

На правах рукописи

УДК 621.762.4:519.711.3

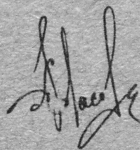
Власов Алексей Викторович

ТЕОРИЯ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ И УПЛОТНЕНИЯ
ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И СОЗДАНИЕ НА ЕЕ
ОСНОВЕ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ
ТЕХНОЛОГИИ ГОРЯЧЕГО ИЗОСТАТИЧЕСКОГО
ПРЕССОВАНИЯ

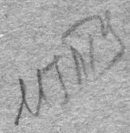
Специальность 05.03.05 – Процессы и машины обработки давлением

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Москва, 2000



Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана.

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Овчинников А. Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Живов Л. И.

доктор технических наук, профессор
Ерманок М. З.

доктор технических наук, профессор
Данилов В. Л.

Ведущая организация: ИМЕТ РАН им. А. А. Байкова.

Защита состоится "26" апреля 2000 г. в 14³⁰ час.
на заседании диссертационного совета Д053.15.05 при МГТУ
им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.
Один экземпляр, заверенный печатью, направляется по адресу.

Два экземпляра хранятся в библиотеке МГТУ

марта 2000 г.

Семенов В. И.

1566009

Объем 2,0 п. л. Тираж 100 экз.
Типография МГТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В различных областях техники постоянно увеличивается потребность в деталях и узлах с повышенными эксплуатационными характеристиками (прочность, износостойкость, способность работать в агрессивных средах и др.). Форма и размеры заготовок для таких изделий должны быть максимально приближены к геометрии деталей. Традиционные технологии, основанные на точном литье или обработке давлением, встречают серьезные ограничения при производстве подобных заготовок ввиду значительных трудностей обеспечения комплекса требований геометрической сложности и точности заданного уровня и распределения служебных и технологических характеристик материала.

Горячее изостатическое прессование (ГИП) – процесс высокотемпературного уплотнения порошковых заготовок под действием внешнего высокого давления – снимает указанные ограничения, позволяя получать из порошков монолитные изделия теоретической плотности сложной конфигурации ответственного назначения. ГИПом изготавливают такие детали как крыльчатки, диффузоры, турбины и т. п. Преимущество горячего изостатического прессования заключается в возможности получения сложных по форме изделий из трудно обрабатываемых материалов с хорошими прочностными свойствами и микроструктурой. Кроме этого технологические процессы порошковой металлургии открывают широкие возможности для разработки и внедрения в промышленность различных легированных сплавов с высокими показателями прочности, жаропрочности, износостойчивости, эксплуатационной надежности, которые не могут быть освоены при использовании традиционных методов литья и деформации слитков.

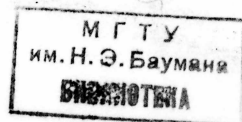
Имеющиеся в литературе экспериментальные и теоретические данные позволяют описать основные физические процессы и механизмы, определяющие уплотнение порошковых заготовок, и решить вопросы, связанные с выбором режимов ГИП для различных материалов. В рамках возможных сочетаний технологических параметров решающее влияние на конечную форму изделия оказывает конструкция капсулы, представляющая собой деформируемый инструмент, который определяет исходную форму заготовки и служит для передачи давления. Наличие пластически деформируемой капсулы приводит в условиях ГИП к необходимому напряженному состоянию в порошко-

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1566009

Власов А.В. Теория формоиз



вом материале и его сложному формоизменению, отличному от подобного.

Сложность процесса, протекающего в широком диапазоне давлений и температур, отсутствие жесткого формообразующего инструмента требуют при проектировании техпроцесса решения проблем как анализа (прогнозирование конечной формы заготовки после ГИП), так и синтеза (создание конструкции капсулы, обеспечивающей изготовление изделия требуемой формы и размеров). Дальнейшее совершенствование существующих и создание новых технологий ГИП связано с повышением качества и надежности практических рекомендаций, направленных на разработку эффективных технологических процессов получения изделий, максимально приближенных к форме детали, с поверхностями, не требующими дополнительной механической обработки. Использование натурального экспериментального прессования — слишком дорогостоящий и трудоемкий процесс, поэтому представляется актуальной работа, посвященная разработке теории формоизменения и уплотнения порошковых материалов при ГИП и создание на этой основе научно-обоснованных методик проектирования технологических процессов горячего изостатического прессования.

Существующие в настоящее время модели не позволяют с достаточной точностью описать формоизменение многокомпонентной системы (порошковый материал и деформируемый инструмент) при ГИП, что связано с многофакторностью процесса, включающего пластическое деформирование, ползучесть, различные диффузионные процессы в нестационарном тепловом поле, возможностью изменения контактных условий на границах раздела сред, необходимостью корректного построения экспериментальных баз данных о свойствах материалов, соответствующих используемым моделям.

На современном уровне решение этих проблем можно искать на основе создания обобщенных теоретических моделей процесса и использования вычислительной техники. Применение ЭВМ для разработки технологических процессов ГИП позволяет не только повысить точность получаемых изделий и снизить дополнительную механическую обработку, но также сократить сроки проектирования и затраты на подготовку производства.

Работа выполнена на кафедре «Технологий обработки давлением» (МТ-6) МГТУ им. Н. Э. Баумана, ВИЛСе и в НПГ Лаборатория Но-

вых Технологий (ЛНТ, г. Москва) в соответствии с планами научно-технических и хозяйственных работ с различными отечественными и зарубежными предприятиями и организациями, а также международной программы INTAS Project No 94-1740 "Development of Pure Processes for Manufacturing of Multicomponent Parts from Functionally Gradient Materials by Hot Isostatic Pressing (HIP)". Отдельные этапы работы выполнялись в рамках международной программы NFIR-III/EPRI по проекту X103-01 в Институте им. Пауля Шерера (Paul Scherrer Institut, Швейцария).

Цель работы: разработка теории уплотнения и формоизменения многокомпонентной системы (порошковый материал и деформируемый инструмент) с учетом комплексного характера влияния различных процессов, протекающих при ГИП, создание на этой основе научно-обоснованных методик проектирования капсул для технологических процессов изготовления деталей сложной конфигурации и внедрение их в производство изделий из жаропрочных никельсвх и титановых сплавов.

Методы исследования. Теоретические исследования процессов горячего изостатического прессования выполнено с использованием математических методов механики и термодинамики сплошной среды, аналитических и численных методов решения уравнений, комплексно описывающих вязко-пластическое течение пористого тела и протекающие при этом нестационарные тепловые процессы. Для проведения расчетов и обработки экспериментальных результатов использована вычислительная техника.

На защиту выносятся:

- основные положения теории формоизменения порошковых материалов при ГИП, состоящие в рассмотрении единого условия пластичности как обобщенного математического выражения для описания различных механизмов уплотнения, и создание на этой основе обобщенной модели деформирования многокомпонентной системы (пористая и компактная среды), включающей различные процессы пластического формоизменения и уплотнения, протекающих как в порошковом теле, так и в формообразующем пластически деформируемом инструменте;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований функций влияния, входящих в условие пластичности пористых сред, для различных порошковых материалов в условиях горячего изоста-

тического прессования;

теоретические зависимости для определения соотношений между тепловыми характеристиками порошкового тела и свойствами базового материала в зависимости от плотности, используемые при моделировании тепловой задачи;

- модель расчета контактного взаимодействия порошка с формообразующим инструментом, учитывающую возможность проскальзывания на границе раздела различных сред;

- методика обратного проектирования (задача синтеза) капсул для технологических процессов горячего изостатического прессования, позволяющая с помощью моделирования получать оптимальную форму капсулы для изготовления заданной детали;

- результаты теоретических исследований и внедрения разработанных технологий ГИП в производство, методов и алгоритмов расчета

- в практику проектирования и учебный процесс.

