

1477295
Государственный комитет СССР по народному образованию

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

ХАНИН АЛЕКСАНДР ИВАНОВИЧ

УДК 539.374:621.7.043

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПРОЦЕССОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МЕМБРАН В УСЛОВИЯХ ГОРЯЧЕГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1988

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - д.т.н., проф. Малинин Н.Н.
Научный консультант - д.т.н., доцент Романов К.И.

Официальные оппоненты: д.т.н., проф. Григорьев А.С.
к.т.н., с.н.с. Цепин М.А.

Ведущее предприятие - указано в решении Совета

Защита диссертации состоится "13" *октября* 1988 г.
в *14³⁰* ч. на заседании специализированного Совета Д 053.15.08
при Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище
имени Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская
улица, д.5.

Ваше отчество и 2-х экземплярах, заверенные печатью, прось-
ба высылать по адресу:

С д...
имени Н.

Ав

СПЕЦИА

Типогр

M 47 72 95

ин

раз 100экз.

8.09.88г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года, принятых на XXII съезде КПСС, указывается, что для повышения эффективности общественного производства и перевода экономики на рельсы всесторонней интенсификации необходимо расширить в двенадцатой пятилетке в 1,5-2 раза применение прогрессивных базовых технологий, обеспечить широкое внедрение в народное хозяйство принципиально новых технологических процессов, позволяющих поднять эффективность использования ресурсов и снизить энерго- и материалоемкость продукции. К числу таких технологических процессов обработки металлов давлением относится горячее формоизменение листовых заготовок избыточным давлением газа - сверхпластическая формовка (СПФ). Этим способом можно получать изделия сложной формы за один-два перехода без промежуточных отжигов на более простых по сравнению с прессами установках при сравнительно дешевой оснастке и о минимальных потерях металла.

Для реализации возможностей СПФ, в частности, при изготовлении коробчатых изделий, весьма актуальна разработка расчетных методов, позволяющих оценить напряженно-деформированное состояние и повреждаемость во всех точках заготовки в процессе изготовления изделий, определить форму изделия и распределение толщины, проанализировать его прочность в процессе формоизменения и установить ресурс бездефектного деформирования, исследовать локализацию деформации и выбрать оптимальные режимы деформирования. Все это позволит без трудоемких лабораторных исследований указать лучшие термомеханические условия обработки, получить изделия лучшего качества с заранее заданными размерами, сократить период технологической подготовки изготовления деталей и, следовательно, ведет к экономии металла и уменьшению длительности цикла формоизменения.

Цель работы. Для промышленной реализации преимуществ СПФ требуются дальнейшие экспериментальные и теоретические исследования ползучести и повреждаемости неосесимметричных заготовок в условиях горячего формоизменения, создание численных и аналитических методов решения связанных задач ползучести и повреж-

I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1477295

Ханин А.И. Разработка мето

МВТУ
им. Н.Э. Баумана

С. — — — — —

даемости мембран с учетом сложных краевых условий, больших деформаций ползучести, эффектов упрочнения и трения между заготовкой и инструментом на основе уравнений состояния, полно отражающих реологические свойства сплавов, а также разработка вычислительных программ, пригодных для решения широкого класса задач деформирования листовых заготовок.

Основные задачи работы. Для достижения указанной цели в работе рассмотрены следующие основные задачи:

- 1) экспериментальное изучение свойств листовых сверхпластичных сплавов в условиях горячего формоизменения. Разработка методик определения параметров уравнений состояния по большим деформациям ползучести;
- 2) разработка варианта МКЭ, алгоритма расчета и вычислительных программ, позволяющих исследовать напряженно-деформированное состояние и повреждаемость неосесимметричных заготовок с учетом истории нагружения и реальных свойств сплавов;
- 3) создание приближенного аналитического метода расчета свободного деформирования прямоугольных и квадратных заготовок;
- 4) расчет процессов СПФ мембран и выработка рекомендаций по выбору оптимальных параметров пневмоформовки коробчатых изделий из сверхпластичных материалов;
- 5) экспериментальное исследование горячего деформирования и разрушения листовых заготовок в процессах СПФ, необходимое для проверки достоверности теоретических расчетов и рекомендаций.

Научная новизна. Впервые выполнено комплексное исследование механики горячего деформирования неосесимметричных мембран в процессах СПФ. Для расчета параметров СПФ неосесимметричных мембран (листовых заготовок) применены уравнения состояния реономных сред, включающие в себя структурный параметр повреждаемости, что позволяет получить наиболее полную информацию о напряженно-деформированном состоянии заготовки, определить области, близкие к разрушению, и оценить степень исчерпания пластичности материала. Получены новые опытные данные о свойствах перспективных сверхпластичных сплавов при повышенных температурах и разработаны методики определения параметров уравнений состояния, необходимых для решения технологических задач СПФ, по большим деформациям.

