

ДОНБАССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ

На правах рукописи

ПРИМЕНКО Сергей Геннадьевич

ОПТИМИЗАЦИЯ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО ПРЕССОВАНИЯ
ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА

Специальность 05.03.05 - Процессы и машины обработки
давлением

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

Краматорск 1995

ЛНА ім. С.С.Скряпін
АН України



00777946 (/)

Диссертация является рукописью.
Работа выполнена в Донбасской государственной
технической академии, г. Краматорск.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Лаптев А.М.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Лединский В.М.
кандидат технических наук
Тютенко В.С.

Ведущее предприятие: Акционерное объединение
"Новокраматорский машиностроительный
завод"

Защита диссертационной работы состоится "30" марта 1995 г.
в 10 часов на заседании специализированного совета
Д 068.01.01 при Донбасской государственной машиностроительной
академии (343913, г.Краматорск, ул.Шкадинова, 76, учебный
корпус 1, зал заседаний). Справки по телефону (06264) 42592

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Донбасской
государственной машиностроительной академии.

Автореферат разослан "28" февраля 1995 г.

Ученый секретарь
специализированного совета Д 068.01.01,
кандидат технических наук,
доцент

А.В.Сатонин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одной из важных задач современного машиностроения является освоение массового выпуска высокоплотных деталей из металлических порошков с повышенными механическими характеристиками, деталей сложной формы и большой массы. Решение этой задачи тесно связано с развитием технологий формования. Одним из видов формования, который позволяет получать высокоплотные детали с размерами, максимально приближенными к готовым изделиям, является горячее изостатическое прессование (ГИП), сочетающее процесс уплотнения порошка и ее спекание.

Исследования в области совершенствования технологий ГИП направлены на определение таких параметров процесса, которые обеспечивают получение требуемых свойств при минимальных затратах времени. Рациональные технологические параметры могут быть определены как экспериментально так и теоретическим путем. Наиболее предпочтительным является аналитический подход, при котором можно установить и проанализировать зависимости между технологическими параметрами процесса, и плотностью заготовки и затем оптимизировать процесс.

Цель работы. Целью настоящего исследования является разработка метода и вычислительных средств для расчета и выбора оптимальных технологических параметров процесса горячего изостатического прессования.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- в развитии ранее существующих моделей ГИП создана математическая модель, которая учитывает действие сил поверхностного натяжения и давления газа в порах. Показано, что их влияние может быть существенным при обработке заготовок из порошков мелких фракций, особенно при низких внешних давлениях;

- найдены условия нагрева и нагружения порошков зурнда и титана, при которых достигается теоретическая плотность;

- разработана методика расчета процессов уплотнения при ГИП в условиях одномерной нестационарной теплопроводности, позволяющая находить распределение температуры и плотности в любой момент времени, а также определять время полного уплотнения прессуемого изделия;

- разработана методика расчета оптимальных технологи-

ческих параметров процесса, которая учитывает конструктивные особенности используемого газостатического оборудования.

Методы исследования. При теоретическом исследовании процесса ГИП использованы структурный и непрерывный подходы, которые базируются на теориях пластичности и ползучести пористых тел. Применено математическое моделирование на ПЭВМ.

Практическая ценность. На основе уточненной математической модели процесса создана трехуровневая диалоговая система позволяющая: проводить численные эксперименты в широком диапазоне варьирования внешних параметров и для различных вариантов процесса; найти оптимальный технологический цикл с учетом конструктивных особенностей используемого оборудования при неравномерном распределении температуры и плотности по объему заготовки. Анализ результатов численных экспериментов позволил указать пути совершенствования технологических процессов горячего изостатического прессования.

Реализация работы. Результаты и рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе, использованы Лабораторией новых технологий (г.Москва), а также при выполнении научно-исследовательских работ.

Экономический эффект от использования результатов диссертационной работы составил 300 тыс.руб. в ценах 1991 года.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на республиканском семинаре "Физика и механика пластических деформаций порошковых материалов" (г.Луганск, 1991 г.), научно-технической конференции "Прогрессивные технологии и оборудование для обработки металлов давлением" (г.Киев, 1993г.), научно-технической конференции "Прогрессивные процессы обработки металлов давлением" (г.Краматорск, 1993 г.) и научно-технической конференции "Ресурс- и энергосберегающие технологии в машиностроении" (г.Одесса, 1994 г.).