Научное содержание и новизна диссертационной работы:

- разработана обобщенная теоретическая модель формоизменения и уплотнения при горячем изостатическом прессовании с учетом процессов вязко-пластичности в нестационарном тепловом поле и методик получения данных о свойствах обрабатываемых материалов применительно к используемым пластическим и термодинамическим моделям;

- теоретически доказана возможность использования упрощенной модели поведения порошковых материалов без учета кинематического упрочнения (обобщенной жестко-пластической модели) при анализе технологических процессов ГИП применительно к нестационарному нагружению, позволяющей на начальной стадии проектирования получать достоверные результаты с использованием упрощенных баз данных о свойствах материалов;

- на основе результатов экспериментов и моделирования обосновано теоретическое положение о том, что зависимости, входящие в критерий пластичности для пористых тел, являются характеристиками не только материала, но и сочетания технологических параметров процесса ГИП;

- создана теоретическая модель контактного взаимодействия на границах раздела «порошок-деформируемый инструмент» и исследовано влияние проскальзывания на протекание процесса формоизменения;

– предложена методика разработки техпроцессов горячего изостатического прессования изделий сложной конфигурации, базирующаяся на использовании численного моделирования с последующим уточнением и корректировкой полученных результатов на упрощенных моделях, а также проектирования капсул от формы конечной детали к исходной форме, позволяющая получать оптимальную для заданного изделия конструкцию капсулы в автоматизированном режиме с использованием ЭВМ.

Практическую значимость работы составляют следующие результаты:

– использование созданных комплексных методик и компьютерных моделей различной сложности для проектирования технологических процессов ГИП как на начальной, так и заключительной стадиях разработки, позволяет существенно сократить сроки и себестоимость подготовки производства при освоении новых процессов;

– созданные базы данных по свойствам порошковых материалов из жаропрочных никелевых и титановых сплавов позволяют получать при моделировании формоизменения при ГИП результаты, соответствующие реальному деформированию и использовать их в практике технологических расчетов;

– методика проектирования технологических процессов горячего изостатического прессования исходя из конечной формы изделия позволяет решить задачу синтеза и автоматизировать процесс конструирования капсулы, необходимой для изготовления детали заданной конфигурации;

– внедрение в практику проектирования техпроцессов горячего изостатического прессования программ комплексного моделирования процессов формообразования деталей позволяет: дать обоснованные рекомендации по изменению конструкции формообразующей капсулы, направленные на получение стабильных формы и размеров изделия; повысить качество проектирования технологических операций и исключить субъективные ошибки проектировщика; снизить стоимость затрат на этапе разработки за счет замены натурных исследований вычислительными экспериментами на ЭВМ.

Апробация работы. Основные положения и материалы работы были представлены на следующих конференциях и семинарах: 30-th NFIR Steering Committee and Cladding Integrity Project Advisory Group Meeting (Switzerland, Lucerne, 1996), 1-st ESAFORM conference on Mate-

rial Forming (France, Sophia Antipolis, 1998), Всероссийской научно-технической конференции "Машиностроительные технологии" (Москва, 1998), 6-th International Conference on Numerical Method in Industrial Forming Processes NUMIFORM-98 (Netherlands, Enschede, 1998), 7-th International Conference on Metal Forming METAL FORMING-98 (UK, Birmingham, 1998), Международной конференции "Ресурсосберегающие технологии, оборудование и автоматизация штамповочного производства" (Тула, 1993), 22-nd Forging Industry Technical Conference "Forging Industry in the Next Century" (USA, Lake Geneva, 1999), на научных семинарах кафедр МТ-6 (1996-99) и РК-5 (1998) МГТУ им. Н. Э. Баумана, Лаборатории Новых Технологий (Москва, 1996-99) и в Институте им. Пауля Шерера (Швейцария, Филлиген, 1996-97).

Публикации. Автором опубликовано 30 печатных работ, из них 28 по теме диссертационной работы, в том числе одно свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов и списка литературы из 271 наименования и приложения, изложена на 192 страницах машинописного текста, содержит 150 рисунков и 14 таблиц. Общий объем работы – 336 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении обосновывается актуальность и сформулирована цель работы, изложена научная новизна, практическая значимость и результаты, выносимые на защиту.

В первой главе проведен анализ состояния вопроса, сформулированы задачи исследования.

В работах ученых из бывшего СССР (И. М. Федорченко, И. Д. Радомыслевский, М. Ю. Бальшин, С. С. Кипарисов, В. В. Скороход, М. Б. Штерн, В. З. Мидуков, В. Д. Рудь, В. Е. Перельман, Ю. Г. Дорофеев, М. З. Ерманок, В. Н. Самаров и др.) и зарубежных исследователей (М. F. Ashby (Великобритания), E. Arzt, W. A. Kaysser (ФРГ), G. H. Gessinger (Швейцария), B. M. Cassenti (США), K. East-erling (Швеция), M. Abouaf, G. Raison (Франция), M. Koizumi (Япония), W. Wang, Li Chenggong (Китай) и др.) уделено много внимания физическим процессам, происходящим в пористом теле при его пластическом деформировании и воздействии высоких температур,

рассмотрены вопросы массопереноса, связанные с дислокационными и различными диффузионными процессами, рекристаллизацией, образованием новых зерен, пластическим деформированием, различными видами ползучести, спеканием и т. д.

При разработке технологического процесса изготовления деталей методом горячего изостатического прессования проектировщик должен решить две основные задачи:

- определение режима ГИП, необходимого для изготовления заготовок заданной плотности, в большинстве случаев максимальной;
- проектирование капсулы, необходимой для изготовления изделия требуемой формы с заданными размерами.

Знание только технологических параметров недостаточно для проектирования процесса горячего изостатического прессования, так как требуется изготовить изделие не только заданной плотности, но и требуемых формы и размеров. Решение данной задачи базируется на экспериментальных и теоретических методах исследования процесса. Кроме того, процессы горячего изостатического прессования сопровождаются значительным ростом температуры, что приводит к изменению пластических свойств как капсулы, так и порошковой засыпки. При этом поле температур внутри заготовки может быть существенно неоднородным.

Проведенный анализ технической литературы показывает, что проблемы, связанные с выбором режимов горячего изостатического прессования для различных материалов, а также с основными физическими процессами и механизмами, определяющими уплотнение порошковых заготовок, достаточно глубоко разработаны как в теоретическом, так и в экспериментальном плане. В тоже время задачи предсказания конечной формы заготовки после ГИП и проектирования оптимальной конструкции капсулы, необходимой для изготовления изделия заданной формы и размеров, еще недостаточно изучены. Основные достижения на этом направлении могут быть получены на основе развития математических имитационных моделей процессов горячего изостатического прессования и внедрение их в практику инженерных расчетов. Существующие в настоящее время алгоритмы теоретического анализа формоизменения в условиях ГИП не позволяют учесть комплексный характер всех физических, механических, тепловых процессов и, как следствие, предсказывать с достаточной степенью точности конечную форму и размеры изделий. Все это при-

водит к необходимости проведения трудоемких и дорогостоящих натурных экспериментов на всех стадиях разработки технологических процессов горячего изостатического прессования.

Целью настоящей работы является разработка теории уплотнения и формоизменения многокомпонентной системы (порошковый материал и деформируемый инструмент) с учетом комплексного характера влияния различных процессов, протекающих при ГИП, создание на этой основе научно-обоснованных методик проектирования капсул для технологических процессов изготовления деталей сложной конфигурации и внедрение их в производство изделий из жаропрочных никелевых и титановых сплавов.

Для достижения этого необходимо решить следующие задачи:

- разработать теорию формоизменения и уплотнения многокомпонентной системы (порошковый материал и деформируемый компактный инструмент) при горячем изостатическом прессовании, включающую закономерности пластического деформирования, ползучести (вязко-пластические свойства) и тепловые процессы, которая позволит учесть влияние основных факторов техпроцесса (давление, температура, время, начальная плотность) на конечную форму заготовки после ГИП;

на основе экспериментальных данных установить зависимости для входящих в условие пластичности характеристик различных порошковых материалов применительно к разработанным теоретическим моделям;

- оценить влияние граничных условий на поверхностях раздела порошка и формообразующих элементов капсулы на получаемую в результате моделирования форму изделия;

- создать методику автоматизированного проектирования капсул для процесса горячего изостатического прессования исходя из конечной формы детали;

- разработать методики проектирования эффективных технологических процессов ГИП деталей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов и внедрить результаты их применения в производство.