Разработана методика расчета параметров СПФ тонкостенных

коробчатых изделий из мембран сложной формы в плане с учетом повреждаемости и упрочнения материала. Получены основные соотношения разработанного варианта МКЭ в форме метода перемещений. Предложены и реализованы в виде программ для ЭВМ методы и алгоритмы решения связанных задач ползучести и повреждаемости неосесимметричных мембран. Выполнена оценка точности и сходимости разработанного численного метода. Предложен эффективный приближенный аналитический метод расчета свободного деформирования прямоугольных и квадратных мембран в процессах СПФ.

Решением задач горячего формоизменения мембран МКЭ подтверждена возможность использования уравнений энергетической теории ползучести и длительной прочности.

Достоверность результатов подтверждена экспериментальной проверкой справедливости используемых уравнений состояния, численными экспериментами по оценке точности и сходимости предложенного алгоритма, сопоставлением с теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов и сравнением с данными эксперимента.

Практическая ценность. В диссертации созданы методы определения параметров уравнений состояния сплавов при повышенных температурах по большим деформациям и определены параметры ползучести и повреждаемости некоторых перспективных сверхпластичных сплавов, необходимые для решения задач СПФ.

Разработанные методики применены для исследования ползучести и разрушения квадратных, прямоугольных и эллиптических мембран, а также СПФ тонкостенных коробчатых изделий в форме прямоугольного параллелепипеда. В результате получены новые данные о ресурсе пластичности мембран и расположении областей локализации деформаций, степени исчерпания несущей способности мембраны, ее форме и толщине в различных сечениях в определенные моменты времени, что является важным для практического использования процесса СПФ листовых заготовок. Расчетным путем установлены практически важные закономерности ползучести и повреждаемости тонкостенных заготовок, необходимые для разработки и совершенствования технологии СПФ и являющиеся основой для создания приближенных методов расчета. Получены практически важные графики изменения рабочего давления во времени, позволяющие сократить технологический цикл производства коробчатых изделий и, следовательно, повысить производительность труда и

снизить себестоимость производства деталей.

Создан комплекс программ на алгоритмическом языке ПЛ/I, реализующих расчеты технологических параметров СМД коробчатых изделий согласно разработанным методикам.

Полученные результаты рекомендуются для обоснованного выбора оптимальных параметров пневмоформовки коробчатых тонкостенных изделий из сверхпластичных материалов. Разработанные в диссертации методики внедрены в расчетную практику предприятия.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на научно-технической конференции Совета молодых ученых и специалистов конструкторско-механического факультета МВТУ им. Н.Э.Баумана (декабрь, 1985 г.), на Всесоюзном семинаре "Технологические задачи ползучести и сверхпластичности" (Новосибирск, 1983 г.), на научных семинарах "Пластичность" кафедры "Сопротивление материалов и динамика и прочность машин" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1983, 1984, 1985, 1986, 1988 гг.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано пять печатных работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 328 страницах, включая 106 рисунков и 10 таблиц. Библиография насчитывает 112 наименований. Приложения занимают 62 страницы.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется цель работы и ее практическая ценность.

В первом разделе дается характеристика технологического процесса СМД, приведены основные схемы формоизменения, отмечены отличительные особенности, преимущества и недостатки процесса в сравнении с обычными способами деформирования листовых заготовок, а также требования, предъявляемые к изделиям.

Проанализированы существующие методы исследования напряженно-деформированного состояния и разрушения неупругих несимметричных мембран при больших деформациях.

В работах Н.Н.Малинина, К.И.Романова, И.П.Ренне, Д.Холта, и других разработаны методы расчета длинных прямоугольных мем-

бран, нагруженных равномерным давлением. Рассмотрены как процессы свободного деформирования, так и получения длинных тонкостенных профилей различных поперечных сечений.

Некоторые приближенные одномерные решения более сложных задач получены на основе упрощающих гипотез о форме поверхности мембраны (или ее различных частей) и предположении об однородности напряженно-деформированного состояния и т.п. в работах А.Г.Пашкевича, В.С.Горбунова, Б.В.Могильникова, И.П.Ренне, Ф.Джоване, Р.Джонсона, Дж.Корнфилда и других исследователей, в которых рассматривались процессы деформирования круглых, квадратных и прямоугольных мембран на стадии свободного формоизменения и в матрицах. Указанные решения осуществлялись с большим числом упрощающих предположений, не позволяющих учесть с необходимой полнотой напряженно-деформированное состояние мембраны в процессе формоизменения.

Решение двумерных задач, и тем более трехмерных, СПФ мембран без использования упрощающих гипотез можно получить только численно с помощью МКР и МКЭ или экспериментальными методами.

СПФ осесимметричных заготовок посвящены многочисленные исследования. Большой вклад в развитие теории конечных деформаций безмоментных оболочек вращения за пределами упругости сделан А.С.Григорьевым и его учениками. А.С.Григорьевым сформулированы исходные положения, получена полная система уравнений, описывающих равновесие оболочки в деформированном состоянии, и проведено всестороннее исследование оболочек с произвольной формой меридиана при различных вариантах основного закона деформирования. Расчет напряженно-деформированного состояния при СПФ осесимметричных мембран является основой для определения параметров процесса деформирования и геометрии получаемых изделий.