Публикации. Работа выполнялась в Донбасской государственной академии в период с 1989 по 1994 год. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ.

На защиту выносятся:

- усовершенствованная математическая модель процесса горяче-

го изостатического прессования, в которую включены уравнения учитывающие действие сил поверхностного натяжения и остаточного давления газа в порах, теплопроводность и теплоемкость пористого материала, конструктивные особенности оборудования;

- методика расчета оптимальных технологических параметров при горячем газостатическом прессовании;
- диалоговая система, позволяющая проводить расчеты технологических процессов ГИП;
- результаты численных экспериментов по различным технологиям ГИП;
- оптимальный технологический цикл для уплотнения порошка никелевого сплава на газостате QUINTU 250;
- рекомендации по ведению технологических процессов горячего изостатического прессования для порошков никелевого сплава, корунда и титана.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка использованных источников и приложения. Диссертация содержит 84 страниц основного машинописного текста, 40 рисунков, 2 таблицы, 72 наименований источников и 2 приложение. Общий объем работы 135 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава посвящена аналитическому обзору и постановке задач исследования. Проанализированы процессы горячего изостатического прессования и циклы термосилового воздействия по технологиям, получившим развитие в последние годы. Рассмотрены основные деформационные механизмы (пластичность, ползучесть и диффузия), приводящие к уплотнению пористых материалов при ГИП.

Отмечено, что в настоящее время существуют два направления разработки теоретических моделей процессов горячего прессования пористых материалов: непрерывное и структурное. Последнее основано на использовании идеализированных моделей представительного элемента пористого тела и анализе их поведения при деформации. Первое направление базируется на применении континуальной теории деформирования порошков и пористых тел, представляемых в виде сплошной среды, обладающей свойством обратимой сжимаемости.

Структурный подход был предложен К.Торре и получил развитие в работах В.В.Скорохода, И.Ф.Мартыновой, В.М.Сейдла, В.И.Резникова, К.Лима, Я.Е.Гегузина, Д.С.Уилкинсона, М.Ф.Эшби и др. Так Д.С.Уилкинсон и М.Ф.Эшби выполняли анализ модели представительного элемента в виде толстостенной оболочки, которая деформируется по механизму дислокационной ползучести. Л.Д.Голлман, Г.А.Ильин и Л.А.Шофман, также В.Шепинский и Х.Петрик анализировали деформацию двумерного аналога сферических частиц - цилиндров параллельными осями в ячейке в виде призмы с квадратом в основании. Однако, получая решения учитывали только один из деформационных механизмов. М.Ф.Эшби и А.Е.Эстерлинг в ряде своих работ проанализировали процесс уплотнения при ГИП с учетом нескольких механизмов: пластичности, ползучести и диффузии. Таким образом, структурный метод моделирования процессов ГИП получил достаточно широкое распространение, но, вместе с тем, анализ деформации моделей представленных элементов выполнен при большом числе упрощающих допущениях, а полученные в разных работах результаты не всегда хорошо согласуются между собой и с экспериментальными данными.

Континуальную теорию для анализа процессов горячего прессования впервые применили В.В.Скороход и М.С.Ковальченко. В качестве определяющих первоначально рассматривались уравнения теории вязкого ньютоновского течения. При нахождении эффективного напряжения в твердой фазе исходили из равенства диссипации мощности деформации в объеме твердой фазы и объеме пористого тела в целом. В дальнейшем осуществлялся переход к модели нелинейно-вязкого деформирования.

В настоящее время к двум основным направлениям добавилось направление, основанное на сочетании дискретного и континуального подходов. Данный теоретический подход для рассмотрения процессов горячего изостатического прессования применил в своей диссертационной работе С.В.Подлесный. Разработанная им математическая модель была использована для построения диаграмм деформационных механизмов и для определения технологических параметров некоторых процессов ГИП.