Во второй главе изложены общие принципы построения математической модели совместного деформирования порошковой заготовки, капсулы и закладных элементов при горячем изостатическом прессовании с учетом нестационарности тепловых процессов, алгоритм программы расчета формоизменения осесимметричных заготовок с

применением метода конечных элементов (МКЭ). В работе рассматривается только жестко-пластическое поведение как порошковой заготовки, так и материала капсулы, то есть используется такая идеализация свойств деформируемого тела, когда можно пренебречь упругими деформациями по сравнению с пластическими.

При моделировании пористая среда рассматривается как непрерывная (континуальная), для которой определены характеристики напряженно-деформированного состояния в любой точке тела. В этом случае скорости деформаций среды $\dot{\epsilon}_{ij}$ можно связать со скоростями точек u_i с помощью соотношений Коши для малых деформаций:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (1)$$

При пренебрежении объемными массовыми силами для сплошных сред справедливы уравнения равновесия.

$$\sigma_{ij,j} = 0. \quad (2)$$

Связь между напряжениями и скоростями деформаций определяется из условия пластичности и ассоциированного закона течения. Характерная особенность горячего изостатического прессования - наличие как минимум двух различных по свойствам и характеристикам материалов: порошковой заготовки, изменяющей свою плотность в процессе ГИП, и сплошной (несжимаемой) капсулы, что предопределяет различные феноменологические закономерности течения указанных сред.

Использование условия пластичности для пористых сред в виде, предложенном S. M. Doraivelu с соавторами, позволяет построить единую теоретическую модель поведения как порошков, так и компактных тел. Модифицированная форма записи эллиптического условия пластичности в терминах компонентов тензора напряжений имеет вид:

$$\frac{A}{3}\bar{\sigma}^2 + 9B\sigma_0^2 = \sigma_R^2, \quad (3)$$

где $\bar{\sigma}$ - интенсивность напряжений; σ_0 - средние напряжения; σ_R - напряжение текучести порошкового материала при относительной плотности R , определяемое из экспериментов; A и B - некоторые положительные функции, зависящие от плотности и других характеристик материала (температуры и т. д.).

Напряжения текучести пористой среды σ_R можно связать с напряжениями текучести σ_s материала порошка:

$$\sigma_R^2 := \eta \sigma_s^2, \quad (4)$$

где $\eta \leq 1$ — также некоторая функция плотности R .

Величину

$$\bar{\sigma}_R = \sqrt{\frac{A}{3} \bar{\sigma}^2 + 9B\sigma_0^2} \quad (5)$$

можно рассматривать как интенсивность приведенных (эффективных) напряжений, которая характеризует напряженное состояние в точке пористой среды аналогично интенсивности напряжений $\bar{\sigma}$, используемой в теории пластичности несжимаемых сред. В этом случае условие пластичности (3) формулируется аналогично традиционному критерию Губера-Мизеса и может рассматриваться как его расширение для различных (как компактных, так и пористых) сред: пластические деформации возникают тогда, когда интенсивность приведенных напряжений $\bar{\sigma}_R$ становится равна напряжениям текучести σ_R :

$$\bar{\sigma}_R = \sigma_R(R, \dot{\epsilon}, \dot{\epsilon}_v, T, \dots). \quad (6)$$

Переход к традиционному условию пластичности осуществляется, если при $R \rightarrow 1$ функция $A \rightarrow 3$, а $B \rightarrow 0$.

Использование ассоциированного закона течения как для пластического, так и вязко-пластического течения, позволяет сформулировать уравнения течения пористых сред в виде:

$$\sigma'_{ij} = \frac{2}{A} \frac{\bar{\sigma}_R}{\dot{\epsilon}_R} \dot{\epsilon}'_{ij}, \quad \sigma_0 = \frac{1}{9B} \frac{\bar{\sigma}_R}{\dot{\epsilon}_R} \dot{\epsilon}_v, \quad (7)$$

где $\dot{\epsilon}_R$ — интенсивность приведенных (эффективных) скоростей деформации:

$$\dot{\epsilon}_R = \sqrt{\frac{3}{A} \dot{\epsilon}^2 + \frac{1}{9B} \dot{\epsilon}_v^2}, \quad (8)$$

$\dot{\epsilon}$ — интенсивность скоростей деформаций, $\dot{\epsilon}'_{ij}$ — компоненты девиатора скоростей деформаций, $\dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_{ii}$ — скорость объемных деформаций. Для предельного случая (при $A = 3$) первое уравнение (7) соответствует уравнениям течения Сен-Венана-Леви-Мизеса для несжимаемых сред.

Рассмотрение пористой среды как непрерывной позволяет использовать для анализа ее поведения вариационный принцип, и находить

решение путем минимизации функционала баланса мощностей:

$$\Phi = \int_V \bar{\sigma}_R \dot{\epsilon}_R dV - \int_{S_f} f u dS \rightarrow \min. \quad (9)$$

где f – поверхностные нагрузки, u – скорости движения поверхностных точек.

Сравнение базовых закономерностей течения пористых материалов с аналогичными зависимостями традиционной теории пластичности несжимаемых (компактных) сред позволяет выделить следующие основные особенности:

- наличие трех дополнительных функций A , B и η в условии пластичности;
- существование зависимости между σ_0 и $\dot{\epsilon}_0$ вместо условия несжимаемости ($\dot{\epsilon}_v = 0$).

Из входящих в условие пластичности (3) трех функций, только две являются линейно независимыми. В теории пластичности несжимаемых материалов коэффициент, связывающий второй инвариант девиатора напряжений с интенсивностью напряжений $\bar{\sigma}$, определяется из условия равенства последних действующим напряжениям при одноосном деформировании (растяжении или сжатии). Применим аналогичный подход к пористым телам, тогда для выполнения условия равенства действующих напряжений интенсивности приведенных напряжений $\bar{\sigma}_R$ функции A и B должны быть связаны между собой соотношением:

$$\frac{A}{3} + B = 1, \quad (10)$$

откуда следует, что $A/3 \leq 1$ и $B \leq 1$, так как A и B положительные функции. Кроме этого из рассмотрения задачи об одноосном деформировании следует, что для увеличения поперечных размеров при осадке должно выполняться неравенство $A > 2$. С учетом выражения (10) получим следующий диапазон возможных изменений функций:

$$\frac{2}{3} < \frac{A}{3} \leq 1, \quad \frac{1}{3} > B \geq 0, \quad (11)$$

причем предельный случай для правых неравенств ($A/3 = 1$, $B = 0$) соответствует поведению несжимаемого сплошного тела. Так как функции A и B связаны между собой, то для исследования их влияния на поведение пористого тела удобно использовать их отношение:

$$0 \leq \beta = \frac{3B}{A} < \frac{1}{2}. \quad (12)$$

Применительно к рассматриваемым задачам можно выделить следующие кинематические и силовые граничные условия. Для точек на внешней поверхности капсулы, контактирующей с рабочей средой в газостате, силовые граничные условия определяются действующим в данный момент времени давлением газа p , следовательно:

$$p_n = -p, \quad p_\tau = 0, \quad (13)$$

где p_n и p_τ – соответственно нормальные и касательные напряжения в точках на внешней поверхности капсулы.

Кроме граничных условий, определяющих взаимодействие капсулы со внешней средой, необходимо определить условия на внутренних границах раздела порошка и капсулы. Последняя находится как под действием давления в газостате, так и испытывает подпор со стороны порошковой засыпки, поэтому эти две среды не могут быть рассмотрены независимо. Как правило, в расчетах используют простейшее условие совместности деформаций, которое предполагает прилипание на границе контакта капсула–порошок, то есть геометрически совпадающие точки различных сред ведут себя абсолютно одинаково, и для них справедливы следующие соотношения:

$$u_i^k = u_i^п, \quad p_i^k = -p_i^п, \quad (14)$$

где верхними индексами обозначены соответствующие характеристики точек капсулы («к») и порошка («п»). Тогда одинаковые геометрические точки можно представить одной физической точкой, а все тело (включая как капсулу, так и порошок) может быть рассмотрено как сплошное, в котором граница контакта разделяет области с различными физическими свойствами.

