев И. С., Райхельсон Г. Р. Возможности технологий формования длинномерных изделий. // Сб. научн. тр. «Пути совершенствования технологических процессов в машиностроении». Минск. Университетское, 1990.—С. 127...130.

9. Клименков С. С., Петухов В. В. Непрерывное прессование армированных изделий из порошка. Тез. докл. республиканской научно-практической конференции «Прогрессивные процессы обработки металлов давлением». Минск.—1985.—С. 78...80.

10. Клименков С. С., Ахтанин О. Н. Технология изготовления порошковой проволоки для газотермического нанесения покрытий. // Тез. докл. Всесоюз. совещ. «Теория и практика газотермического нанесения покрытий». —Дмитров.—1985. ТЗ.—С. 180...183.

11. Клименков С. С., Сикавин Г. И., Чулков В. П. Приборы для экспериментального исследования силовых параметров процесса шнекования порошковых составов. / В сб. Пиротехнические составы. Передовой производственный опыт. 1990.— № 9.—С. 46...48.

12. А. С. 1378163 (СССР).—Способ определения энергосиловых параметров процесса непрерывного формования металлических порошков и устройство для его осуществления. / А. В. Степаненко, С. С. Клименков, В. И. Кулагин и др.—Публикации не подлежат.

13. А. С. 1290135 (СССР).—Способ определения энергосиловых парамет-

- ров процесса экструдирования порошков шнеком, / С. С. Клименков, А. Н. Красновский.—Опубл. в Б. И., 1987, № 6.
14. А. С. 1553884 (СССР).—Способ определения технологических характеристик порошковых материалов в условиях пластической деформации. / А. В. Степаненко, С. С. Клименков, В. В. Пятов.—Опубл. в Б. И., 1990, № 12.
15. А. С. 1274848 (СССР).—Устройство для определения структурно-пластической прочности пластифицированных порошковых материалов. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов.—Опубл. в Б. И., 1986, № 45.
16. А. С. 1176695 (СССР).—Устройство для исследования внешнего и межчастичного трения порошка. / С. С. Клименков, В. В. Пятов, К. В. Шульков.— Публикации не подлежат.
17. А. С. 1047589 (СССР).—Способ изготовления спеченных изделий и устройство для его осуществления. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, И. С. Алексеев и др.—Опубл. в Б. И., 1983, № 38.
18. А. С. 1403482 (СССР).—Способ изготовления спеченных пористых трубчатых фильтров. / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Петухов.— Публикации не подлежат.
19. А. С. 1503176 (СССР).—Способ прессования изделий из порошков. / И. С. Алексеев, С. С. Клименков.— Публикации не подлежат.
20. А. С. 1510220 (СССР).—Способ получения изделий сложной формы из порошковых материалов. / И. С. Алексеев, С. С. Клименков, А. В. Карпушко.— Публикации не подлежат.
21. А. С. 1041213 (СССР).—Способ изготовления длинномерных армированных изделий и устройство для его осуществления. / С. С. Клименков, Д. С. Лысов, В. Г. Войтов.—Опубл. в Б. И., 1983, № 34.
22. А. С. 1342597 (СССР).—Способ прессования многослойных изделий из металлических порошков. / С. С. Клименков, Н. А. Силин, Д. И. Постовский и др.—Опубл. в Б. И., 1987, № 37.
23. А. С. 1073954 (СССР).—Способ нанесения покрытий и устройство для его осуществления. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, Д. С. Лысов и др.— Публикации не подлежат.
24. А. С. 1043905 (СССР).—Способ нанесения покрытий из порошков. / С. С. Клименков, П. И. Скоков, Д. С. Лысов и др.— Публикации не подлежат.
25. А. С. 1041214 (СССР).—Способ получения покрытий из порошковых материалов. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, Д. С. Лысов и др.—Опубл. в Б. И., 1983, № 34.
26. А. С. 1183299 (СССР).—Способ нанесения покрытий на внутреннюю поверхность длинномерных изделий. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, И. С. Алексеев и др.—Опубл. в Б. И., 1985, № 32.
27. А. С. 1223519 (СССР).—Способ нанесения покрытия из порошка на внутреннюю поверхность трубы. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов.— Публикации не подлежат.
28. А. С. 1380072 (СССР).—Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубы. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, В. В. Пятов.— Публикации не подлежат.
29. А. С. 1153455 (СССР).—Способ обработки пластифицированных заготовок из металлических порошков. / С. С. Клименков, В. В. Пятов, И. С. Алексеев и др.— Публикации не подлежат.
30. А. С. 119389 (СССР).—Способ спекания прессованных заготовок из пластифицированных ферромагнитных порошков. / С. С. Клименков, В. В. Пятов.— Публикации не подлежат.
31. А. С. 1197254 (СССР).—Способ изготовления круглых длинномерных профилей из металлических порошков и установка для его осуществления. / С. С. Клименков, И. С. Алексеев.— Публикации не подлежат.
32. А. С. 1345465 (СССР).—Способ экструдирования металлических порошков. / С. С. Клименков, А. Н. Красновский.— Публикации не подлежат.