Проведенный анализ теоретических методов определения технологических параметров горячего изостатического прессования структурного континуального и совместного, показал, что каждый из них имеет определенные недостатки. Так при

структурном, не учитываются или слабо учитываются свойства и состояние реальных порошков, их геометрическая форма, состав и т.д. Расчеты, выполненные на основе данного подхода, носят приближенный характер. Континуальный метод не учитывает механизм диффузии по контактной поверхности частиц, действующий на заключительной стадии прессования. Существующий вариант совместного подхода, имея в своей основе сочетание двух предыдущих подходов, все же не универсален. Расчеты, проводимые на его основе, можно отнести к оценочным. Результаты расчетов, проводимых на основе совместной модели, относятся к точкам на расстоянии на поверхности заготовки, характер уплотнения внутри обрабатываемого материала проследить невозможно. Ограниченность существующих моделей также связана с невозможностью использования их для выработки практических рекомендаций по ведению процесса, вследствие применения при расчетах идеализированных циклов ГИП отличных от реальных, на вид которых существенно влияют конструктивные особенности эксплуатируемого оборудования.

На основе изложенного выше были поставлены следующие задачи исследования:

- усовершенствовать математическую модель процесса горячего изостатического прессования с учетом в ней влияния сил поверхностного натяжения порошкового материала и остаточного давления газа в порах;
- учесть в математической модели ГИП неоднородность температурного поля и теплопроводность пористого материала;
- для определения оптимальных технологических параметров процесса ГИП учесть влияние на продолжительность цикла конструктивных особенностей оборудования;
- на базе данной математической модели со всеми дополнениями разработать методики расчета и реализовать их в виде пакета программ удобных для практического использования научными и инженерно-техническими работниками;
- использовать разработанный пакет программ для исследования процессов изостатического прессования типовых порошков;
- дать рекомендации по прессованию типовых порошков при различных схемах ГИП.

Во второй главе описана математическая модель процесса ГИП, основные зависимости которой были ранее разработаны

А.М.Лептевым и С.В. Подлесным, и выполнено ее усовершенствование. Модель учитывает три основных деформационных механизма: пластичность, ползучесть и диффузию. Ввиду того, что испытуемые деформационные механизмы связаны с реализацией различных физических явлений, которые могут протекать независимо и не влияя друг на друга, общая скорость уплотнения прессуемого материала определяется как сумма скоростей

$$\dot{\rho} = \dot{\rho}_0 + \dot{\rho}_n + \dot{\rho}_d, \quad (1)$$

где $\dot{\rho}_0$ - скорость уплотнения, определяемая действием дислокационной ползучести; $\dot{\rho}_n$ - скорость уплотнения по механизму ползучести Набарро-Херринга-Кобле; $\dot{\rho}_d$ - скорость уплотнения по механизму диффузии.

Важным параметром, как уже было отмечено, является величина p - давление при горячем изостатическом прессовании. Его можно рассматривать как сумму трех составляющих: внешнего давления p_0 , давления поверхностного натяжения на гранях пор - p_s и давления газа, заключенного в порах - p_1 , т.е.

$$p = p_0 + p_s - p_1. \quad (2)$$

Анализ, проведенный С.В.Подлесным, показал, что значениями p_s и p_1 в большинстве случаев можно пренебречь по сравнению со значениями p_0 , ввиду их малости. Однако, при реализации новых, нетрадиционных процессов ГМП, таких как спекание-ГМП, уплотнение при атмосферном давлении и некоторых других величины p_s , p_1 и p_0 могут быть соизмеримыми. Поэтому формула (2) должна быть включена в математическую модель процесса ИП.

Уравнения, полученные М.Ф.Эшби и др., были использованы для определения величины p_s на двух стадиях уплотнения. При $\rho=0.9$, когда можно идентифицировать отдельные частицы уплотняемого порошкового материала, p_s находится из формулы

$$p_s = \gamma \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right), \quad (3)$$

где γ - энергия (коэффициент) поверхностного натяжения; x - радиус перешейка между соседними частицами; r - радиус кристаллитов этого перешейка

$$r = \frac{x^2}{2(R_p - x)}, \quad (4)$$

и $0.9 < \rho < 1$ значения p_s могут быть найдены из выражения

$$p_s = \frac{2\gamma}{r_p}, \quad (5)$$

где

$$r_p = R_p \left[\frac{1 - \rho}{6} \right]^{1/3} \quad (6)$$

R_p , r_p - средние радиусы частиц порошка и пор; ρ - относительная плотность прессуемого материала.