Применение метода конечных элементов для решения задачи формоизменения при горячем изостатическом прессовании с неизвестными узловыми скоростями U приводит к составлению на каждом временном шаге t_i матричного уравнения вида:

$$K U = P, \quad (15)$$

где K – пластическая матрица жесткости, получающаяся при суммировании вклада отдельных элементов, P – вектор внешних нагрузок. В работе используются линейные конечные элементы.

Основную сложность при использовании МКЭ представляет выполнения условия несжимаемости для компактных сред. На основе ана-

лиза различных методов учета данного условия сделан вывод о предпочтительности применения метода малой сжимаемости при рассмотрении задач деформирования при ГИП, что позволяет использовать единый математический аппарат как для сжимаемых (порошок при $R < 1$), так и для несжимаемых (капсула, порошок при $R \approx 1$) сред. Поведение последних в этом случае также определяется уравнениями (7) при использовании следующих значений констант: $A = 3$ и $9B = g$, где g – некоторая очень маленькая константа. Выведенные в работе теоретические соотношения доказывают, что использование приближенного условия несжимаемости при соответствующем выборе константы $g = 10^{-2} - 10^{-3}$ не приводит к каким-либо заметным погрешностям в объеме деформируемого компактного тела, так как основное влияние на изменение объема при моделировании нестационарных процессов оказывает пошаговая процедура.

Процессы деформирования представляют собой нестационарные процессы, при моделировании которых численными методами решение строится с использованием пошаговой процедуры, предполагая квазистатическое поведение материала для каждого малого шага по времени Δt_i . Для заданной геометрии X_i находится поле скоростей точек (узлов) U_i , затем определяется новая геометрия тела в момент времени $t_{i+1} = t_i + \Delta t_i$ путем прибавления смещений к текущим координатам:

$$X_{i+1} = X_i + U_i \Delta t_i. \quad (16)$$

Можно выделить две реологических модели поведения материала: вязко-пластическая модель, когда напряжения текучести являются функцией скоростей деформаций $\sigma_R = \sigma_R(\bar{\epsilon}_R, \dot{\bar{\epsilon}}_R, R, T)$, жестко-пластическая модель, когда напряжения текучести не являются функцией скоростей деформаций $\sigma_R = \sigma_R(\bar{\epsilon}_R, R, T) \neq f(\dot{\bar{\epsilon}}_R)$, – использование которых приводит к существенным различиям в решении задач ГИП, основной особенностью которых является то, что известен вектор внешних нагрузок (силовое нагружение), определяемый внешним давлением p , при полной неопределенности поля скоростей, за исключением закрепления минимально необходимого числа точек тела, предотвращающего его движение как жесткого целого.

Для вязко-пластической задачи решение уравнения типа (15) не представляет сложности – вектор нагрузок P полностью известен, а уравнение разрешимо относительно U в данный момент времени, что определяется существованием зависимости σ_R от скорости деформаций $\dot{\bar{\epsilon}}_R$. В этом случае задача взаимно однозначна – для любого вектора

скоростей существует единственный вектор нагрузок и наоборот, для заданного вектора нагрузок существует единственный вектор скоростей, который и является решением для данного момента времени.

При моделировании жестко-пластической задачи для заданной геометрии X и распределения плотности R в момент времени t существует единственное значение величины p , способное вызвать мгновенные пластические деформации тела. Таким образом уравнение (15) для момента времени t с одной стороны должно быть выполнено, так как оно является уравнением равновесия, а с другой стороны это уравнение неразрешимо относительно U из-за вырожденности матрицы K при попытке записать ее для геометрии X и скорости U в момент времени t . Следовательно само уравнение (15) не имеет однозначного решения относительно скоростей. В тоже время переход тела из состояния X_i в состояние $X_{i+\Delta t}$ должен осуществляться не скачкообразно, а непрерывно, в зависимости от изменения внешнего давления.

Указанное противоречие привело к необходимости создания теории жестко-пластического деформирования тела, нагруженного изменяющейся во времени силовой нагрузкой. Так как уравнение (15) справедливо для любого t , то его также можно продифференцировать по времени, переходя от производных к дифференциалам получим:

$$d(K U) = dP.$$

Заменим дифференциалы приращениями на малом временном интервале Δt : и запишем последнее уравнение для двух соседних моментов времени – текущего t_i и последующего $t_{i+1} = t_i + \Delta t$:

$$K_{i+1} U_{i+1} - K_i U_i = P_{i+1} - P_i.$$

Учитывая, что зависимость (15) должна быть выполнена в момент времени t_i , получим следующее уравнение:

$$K_{i+1} U_{i+1} = P_{i+1}. \quad (17)$$

Несмотря на сходство уравнений (17) и (15), первое является не условием равновесия в текущий момент времени t_i , а уравнением равновесия для последующего момента t_{i+1} с учетом движения из состояния X_i в состояние X_{i+1} . При этом матрица жесткости K_{i+1} должна быть вычислена именно для геометрии X_{i+1} в момент времени t_{i+1} .

Процесс уплотнения при ГИП протекает в условиях значительного изменения температур (от комнатной до 1000°C и выше). Свойства

материалов в таком диапазоне меняются также значительно. Поэтому необходимо включение тепловой задачи в алгоритм решения, для чего также используется модель непрерывной среды с приведенными термодинамическими характеристиками. Рассматривая порошковую среду как континуальную можно записать уравнение теплового баланса в виде:

$$Rc_b \rho_b \dot{T} = (\lambda_r T_{,i})_{,i} + q \quad (18)$$

где T - температура в точке тела, рассматриваемого как однородная сплошная среда; c_b - удельная теплоемкость базового материала; λ_r - коэффициент теплопроводности пористой среды, который должен быть определен из экспериментов или иным способом; q - распределенные источники тепла. Решение уравнения (18) также может быть получено с использованием МКЭ.

Приведенное в конце второго раздела сопоставление результатов расчетов, полученных с использованием как жестко-, так и вязкопластической модели, с реальными формой и размерами изделий, полученных горячим изостатическим прессованием, показывает их хорошее соответствие, и тем самым, подтверждает корректность исходных посылок и допущений, заложенных в алгоритм и программу расчета формоизменения при горячем изостатическом прессовании осесимметричных заготовок.

Третья глава посвящена вопросам экспериментального определения функций пористости, входящих в условие пластичности, проверке их адекватности и интерпретации применительно к процессам горячего изостатического прессования, а также теоретическому определению коэффициента теплопроводности пористых сред с использованием математического моделирования.

Одной из наиболее существенных проблем, решение которой определяет адекватность и эффективность расчетной модели процесса, является создание базы данных свойств обрабатываемых материалов. Функциями, которые необходимо определить, являются зависимости A , B и η от относительной плотности. Очевидно, что температура также являясь значимым фактором и требует учета в прямом или опосредованном виде. Из указанного набора функций линейно независимыми являются только две, поэтому для их определения необходимо два независимых эксперимента в каждой точке технологической траектории (p, T) . В качестве таковых выбраны сравнительно легко реализуемые процессы всестороннего сжатия (идеального однородного

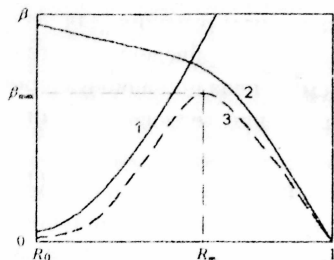


Рис. 1. Комплексный характер зависимости функции β от плотности R : 1 – рост сопротивлению сдвиговым деформациям при проскальзывании; 2 – снижение сопротивления сдвигу при пластическом деформировании; 3 – результирующая кривая.

ГИП) и одноосного деформирования (осадки).