33. А. С. 1219253 (СССР).—Способ непрерывного формирования порошков / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов и др.—Опубл. в Б. И., 1986, № 11.

34. А. С. 1400779 (СССР).—Способ непрерывного формирования порошков / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Пятов и др.—Опубл. в Б. И., 1988, № 21.

35. А. С. 1049188 (СССР).—Способ непрерывного прессования порошков и устройство для его осуществления. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, И. С. Алексеев и др.—Опубл. в Б. И., 1983, № 39.

36. А. С. 1489058 (СССР).—Способ изготовления длинномерных изделий из порошка и устройство для его осуществления. / С. С. Клименков, Г. Р. Херувимов.—Публикации не подлежат.

37. А. С. 1435405 (СССР).—Способ непрерывного изготовления изделий из порошков. / С. С. Клименков, В. В. Пятов, В. Г. Буткевич.—Опубл. в Б. И., 1988, № 41.

38. А. С. 1563842 (СССР).—Способ непрерывного прессования изделий из порошков и устройство для его осуществления. / С. С. Клименков, В. Г. Буткевич, В. В. Селивончик.—Опубл. в Б. И., 1990, № 18.

39. А. С. 1041212 (СССР).—Способ формирования трубчатых заготовок из порошка и устройство для его осуществления. / С. С. Клименков, Д. С. Лысов, Г. Р. Райхельсон.—Опубл. в Б. И., 1983, № 34.

40. А. С. 1195540 (СССР).—Способ непрерывного прессования длинномерных изделий из порошков и устройство для его осуществления. / П. А. Витязь, С. С. Клименков, И. С. Алексеев и др.—Публикации не подлежат.

41. А. С. 1287410 (СССР).—Способ изготовления изделий из металлических порошков. / С. С. Клименков, Д. С. Лысов, А. П. Ласковнев и др.—Публикации не подлежат.

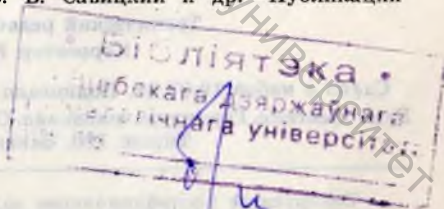
42. А. С. 1338210 (СССР).—Установка для экструдирования порошковой проволоки. / С. С. Клименков, А. С. Шандриков.—Публикации не подлежат.

43. А. С. 1352575 (СССР).—Установка для формирования длинномерных изделий из порошка. / С. С. Клименков, А. С. Шандриков.—Опубл. в Б. И., 1987, № 43.

44. А. С. 1357134 (СССР).—Установка для непрерывного прессования двухслойных изделий из порошков. / С. С. Клименков, В. И. Кулагин, А. В. Карпушко и др.—Опубл. в Б. И., 1987, № 45.

45. А. С. 926858 (СССР).—Установка для прессования порошковых материалов. / С. С. Клименков, П. И. Скоков, П. А. Витязь и др.—Публикации не подлежат.

46. А. С. 1374567 (СССР).—Установка для прессования заготовок из порошка. / С. С. Клименков, И. С. Алексеев, В. В. Савицкий и др.—Публикации не подлежат.



**Клименков Степан Степанович**

**ТЕОРИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭКСТРУДИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ  
ПОРОШКОВЫХ КОМПОЗИЦИИ МЕТОДОМ ШНЕКОВОГО ПРЕССОВАНИЯ,  
СОЗДАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ И ВНЕДРЕНИЕ В НАРОДНОЕ  
ХОЗЯЙСТВО**

**Технический редактор Т. И. Рабинович.**

**Корректор И. В. Марченко.**

Сдано в набор 19.07.91. Подписано в печать 23.07.91. Формат 60×84<sup>1/16</sup>.  
Бум. офсетная. Гарнитура школьная. Офсетная печать. Печ. л. 2. Уч.-изд. л. 2,57.  
Тираж 120. Заказ № 313. Бесплатно.

---

Белорусское республиканское научно-производственное объединение  
порошковой металлургии.

Типография им. Коминтерна, г. Витебск, ул. Щербакова-Набережная, 6.