Давление газа в порах препятствует уплотнению. Оно увеличивается вследствие двух факторов: уменьшения размера пор при уплотнении и увеличения температуры. Перед ИП давление газа в порах равно давлению дегазации p_0 . При ИП в оболочке давление газа возрастает в соответствии с зависимостью

$$p_1 = p_0 \frac{(1 - \rho_0) \rho T}{(1 - \rho) \rho_0 T_0} \quad (7)$$

где T - рабочая температура; T_0 - температура, при которой осуществляется дегазация; ρ_0 - относительная плотность перед прессованием.

Как следует из проведенных расчетов, значения давления поверхностного натяжения могут достигать 20-30 МПа (для порошков мелких фракций), что соизмеримо, а в некоторых случаях даже может превосходить характерные величины внешнего давления. Влияние давления газа в порах менее существенно (расчетные значения p_1 значительно меньше чем атмосферное давление при давлении дегазации и температурах, характерных для ИП).

В модели учтено влияние конструктивных особенностей газостатической установки на цикл ИП. Учтено, что полный цикл осуществляется в несколько этапов. Типовыми являются: вакуумирование рабочей камеры газостата, нагуск газа из баллонов в камеру, закачка газа из баллонов в камеру с помощью компрессора, ступенчатый нагрев с промежуточной выдержкой, технологическая выдержка, поэтапное охлаждение, выпуск газа из камеры в баллоны, откачка газа из камеры в баллоны, выброс остатков газа в атмосферу. Полное время цикла τ определяется как сумма времен тринадцати характерных этапов цикла, т.е.

$$\tau = \sum_{i=1}^{13} \tau_i \quad (8)$$

где τ_i - продолжительность i -го этапа цикла.

Продолжительность этапа вакуумирования определяется мощностью вакуумных насосов, объемом рабочей камеры и необходимой глубиной вакуума. Обычно она принимается постоянной для данной газостатической установки. Длительность этапа на

пуска газа из баллонов в камеру задается с помощью реле времени системы управления газостатом. Это позволяет считать продолжительность этого участка цикла известной, заданной величиной. Длительность этапа заправки газа определяется производительностью используемых компрессоров и необходимой величиной начального давления в камере, т.е. является расчетным значением. Продолжительность участков подъема температуры зависит от значений температуры промежуточной выдержки, температуры конечной выдержки и скорости нагрева газа. Таким образом, она является расчетной величиной. Скорость нагрева определяется возможностями нагревателей и термоизоляционного колпака камеры, геометрией садки, ее массой и конфигурацией. В большинстве случаев скорость нагрева является постоянной. Длительность промежуточной выдержки определяется из условия полного прогрева заготовки. Продолжительность технологической выдержки устанавливается из условия достижения 100 % плотности прессуемого материала и зависит от всей истории изменения температуры и давления.

В качестве примера, были рассмотрены зависимости, характерные для газостатической установки QUINTUS-250. Однако, предложенная методика применима и для прессования на других газостатах. Эксплуатационные данные установки QUINTUS-250 позволяют определять продолжительность некоторых участков цикла ГИП, как постоянные величины. Продолжительность других элементов цикла зависит от параметров установки и вида прессуемого материала. Так для никелевого сплава ЭП74ИП нагрев осуществляется в два этапа, с промежуточной выдержкой для выравнивания температуры по объему заготовки. Поэтому, для расчета оптимальных технологических параметров в математическую модель были включены соответствующие уравнения.

В реальных технологических процессах горячего изостатического прессования порошковых материалов температурное поле может быть существенно неоднородным, поэтому важным моментом является учет этой неоднородности. В основу расчета распределения температуры вдоль характерного размера заготовки было положено уравнение теплопроводности Фурье для одномерного случая

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \rho \frac{d \rho}{d t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad (9)$$

где x - координата; t - время; ρ , λ - удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности порошкового материала; ρ_p -

плотность в ло твердой фазы.