Программа экспериментов строилась следующим образом: специальные капсулы с порошком подвергали ГИП по режимам, имитирующим уплотнение в реальном технологическом процессе. По достижению определенных значений T_i и p_i цикл обрывали и заготовку быстро охлаждали, чтобы избежать дополнительного уплотнения на «холостом» участке цикла при охлаждении. После удаления капсулы определяли плотность полученной заготовки и изготавливали из нее образцы для испытания на осадку. Поскольку при горячем изостатическом прессовании материал все время находится в предельном напряженном состоянии, температурные условия испытаний должны соответствовать условиям получения образцов. Это означает, что материал, полученный ГИПом при некоторой температуре T , должен испытываться на осадку также при той же температуре, тогда полученные данные о напряжениях будут соответствовать одной и той же точке в пространстве параметров (R, T) . Из экспериментов по горячей осадке цилиндрических брикетов различной плотности при соответствующей температуре рассчитывались значения предела текучести на сжатие.

Анализ полученных зависимостей для различных порошковых материалов на основе никеля, титана, а также жаропрочных сталей, показывает качественное совпадение поведения графиков – во всех случаях функция β имеет существенно немонотонный характер (рис. 1, кривая 3): начинаясь от почти нулевых значений при засыпной плотности, она достигает максимума при плотностях 80–85%, и затем опять падает до нуля при максимальном уплотнении. Это отличается от литературных данных, которые дают монотонно убывающую с увеличением плотности зависимость для β .

1

В рамках континуальной теории такой характер поведения функции β можно объяснить следующим образом. При использовании в качестве условия пластичности выражения (3) функция β представляет собой соотношение между сопротивлением пористого материала объемным (характеризуемых функцией B) и сдвиговым (функция A) деформациям. Можно выделить следующие механизмы уплотнения на различных стадиях процесса ГИП: перераспределение гранул путем проскальзывания (начальная низкотемпературная стадия процесса при малых относительных плотностях); пластическая деформация гранул (основной механизм уплотнения); высокотемпературная ползучесть и различные виды диффузии (на заключительных стадиях при высоких температурах и давлениях).

600 9951

На начальных стадиях прессования, когда плотность мала и даже не достигает теоретически возможной предельной плотности упаковки гранул как жестких частичек, сопротивление сдвиговым деформациям по сравнению с объемными невелико и в большей степени определяется трением между частицами. По мере уплотнения возможность проскальзывания уменьшается, в том числе за счет увеличения сил трения (увеличение поверхностей контакта и контактных давлений) и образования механических связей (спекания) между отдельными частицами. Другой процесс – пластическое деформирование гранул ведет к увеличению относительного сопротивления объемным деформациям, переходя, в конечном счете, к условию несжимаемости для компактных сред. Взаимодействием этих противоположных процессов и объясняется немонотонный характер поведения функции β .

Приведенные результаты расчета процесса уплотнения с раздачей показывают, что эксперименты по созданию таких баз данных должны быть максимально приближены к реальным процессам формоизменения и соответствовать конкретной модели описания пластического деформирования пористого тела. В противном случае получаемые результаты могут иметь не только значительное количественное, но и качественное отличие от реального поведения материала.

Теоретическое исследование тепловых процессов для определения коэффициента теплопроводности пористых заготовок позволило выявить следующие закономерности: доля лучистой составляющей в процессах теплопередачи внутри заготовки при ГИП незначительна, и ее можно не учитывать, теплопроводность засыпки при наличии идеального контакта между частицами хорошо описывается квадратичной



параболой от плотности заготовки, наличие слабопроводящего слоя на поверхности частиц вследствие образования окисных пленок может снизить эффективную теплопроводность в несколько раз, особенно на начальной стадии деформирования.

В четвертой главе изложены методики исследований некоторых частных вопросов, возникающих при проектировании и моделировании процессов горячего изостатического прессования.

Традиционные модели решения задач прессования порошка в деформируемых капсулах базируются на рассмотрении системы капсула-порошок как сплошной континуальной среды с различными свойствами для областей с порошковым материалом и капсулой. Такая модель подразумевает условие неразрывности (прилипания) вдоль границы раздела. В то же время очевидна возможность проскальзывания особенно на начальной стадии деформирования, когда плотность порошка незначительна.

Рассматривая контакт двух или более непрерывных сред (порошок, капсула, закладные элементы), которые могут перемещаться относительно друг друга вдоль некоторой поверхности раздела, можно определить условия их совместного деформирования. Разложив компоненты скоростей и напряжений в этих точках на нормальную (n) и касательную (τ) составляющие можно получить связь для кинематических

$$v'_n = v''_n, \quad (19)$$

и силовых условий вдоль границы контакта

$$p'_n = -p''_n, \quad p'_\tau = -p''_\tau = f_\tau, \quad (20)$$

где f_τ - контактное трение. Учитывая, что рассматриваемые процессы характеризуются большими значениями средних напряжений, а значит и значительными давлениями на границе контакта, для процессов горячего изостатического прессования предпочтительно использовать трение по Зибелю:

$$|f_\tau| = mk, \quad (21)$$

где m - фактор трения ($0 \leq m \leq 1$), k - сдвиговые напряжения текучести. Как правило для несмазанных поверхностей в обработке давлением принимается значение $m = 1$, очевидно для рассматриваемой задачи целесообразно также принимать максимальное значение.

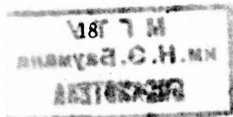
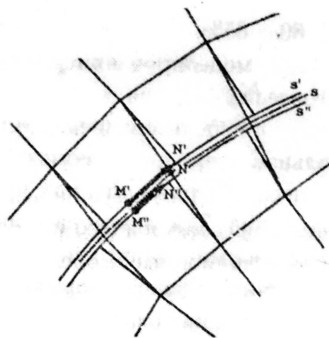


Рис. 2. Процедура локального переразбиения:

сплошные линии – элементы после смещения на i -том шаге, прерывистые – осредненные границы элементов, используемые для расчета на следующем шаге (показаны лишь касательные составляющие скоростей).



В работе показано, что для решения указанной задачи предпочтительно использовать «согласованные» сетки конечных элементов, совпадающие по границам раздела различных сред. Чтобы в процессе деформирования элементы все время оставались согласованными предложена методика локального изменения сетки конечных элементов только в вдоль границы раздела (рис. 2), для этого следует вычислять координаты X новой точки N для момента t_{i+1} как линейную комбинацию координат новых точек N' и N'' :

$$X_N = \frac{1}{2} (X_{N'} + X_{N''}). \quad (22)$$

Проведенный анализ показал, что учет условия проскальзывания особенно на начальных стадиях уплотнения при горячем изостатическом прессовании, позволяет описывать ряд эффектов, связанных с совместным деформированием разнородных по физическим свойствам сред. Неучет проскальзывания при моделировании приводит к заниженным по отношению к экспериментальным данным по образованию менисков на поверхности порошковых деталей, особенно для порошков с низкой начальной засыпной плотностью. Использование модели с проскальзыванием необходимо также при анализе процессов деформирования в капсулах с незафиксированными по отдельным поверхностям закладными элементами, которые обладают большей жесткостью по сравнению с порошковой засыпкой, особенно на начальной стадии процесса. Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными косвенно подтверждает гипотезу о том, что критерием перехода от условия проскальзывания к условию прилипания может служить величина плотности, критическое значение которой

$$\bar{R} = 80 - 85\%.$$

При моделировании формоизменения капсулы с порошком для изготовления изделия с лопаточным венцом или иными сложными каналами с использованием осесимметричной схемы происходит замена реальной трехмерной геометрии ее двумерной моделью, причем основная несимметричность как правило связана именно с зоной лопаточного венца. Такая замена в любом случае не дает возможности описать деформирование непосредственно самих лопаток, однако позволяет получить общие деформации лопаточного венца, а также учесть его влияние как на области, прилегающие к каналу, так и изделие в целом. В работе показано, что модель со сплошной вставкой позволяет качественно описать характер формоизменения лопаточного венца, однако, неучет изменения объемов в процессе горячего изостатического прессования приводит к завышенным размерам вставки после деформирования, а следовательно, и к искажению других размеров заготовки. Для учета порошка в полостях закладного элемента предлагается замена лопаток на осесимметричные заполненные порошком прорези (слоты) в области венца, позволяющие, с одной стороны, остаться в рамках двумерной модели, а с другой стороны, учесть влияние реальной несимметричности на результаты моделирования. Для корректности такой замены необходимо выполнение следующих условий:

- суммарное соотношение объемов порошка и закладных элементов в области венца должно соответствовать аналогичному соотношению в заменяющей его расчетной модели;
- жесткость слотов в радиальном и в осевом направлениях должны соответствовать жесткостям лопаточного венца;
- при наличии симметрии лопаток относительно некоторой плоскости, перпендикулярной оси, заменяющие слоты должны также обладать указанным свойством.