Для решения уравнения Фурье я пользовался метод конечных элементов (МКЭ) в сочетании с центральной разностной схемой решения дифференциальных уравнений. Расчетное уравнение имеет вид

$$\left([K] + \frac{2}{\Delta t} [D] \right) (T)^x - \left(\frac{2}{\Delta t} [D] - [K] \right) (T)_0 = 0, \quad (10)$$

где $[K]$ - глобальная матрица теплопроводности; $[D]$ - глобальная матрица демпфирования; $(T)^x$ - матрица столбец, составленная из значений температуры в узлах конечных элементов в момент времени $t+\Delta t$; $(T)_0$ - то же в момент времени t . Важнейшими факторами, определяющими распределение температуры, и, следовательно, плотности при горячем изостатическом пресовывании пористой заготовки являются ее теплофизические характеристики - теплопроводность и теплоемкость. На величину теплопроводности оказывает влияние плотность и температура. Эту зависимость можно записать в общем виде

$$\lambda = \lambda_1(\rho) \lambda_2(T). \quad (11)$$

На величину теплоемкости влияет только температура.

Влияние плотности на величину коэффициента теплопроводности можно учитывать по формулам, предложенным М.Д.Бальшиным и В.В.Скороходом

$$\lambda = \lambda_B \rho^l, \quad (12)$$

где λ_B - теплопроводность материала при $\rho=1$; l - показатель, определяющийся формой и видом пор (для изолированных $l=1,5$; для сообщающихся $l=2$).

Для никелевого сплава ЭП74П нами была использована зависимость предложенная Б.А.Друяновым. При относительной плотности $\rho > 0,9$

$$\lambda = \lambda_B \frac{2 \rho}{3 - \rho}. \quad (13)$$

При относительной плотности менее 0,9

$$\lambda = \lambda_B \frac{1 + 2(\rho - \rho_0)^{1/2}}{1 + 20(1 - \rho_0)^{1/2}}. \quad (14)$$

Для учета влияния температуры на величину коэффициента теплопроводности была использована линейная зависимость

$$\lambda_B = \lambda_0 [1 + \alpha(T - 300)], \quad (15)$$

где λ_0 - коэффициент теплопроводности при температуре 300 К; α - постоянный коэффициент.

Удельная теплоемкость C_p определялась по формуле

$$C_p = C_0 [1 + \phi(T - 300)], \quad (16)$$

где C_0 - коэффициент теплоемкости при $T=300$ К; ϕ - постоянный коэффициент.

В результате решения уравнения (10) устанавливается распределение температуры в одномерном цилиндрическом элементе на заданном временном интервале. Затем рассчитывается изменение плотности.

В третьей главе описана диалоговая система HIPPER, созданная на основе уточненной в гл. 2 математической модели. Система позволяет производить расчеты и оптимизацию процессов горячего изостатического прессования. Программа разработана в среде Турбо-Паскаль и может быть реализована на компьютерах типа IBM PC AT, с операционной системой не ниже MS-DOS 3.30. Программа содержит две ветви: функциональную и базу данных. В соответствии с этапами вычислительного процесса функциональная ветвь программы содержит три модуля работы: работа с исходными данными, выполнение расчетов, работа с результатами. Модуль расчета реализует математическую модель, изложенную в главе 2, и представлен тремя направлениями: режим "исследователь", режим "технолог" и режим "оператор" (названия даны в соответствии с задачами которые решает пользователь). Диалоговая система HIPPER устроена таким образом, что весь процесс вычислений визуализируется на экране компьютера (заданные графики цикла нагружения, достигнутые значения температуры и плотности в узлах конечных элементов, величины скоростей уплотнения и ее составляющих). Предусмотрен также удобный вывод результатов в виде таблиц и графиков на экран компьютера или принтер. База данных содержит физические характеристики материалов по 21 параметру. В настоящее время собраны сведения о 44 материалах, информация о которых была получена из справочной литературы.

В четвертой главе, с целью проверки разработанной математической модели методики расчета, проводились численные эксперименты по уплотнению порошка из сферических частиц титана ($R_p=72$ мкм, $d=144$ мкм). Полученные результаты показывают хорошее соответствие расчетных и экспериментальных данных. представляют практический интерес и свидетельствуют о надежности принятой модели. Были также выполнены расчеты процесса уплотнения порошков меди и Al_2O_3 , результаты которых также показали хорошую сходимость с экспериментальными

данными из литературы.

Рассматривались новые процессы горячего изостатического прессования, при которых в качестве передающей среды используются расплавы стекла повышенной чистоты марки Лямакс К6-3В. При ГИП контейнер с расплавом стекла охлаждается со скоростью примерно 250 град/час. Результаты расчетов, показали, что для ЭП74П при $R_p=100$ мкм и $d=30$ мкм пороговое давление, при котором возможно уплотнение до 100% плотности, равно 150-200 МПа, для $R_p=60$ мкм и $d=30$ мкм достаточно давление $p=100$ МПа. Аналогичные расчеты были проведены для Al_2O_3 ($R_p=1,25$ мкм, $d=2,5$ мкм) и титана ($R_p=72$ мкм, $d=144$ мкм). Для Al_2O_3 пороговое давление составляет $p=300-350$ МПа, а для титана $p=150-200$ МПа.

Использование металла в качестве перелаточной среды (ROC - процесс) приводит к резкому увеличению скорости охлаждения, примерно до 40 град/мин. Проведенные расчеты для порошков титана и Al_2O_3 , показали, что значения порогового давления соответствуют экспериментально установленному предпочтительному режиму деформирования (для титана $p=250$ МПа при $T=1000$ К и $R_p=72$ мкм, $d=144$ мкм, для Al_2O_3 $p=450$ МПа при $T=1700$ К и $R_p=1,25$ мкм, $d=2,5$ мкм).

Диалоговая система HIPPER была использована для проведения численных экспериментов по горячему изостатическому прессованию при низких внешних давлениях. Одним из таких процессов является технология "спекание-ГИП" ($p=5-20$ МПа). Проведенные расчеты для порошка никелевого сплава при $R_p=10, 20, 50, 100$ мкм подтверждают влияние на процесс уплотнения сил поверхностного натяжения, интенсифицирующееся при обработке частиц мелких фракций ($R_p=10, 20$ мкм). Аналогичные закономерности были замечены при расчетах процесса уплотнения порошка Al_2O_3 . Изучалось горячее прессование трех типов порошков ($R_p=0,5$ мкм $d=1$ мкм; $R_p=5$ мкм $d=10$ мкм; $R_p=50$ мкм $d=100$ мкм) при температурах 1500 К и 1700 К. Основным деформационным механизмом во всех случаях являлась диффузия по поверхности частиц. Даже при давлениях лишь 0,1 и 1 МПа плотность существенно возрастала за время менее 1 час для сверхтонких порошков Al_2O_3 ($R_p=0,5$ мкм $d=1$ мкм) при равнительно невысокой температуре 1500 К ($T_m=2320$ К).

Был выполнен расчет оптимального цикла ГИП сплава ЭП74П на газостате QUINTUS-250. Внешние параметры варьиро-

вались в следующих пределах: $1450 < T < 1525$ К; $75 < p < 150$ МПа. Минимальная продолжительность второй выдержки 1 час. В результате расчета было определено, что минимальная продолжительность цикла $\tau = 27$ час 42 мин получается при температуре и давлении 2-й выдержки равных $T = 1450$ К и $p = 100$ МПа (оптимизация проходила по центральной зоне заготовки). В данном диапазоне изменения внешних параметров максимальная продолжительность цикла $\tau = 29$ час 6 мин получается при $T = 1500$ К и $p = 150$ МПа.

В пятой главе представлены рекомендации по ведению технологических процессов ГИП при обработке типовых порошковых материалов (никелевого сплава, корунда и титана).

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Усовершенствована математическая модель ГИП путем включения в нее уравнений, учитывающих действие сил поверхностного натяжения и давление газа в порах, что позволило решить проблему использования данной модели при расчетах уплотнения при различных технологических схемах и режимах ГИП в широком диапазоне изменения внешнего давления.

2. Решена проблема расчета уплотнения пористого материала с учетом теплопроводности в одномерной постановке.

3. В математическую модель включены уравнения описывающие конструктивные особенности используемого оборудования, что позволило оптимизировать технологический цикл работы газостата.

4. На основе уточненной математической модели создана диалоговая система HIPPER, которая позволяет проводить расчеты процессов ГИП.