На основании приведенных в работе примеров показана возможность использования осесимметричной модели для расчета процессов деформирования изделий с лопатками, каналами и другими элементами, нарушающими круговую симметрию детали, путем замены реальной конфигурации на распределенные осесимметричные порошковые элементы (рис. 3).

Пятая глава посвящена методикам проектирования технологических процессов горячего изостатического прессования с учетом результатов моделирования при использовании разработанных алгоритмов

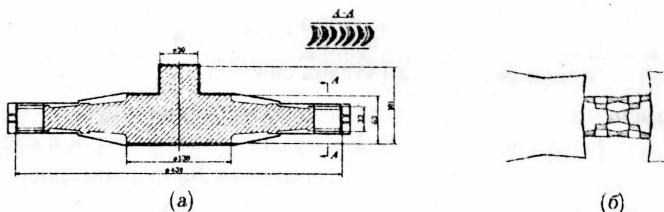


Рис. 3. Заготовка демонстратора диска турбины с контурами изделия (а) и сопоставление расчетной деформации зоны лопаточного венца (—) с экспериментальными данными (---) (б) при использовании осесимметричных порошковых слотов (заштрихованы).

и программ расчета формоизменения порошковой засыпки.

При производстве интегральных микросхем в процессе вакуумного нанесения функциональных слоев широко применяются мишени для напыления, которые изготавливают из дорогостоящих, высокочистых порошковых материалов высокотемпературным прессованием. В процессе использования мишени материал с поверхности испаряется неравномерно, образуя так называемый профиль отработанной мишени. В результате большой объем дорогостоящего материала идет в отходы производства. Для снижения потерь была разработана технология горячего изостатического прессования мишеней большого диаметра при которой внутренняя геометрия порошкового испаряемого слоя точно соответствует профилю отработанной мишени. Применение ГИП связано с усадками порошкового материала при формировании заготовки в процессе компактирования. Конечная геометрия заранее неизвестна и определяется как формой капсулы, так и свойствами порошка и конструктивных элементов. Экспериментальный подбор исходных размеров — достаточно трудоемкий и дорогостоящий процесс, поэтому, по возможности, используются численные методы.

При проектировании технологии деформирования с использованием моделирования, как правило, прослеживают «прямой» процесс формоизменения, то есть по имеющимся исходным данным (геометрия капсулы, начальная плотность и т. п.) определяют поведение заготовки и ее конечную форму (задача анализа). Однако при ГИП, в следствии отсутствия жесткого инструмента, особо важное значение имеет проблема определения начальной формы капсулы, которая бы позволила получить заготовку заданной конфигурации. Для решения указанной задачи необходима разработка методики так называемого

«обратного» проектирования техпроцесса – от конечной формы заготовки к ее исходной геометрии (задача синтеза).

Применительно к обработке давлением методика «обратного» проектирования была предложена S. Kobayashi и заключается в следующем. Пусть в момент времени $t = t_0$ геометрия X_0 деформированного тела представлена точкой некоторой Q , которая была достигнута при деформировании из точки P , описываемой геометрией X_{0-1} в момент времени $t = t_{0-1}$, за некоторый малый временной интервал Δt , то есть $X_0 = X_{0-1} + U_{0-1}\Delta t$, где U_{0-1} – поле скоростей в момент $t = t_{0-1}$. Таким образом проблема состоит в следующем – определить U_{0-1} , базируясь на информации о геометрии X_0 в точке Q . Используя «прямое» решение U_0 в точке Q , первое приближение для P может быть получено как $P^{(1)} = X_0 - U_0\Delta t$. Затем для конфигурации $P^{(1)}$ определяется «прямое» поле скоростей $U_{0-1}^{(1)}$ и производится сравнение точки $Q^{(1)} = P^{(1)} + U_{0-1}^{(1)}\Delta t$ с точкой Q . Если точность не достигнута, то следующее приближение $P^{(2)}$ можно найти как $P^{(2)} = X_0 - U_0^{(1)}\Delta t$. Используя решение $U_{0-1}^{(2)}$ о нагружении тела в точке $P^{(2)}$ можно получить состояние $Q^{(2)} = P^{(2)} + U_{0-1}^{(2)}\Delta t$. Итерационный процесс повторяется до тех пор пока $Q^{(n)} = P^{(n)} + U_{0-1}^{(n)}\Delta t$ не сойдется с достаточной степенью точности к Q .

Приведенный алгоритм итерационного решения может быть использован только для ограниченного класса задач, где заранее известно (или достаточно корректно можно предсказать) изменение граничных условий в процессе деформирования. Это ограничение характерно для традиционных процессов обработки давлением с использованием жесткого деформирующего инструмента, когда заранее неизвестно какие точки поверхности заготовки и в какой последовательности будут входить в контакт со штампом (или наоборот отрываться от инструмента). В задачах ГИП граничные условия являются заранее известными и определяются давлением на капсулу.

Рассмотренный выше алгоритм был модифицирован применительно к решению конкретного типа задач – проектированию капсулы для изготовления мишеней. В качестве базовых точек Q и P были выбраны соответственно конечное и начальное состояния, это упрощение базировалось на следующих особенностях процесса:

- общие деформации при ГИП не очень велики и по порядку величины сравнимы с объемными деформациями (около 30%). Предполага-

ется, что в этом случае итерационный процесс также сходится, хотя и медленнее, чем при использовании «лошагового» алгоритма;

– форма капсулы должна быть технологичной, то есть состоять из плоских и цилиндрических поверхностей. Следовательно полученную в результате моделирования исходную геометрию капсулы необходимо корректировать. Исходя из этого представляется нецелесообразным предъявлять повышенные требования к точности «обратного» решения на каждом итерационном шаге.

Предлагаемый алгоритм решения сводится к следующему. По известной геометрии капсулы и порошкового материала $X^{(i)}$ с использованием математического моделирования процесса рассчитывается конечная форма заготовки $Y^{(i)}$, которая сравнивается с требуемой геометрией Q . Изменение исходных размеров для следующей итерации производится в соответствии с соотношением

$$\tilde{X}^{(i+1)} = X^{(i)} + \alpha(Q - Y^{(i)}), \quad (23)$$

где $0 < \alpha \leq 1$ – коэффициент, используемый для повышения устойчивости процедуры решения. Затем новая геометрия $\tilde{X}^{(i+1)}$ корректируется для получения технологичной капсулы, которую легко сделать из листовых заготовок – для этого все поверхности порошка и закладных элементов, контактирующие с капсулой, заменяются плоскими или цилиндрическими. Полученная после этой процедуры геометрия $X^{(i+1)}$ используется как начальное приближение для следующей итерации. В качестве нулевого приближения берется конечная форма заготовки. Процесс расчета повторяется до тех пор, пока конечная геометрия профиля порошковой заготовки не будет с достаточной степенью точности совпадать с требуемой.

Созданная методика и программы расчета были использованы при разработке технологии ГИП мишеней из порошков W-Ti, W-Si на титановой подложке. На рис. 4 представлен результат применения программы для проектирования W-Si мишени диаметром 289 мм. Расчетный и требуемый внутренний контур порошкового слоя практически совпадают (относительная погрешность около 0,5%, результат получен за 7 итераций). Внешний контур (показан тонкой линией на рисунке) после стравливания капсулы получают механической обработкой. Результатом работы программы проектирования является эскиз требуемой капсулы и профиль подложки, необходимый для получения требуемой конфигурации порошкового слоя.