5. Используя диалоговую систему HIPPER и разработанные методики были проведены расчеты процессов ГИП:

- технологии горячего газостатического прессования порошков никелевого сплава, титана, что позволило определить давления при которых достигается 100 % уплотнение (никелевый сплав $p = 100$ МПа и $T = 1450$ К, титан $p = 103$ МПа и $T = 973$ К);

- для технологии ГИП расплаве сыпучих порошков никелевого сплава, титана, корунда были определены пороговые давления. Так для корунда при $T = 1600$ К пороговое давление составило 100 МПа, для никелевого сплава $p = 200$ МПа при $T = 1500$ К, для титана $p = 250$ МПа при $T = 900$ К;

- пороговые давления были определены для ROC - процесса

(для титана $p=250$ МПа при $T=1000$ К, для корунда $p=450$ МПа при $T=1700$ К);

- для процессов при низких давлениях, таких как "спекание - ГИП" и САР-процесс, были определены допустимые размеры частиц порошка, при которых возможно уплотнение до теоретической плотности. Так для никелевого сплава R_p не более 10 мкм , корунда R_p не более $7,5 \text{ мкм}$.

6. Применение направления "технолог", системы HIPPER, позволило найти оптимальный технологический цикл для газостата QUINTUS-250 (максимальная продолжительность цикла 27 часов 42 минуты при температуре и давлении 2-й выдержки $T=1450$ и $p=100$ МПа).

Основное содержание диссертационной работы опубликовано в работах:

1. Лаптев А.М., Приймченко С.Г. Горячее изостатическое прессование: уплотнение при низких внешних давлениях // Сборник научных статей / Краматорский институтальный институт. - Краматорск: КИИ, 1993. - Вып.1. - С.115-123.
2. Лаптев А.М., Приймченко С.Г., Васильев В.Е. Диалоговая система для расчетов процессов горячего изостатического прессования // Сборник научных статей / Донбасская государственная машиностроительная академия. - Краматорск: АПП, 1994. - Вып.2. - С.77-80.
3. Лаптев А.М., Приймченко С.Г. Анализ равномерности уплотнения порошковых заготовок при горячем изостатическом прессовании // Сборник научных статей / Донбасская государственная машиностроительная академия. - Краматорск: АПП, 1994. - Вып.2. - С.81-90.
4. Лаптев А.М., Подлесный С.В., Приймченко С.Г. Теория горячего изостатического прессования и ее применение при разработке технологий // Тез. докл. республ. семинара "Физика и механика пластических деформаций порошковых материалов" (Луганск, 9-12 апреля 1991). - Луганск, 1991. - С.5.
5. Лаптев А.М., Приймченко С.Г. Моделирование горячего изостатического прессования порошков на ЭВМ // Тез. докл. науч.-техн. конференции "Прогрессивные технологии и оборудование для обработки металлов давлением" (Киев, 16-17 февраля 1993). - Киев, 1993. - С.41-40.
6. Лаптев А.М., Приймченко С.Г. Определение оптимальных технологических параметров горячего изостатического прессования

Ав 32.072

порошкових матеріалів на основі математичної моделі пресування // Тез. докл. наук.-техн. конференції «Енергосберегаючі технології в машинобудуванні» (Севастополь, 6-9 вересня 1994). Київ, 1994. С.56-57.

Приймєнко С.Г. Оптимізація гарячого ізостатичного пресування пористих матеріалів на основі удосконаленої математичної моделі процесу.

Тисертация на злотуття вченого ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.03.05 – процеси та машини обробки тиском, Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 1995.

Захищаються 6 наукових робіт, які містять в собі теоретичні дослідження в галузі моделювання процесів гарячого ізостатичного пресування пористих матеріалів (ГІП). Урахована математична модель включенням рівнянь, які описують дію сил поверхневого натягу, теплопровідність пористого матеріалу та конструктивні особливості обладнання. На основі уточненої математичної моделі створена діалогова система HTPER, яка дозволяє проводити розрахунки процесів ГІП. Розроблені рекомендації, здійснено промислове упровадження.

Prymenko S.G. Optimization of hot isostatic pressing of porous material on the basis of improved mathematical model. Dissertation for a scientific degree of So. Candidate (Technics), speciality 05.03.05 – metal-shaping processes and machines, Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 1995.

Scientific works containing theoretical investigations in the field of hot isostatic pressing (HIP) of porous materials are defended. A mathematical model composed by including the equations which describe impact of surface tension force, porous material's thermal conductivity and the structural features of equipment. The dialogue system HTPER which allows HIP processes computation has been created on the basis of the improved mathematical model. Recommendations have been computed and industrial introduction has been made.

Ключевые слова:

горячее изостатическое прессование, математическая модель, диалоговая система, пористые материалы.