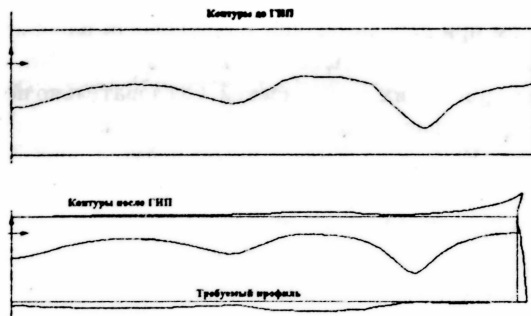


Рис. 4. Пример реализации процедуры обратного проектирования: сверху – исходные контуры порошка и подложки до ГИП, снизу – конечные контуры после прессования.

Хорошее соответствие результатов моделирования с экспериментами позволяет использовать расчеты непосредственно на стадии проектирования процессов ГИП, позволяя снижать временные и материальные затраты на разработку техпроцесса, путем замены экспериментальных вариантов выбора и проверки различных технологических решений на расчетные.

При проектировании заготовок сложной конфигурации, близких по форме к геометрии детали или совпадающих с ней, существующие в настоящее время программы расчета и уровень знаний о свойствах материалов не позволяет гарантировать получение требуемых размеров исключительно на основании расчетных методик, в первую очередь это касается различных полостей, получаемых с использованием закладных элементов (лопатки, каналы и т. п.). В этом случае расчетные решения необходимо дополнять экспериментами на деталях упрощенной формы, позволяющими с одной стороны убедиться в корректности модели, а с другой стороны получить дополнительную информацию для пересчета данных, полученных на двумерной модели, с выходом на реальную геометрию лопаток.

Решающее значение для получения корректных результатов моделирования имеют данные о свойствах порошкового материала. Поэтому особое внимание на начальной стадии проектирования должно быть уделено вопросу создания базы данных о свойствах обрабатываемого материала. Полученные из экспериментов или уточненные

данные о свойствах материалов используются для расчета на ЭВМ формоизменения капсулы и порошковой засыпки в процессе ГИП. Моделирование позволяет в интерактивном режиме исследовать влияние различных конструктивных решений по форме и размерам на получаемое изделие без проведения дорогостоящих экспериментов и выбрать оптимальную с точки зрения конечных размеров и возможности стабильного их получения геометрию капсулы. Из расчетов также можно получить осредненные данные о радиальных и осевых усадках несимметричных областей, например занимаемых лопаточным венцом, однако использование двумерных осесимметричных моделей не дают информацию о формоизменении самих элементов, выходящих за рамки симметричной модели (лопаток, лопастей и т. п.). В то же время требуемая поверхность лопаток должна быть получена непосредственно в процессе горячего изостатического прессования, так как их дополнительная механическая обработка затруднена или невозможна.

В качестве первого приближения при получении новых изделий используется подход, основанный на изготовлении упрощенной экспериментальной детали, близкой к требуемому изделию, но имеющей более простые контуры отдельных элементов и полостей (имитаторы). Разумные упрощения и изменения исходной геометрии позволяют существенно снизить сроки изготовления такой заготовки и стоимость отдельных технологических операций. При этом удается получить необходимую информацию и обнаружить дополнительные закономерности для производства годного изделия на заключительной стадии разработки процесса.

Анализ результатов, полученных на упрощенном изделии, могут быть использованы как для уточнения самой исходной модели путем корректировки данных о свойствах материала, так и для получения данных о формоизменении элементов, расчет которых в рамках двумерной модели невозможен. Информация о радиальных и осевых деформациях имитатора в сравнении с соответствующими данными расчета, а также тангенциальные деформации, позволяют с использованием моделей пересчета спроектировать форму закладных элементов, определяющих полость в капсуле, для получения требуемых формы и размеров лопатки.

Показано последовательное применение рассмотренной методики при проектировании технологических процессов на примере изготовления горячим изостатическим прессованием промышленного изделия

– рабочего колеса турбины двигателя с сформированной в процессе ГИП проточной частью. Капсула, предварительно просчитанная на ЭВМ, была проверена на экспериментальной модели с упрощенной формой лопаток. По результатам измерений откомпактированного демонстратора была уточнена форма капсулы и получены основные соотношения для расчета геометрии лопаток. В результате была разработана конструкторская документация на усовершенствованную капсулу и закладные элементы, включающая компьютерный файл данных с координатами, описывающими расчетную 3-х мерную геометрию полости, формирующей «порошковую» лопатку, и, соответственно, закладного элемента. Новая конструкция капсулы обеспечила получение натурального образца рабочего колеса с заданными основными размерами по ободу, ступице и требуемую геометрию стенок газодинамического тракта.

ОСНОВНЫЕ ИТОГИ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основании выполненных исследований в работе предложены научно-обоснованные технологические решения, состоящие в разработке высокоэффективного расчетного инструмента и принципов многоаспектного проектирования (анализ и синтез) технологических процессов прессования из порошковых материалов изделий сложной конфигурации, внедрение которых внесет значительный вклад в ускорение научно-технического прогресса в области горячего изостатического прессования.

2. В диссертационной работе обоснована и разработана теория деформирования многокомпонентной системы (пористая среда и деформируемый инструмент) при горячем изостатическом прессовании, базирующаяся на основных законах течения и включающая пластическое уплотнение пористой среды и формоизменение компактного материала, процессы ползучести (вязко-пластические свойства), нестационарные тепловые процессы, что позволяет учесть влияние основных факторов техпроцесса (давление, температура, время, начальная плотность) на уплотнение материала и форму заготовки в процессе ГИП.

3. На основе теории разработана модель вязко-пластического деформирования, которая реализована в виде алгоритма и комплекса программ расчета на ЭВМ осесимметричных процессов горячего

изостатического прессования на основе метода конечных элементов, что позволяет расчетным путем прогнозировать конечную форму и размеры получаемой заготовки. Использование созданного комплекса для моделирования техпроцессов позволяет: дать обоснованные рекомендации по изменению конструкции формообразующей капсулы, направленные на получение стабильных формы и размеров изделия; повысить качество проектирования технологических операций и исключить субъективные ошибки проектировщика; существенно сократить сроки создания технологических процессов и снизить стоимость затрат на этапе разработки за счет замены натурных исследований вычислительными экспериментами на ЭВМ.

4. Теоретически доказана возможность использования упрощенной модели поведения порошковых материалов без учета кинематического упрочнения (обобщенной жестко-пластической модели) при анализе процессов деформирования с силовым нагружением применительно к нестационарной стадии ГИП (подъем рабочего давления), позволяющей на начальном этапе проектирования получать достоверные результаты с использованием упрощенных баз данных о свойствах материалов.

5. Показано, что единое условие пластичности для пористых сред представляет собой обобщенное математическое выражение, используемое для описания механизмов деформирования, определяющих уплотнение на различных стадиях процесса горячего изостатического прессования. Выявлено, что входящие в критерий пластичности функции плотности являются не только характеристиками материала, но и существенно зависят от сочетания технологических параметров самого процесса прессования, следовательно, получение данных о свойствах порошковых материалов возможно только путем проведения экспериментов при условиях деформирования максимально приближенных к реальным параметрам горячего изостатического прессования.

6. Достоверность разработанных моделей подтверждается сопоставлением экспериментальных данных по горячему изостатическому прессованию различных изделий и результатов расчетов с использованием полученных экспериментальных данных о свойствах порошковых материалов, что позволяет использовать программы расчета для проектирования реальных технологических процессов.

7. Установлено, что учет трения на поверхностях раздела порош-

ка и формообразующих элементов капсулы (модель с проскальзыванием) вместо традиционно используемого при моделировании процессов ГИП условия прилипания на границах сред позволяет более адекватно описывать формоизменение заготовки особенно при малых плотностях на начальной стадии деформирования и в областях со сложной геометрией и развитой внешней поверхностью.

8. Разработаны методики и алгоритмы проектирования капсул для технологических процессов горячего изостатического прессования:

- для изготовления мишеней для электронной промышленности созданы программы автоматизированного построения по заданным чертежам изделия формы исходной капсулы и геометрии закладных элементов («обратная» задача), обеспечивающих получение требуемого профиля рабочей поверхности заготовки после уплотнения;

- для проектирования деталей сложной формы применен комплексный подход к проектированию, включающий численное моделирование с использованием разработанных методик, изготовление упрощенного изделия, уточнение параметров деформирования и создание опытного образца. Показано, что для получения качественных особо сложных и ответственных изделий нельзя ограничиваться только моделированием, так как разброс экспериментальных данных о свойствах порошкового материала, его начальной плотности, возможное отклонение технологических параметров и использование в расчетах двумерных моделей не всегда позволяют получать результаты с достаточной степенью достоверности особенно на поверхностях, окончательно формируемых в процессе горячего изостатического прессования без последующей механической обработки.

9. Внедрение результатов работы:

- методики и алгоритмы расчета формоизменения пористых тел при горячем изостатическом прессовании в виде программ моделирования используются в Лаборатории новых технологий (г. Москва) при разработке технологических процессов ГИП деталей из жаропрочных никелевых и титановых сплавов, реализованных в изделиях авиационно-космической техники на НПО «Энергомаш» (Россия), SEP (Франция) – рабочее колесо насоса двигателя, крыльчатка и роторы турбины;

- комплекс программ обратного проектирования технологичес

ких процессов изготовления горячим изостатическим прессованием испаряемых мишеней применяется на фирме TOSOH (США);

– программный комплекс QForm, позволяющий моделировать различные процессы пластического деформирования, в том числе порошковых материалов, используется на различных предприятиях и в учебных заведениях как у нас в стране, так и за рубежом (на данный программный комплекс, в разработке которого принимал участие автор, получено Свидетельство РФ № 980579 о регистрации программы);

– программы моделирования использовались для проведения научно-исследовательских работ в рамках международного проекта NFIR-X103-01 в Институте им. Пауля Шерера (Швейцария);

– отдельные результаты работы и созданное программное обеспечение послужили основой для чтения автором лекционного курса «Моделирование технологических процессов» в МГТУ им. Н. Э. Баумана; программы моделирования применялись для дипломного проектирования и в качестве метода проведения теоретических исследования при написании кандидатских диссертаций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В ПУБЛИКАЦИЯХ

1. Бочаров Ю. А., Власов А. В. Решение технологических задач обработки давлением с применением метода конечных элементов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 6. – С. 110-113.

2. Власов А. В. Исследование процессов доштамповки осесимметричных поковок методом конечных элементов // Известия вузов. Машиностроение. – 1988. – № 11. – С. 106-109.

3. Власов А. В. Использование метода конечных элементов для решения технологических задач осесимметричной штамповки // Автоматизированное проектирование прогрессивных процессовковки и объемной штамповки: Материалы научно-технич. семинара / ЛДНТП. – Л., 1989. – С. 67-72.

4. Власов А. В. Расчет формоизменения и энергосиловых параметров процессов объемной штамповки // Опыт и перспективы развития математического, программного и технического обеспечения САПР в прессостроении: Тезисы докладов науч.-технич. конф. – Воронеж, 1990. – С. 10-11.

5. Власов А. В. Численный анализ технологических процессов объемной штамповки // Математическое моделирование технологических процессов обработки давлением: Тезисы докладов всерос. науч.-технич. конф. – Пермь, 1990. – С. 75–76.

6. Власов А. В. Применение пошагового метода при решении нестационарных задач пластического течения // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1991. – № 2. – С. 13–18.

7. Власов А. В., Демин В. А., Калашников А. Е. Математическое моделирование формовки криволинейного гофра // Известия вузов. Машиностроение. – 1995. – № 4–6. – С. 16–20.

8. Выбор гипотетической модели штамповки гофрированных оболочек / А. Е. Калашников, В. А. Демин, А. В. Власов и др. // Технология, автоматизация и организация производства технических систем: Межвуз. сб. науч. трудов / МАСИ. – М., 1995. – С. 9–15.

9. Бочаров Ю. А., Власов А. В. Моделирование методом конечных элементов процессов осесимметричной объемной штамповки // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всерос. науч.-технич. конф. – М., 1995. – Т. 2. – С. 50–56.

10. Власов А. В., Кондратенко В. Г. Использование моделирования для выбора рациональной формы заготовки при обработке давлением // Оборудование и процессы обработки давлением: Материалы Всерос. науч.-технич. конф. – М., 1995. – Т. 2. – С. 57–62.

11. Власов А. В. К вопросу о моделировании пластического течения несжимаемых материалов // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1995. – № 4. – С. 97–102.

12. Власов А. В. Особенности моделирования процессов пластического формоизменения с использованием метода конечных элементов // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Сб. науч. трудов / ТулГУ. – Тула, 1996. – С. 30–36.

13. Власов А. В., Селиверстов Д. Г. Моделирование процессов горячего изостатического прессования с использованием жесткопластической модели поведения материала // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Сб. науч. трудов / ТулГУ. – Тула, 1996. – С. 49–56.

14. Бочаров Ю. А., Власов А. В. Моделирование процессов осесимметричной объемной штамповки // Вестник машиностроения. – 1996. – № 4. – С. 35–37.

15. Biba N. V., Lishnij A. I., Vlasov A. V. Finite element model of electrical upsetting // Proc. of the 1st ESAFORM Conf. on Material Forming. – Sophia Antipolis, 1998. – P. 113–116.

16. Biba N. V., Lishnij A. I., Vlasov A. V. Simulation of coupled problem of electric upsetting // Simulation of Materials Processing: Theory, Method and Applications: Proc. of NUMIFORM-98. – Rotterdam, 1998. – P. 523–527.

17. Власов А. В. К вопросу о моделировании процессов деформирования порошковых материалов // Исследования в области теории, технологии и оборудования обработки металлов давлением: Межвуз. сб. науч. трудов / ОрелГТУ–ТулГУ. – Орел–Тула, 1998. – С. 7–13.

18. Власов А. В., Селиверстов Д. Г. Функции влияния для условия пластичности порошковых материалов, обрабатываемых ГИП // Машиностроительные технологии: Сб. тезисов Всерос. науч.-технич. конф. – М., 1998. – С. 124–125.

19. Власов А. В., Селиверстов Д. Г. Определение функций пластичности порошковых материалов, применяемых при горячем изостатическом прессовании // Исследования в области теории, технологии и оборудования штамповочного производства: Сб. науч. трудов / ТулГУ. – Тула, 1998. – С. 46–49.

20. Biba N., Lishnij A., Vlasov A. Simulation of coupled problem of electric upsetting // Proc. of the 7th Int. Conf. of Metal Forming METAL FORMING-98. – Birmingham, 1998. – P. 184–187.

21. Власов А. В., Селиверстов Д. Г. Проектирование технологических процессов изготовления испаряемых мишеней // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1998. – № 2. – С. 95–99.

22. Власов А. В. Моделирование процессов прессования порошков в капсулах с учетом проскальзывания на границе сред // Вестник МГТУ. Машиностроение. – 1998. – № 3. – С. 87–92.

23. Власов А. В. Учет сжимаемости при формоизменении порошковых материалов // Кузнечно-штамповочное производство. – 1999. – № 2. – С. 12–15.

24. Власов А. В. Решение контактных задач взаимодействия тел итерационным способом // Вестник МГТУ. Машиностроение. 1999. – № 2. – С. 99–103.

25. Власов А. В. Определение зависимости коэффициента теплопроводности порошковой заготовки от ее плотности // Теория, технология, оборудование и автоматизация обработки металлов давлением и резанием: Сб. науч. трудов / ТулГУ. – Тула, 1999. – Вып. 2. – С. 80–85.

26. Власов А. В. Исследование теплопроводности порошковой заготовки // Ресурсосберегающие технологии, оборудование и автоматизация штамповочного производства: Тезисы докл. Междунар. конф. – Тула, 1999. – С. 100–101.

27. Biba N. V., Lishnij A. I., Vlasov A. V. Simulation of electric upsetting technology // Forging Industry in the Next Century: Proc. of the 22nd Forging Industry Technical Conference. – Lake Geneva, 1999. – P. 13:1–13:7.

28. Свидетельство о регистрации программы № 980579 РФ. Программа для ЭВМ QForm / Н. В. Биба, А. И. Лишний, А. В. Власов и др. (РФ) // Информационный бюллетень официальной регистрации РосПАТЕНТ. – 1998. – Вып. 3(25). – С. 88.