Наиболее универсальным и перспективным численным методом механики сплошных сред для расчета технологических параметров процессов СПФ неосесимметричных мембран является МКЭ, использование которого особенно эффективно из-за возможности учета в единой вычислительной программе истинных реологических свойств материалов, истории нагружения заготовок сложной формы в процессе больших деформаций ползучести и изменяющихся в течение обработки граничных условий. В работах О.Зенкевича и Е.Онејта, Дж.Аргириса и Дж.Долтисниса, Н.Н.Малинина и К.И.Романова и других продемонстрированы возможности МКЭ при исследовании различных

процессов горячего формоизменения тонколистовых заготовок.

Из анализа литературы следует, что процессы горячего деформирования неосесимметричных мембран изучены недостаточно. Работы, посвященные расчету больших деформаций мембран сложной формы в условиях СПФ, практически отсутствуют. В основу большинства известных методик расчета были положены различные уравнения состояния, не включающие параметра повреждаемости. Однако, в работах Э.С.Лазаренко, Н.Н.Малинина, К.И.Романова, выполненных на основе исследований Ю.Н.Работнова, С.А.Щестерикова, А.М.Локощенко, О.В.Соснина и других показано, что в условиях горячего формоизменения заготовок процессы ползучести и накопления повреждений развиваются совместно. Поэтому большое значение имеет дальнейшее экспериментальное изучение ползучести и повреждаемости листовых сплавов, являющееся основой для выбора уравнения состояния среды в технологических задачах СПФ. Наиболее полная расчетная информация о напряженно-деформированном состоянии может быть получена в результате применения численных методов, в особенности МКЭ, который и принят в диссертации.

Далее сформулированы задачи, решаемые в последующих разделах диссертации.

Второй раздел посвящен анализу результатов экспериментального исследования кратковременной ползучести листовых сверхпластичных сплавов. Описаны методика и средства проведения эксперимента, а также методики обработки опытных данных. На примере применяемых в промышленности титанового сплава ВТ6 (860 - 940°C), латуни ЛЖМц59-I-I (530°C) и Д63 (630°C) (последняя в двух видах: обычная и полированная) и опытного алюминиевого сплава системы **Al-Ca-Si** (330°C) показано, что в зависимости от свойств и условий горячего формоизменения листовые сверхпластичные материалы могут деформироваться как без упрочнения, так и с упрочнением. Процессы ползучести и повреждаемости подобных материалов, как правило, описываются уравнениями состояния по энергетической теории ползучести и длительной прочности, в которых структурный параметр повреждаемости характеризуется величиной рассеянной при ползучести удельной энергии A_*

$$\dot{\epsilon} = K \sigma^n (1 - \omega)^m \epsilon^{-\alpha}, \quad \dot{\omega} = \sigma \dot{\epsilon} / A_*, \quad (I)$$

где $K, n, m, \alpha, A = \sigma_0 \epsilon_*$ - характеристики материала при определенной температуре, $\dot{\epsilon}$ - скорость деформации ползучести, σ - действительное напряжение, ω - параметр повреждаемости (в начальный момент времени $\omega = 0$, в момент разрушения $\omega = 1$), $\bar{\epsilon}$ - логарифмическая деформация, σ_0 - начальное (условное) напряжение, ϵ_* - относительное удлинение при разрыве; если материал не упрочняется, то $\alpha = 0$.

Для уменьшения разброса свойств ползучести образцы изготавливались из одного листа. С целью достоверного определения характеристик ползучести плоские образцы вырезались из того же листа, что и заготовки для исследования процессов СПФ. Для каждого материала испытания выполнены не менее, чем при пяти уровнях σ_0 ; при определенном значении σ_0 опыты проводились не менее чем на трех образцах.

Проанализированы особенности деформирования в условиях горячего формоизменения и экспериментально получены кривые ползучести и значения времени вязко-хрупкого разрушения указанных сплавов. Разработаны новые методики расчета параметров уравнений состояния (I) по большим деформациям ползучести, позволившие определить механические характеристики исследуемых сплавов при повышенных температурах и описать их поведение в рабочем диапазоне изменения напряжений без усложнения уравнений состояния.

Чтобы оценить точность найденных коэффициентов, были сопоставлены между собой экспериментальные и теоретические кривые ползучести, а также значения времени вязко-хрупкого разрушения. Согласование оказалось достаточно хорошим, причем все расчетные кривые ползучести находятся в соответствующих доверительных интервалах.

Для проверки изотропности материалов при ползучести испытывались образцы, вырезанные вдоль и поперек направления прокатки листа. Кривые ползучести латуни ЛЖМц59-I-I и Л63, полученные при одинаковых σ_0 на образцах различных направлений, практически укладываются в полосу разброса опытных данных образцов одного направления. Не было обнаружено существенных различий в значениях времени разрушения в зависимости от ориентации образцов. Это позволяет сделать вывод о незначительной анизотропии ползучести листовых сверхпластичных материалов в условиях горячего формоизменения и для решения задач СПФ принять

предположение об изотропности материала.

Рассмотренные в условиях одноосного растяжения кинетические уравнения ползучести и повреждаемости (I) обобщались на случай сложного напряженного состояния путем замены скорости деформации и напряжения на эквивалентные: скорость деформации $\dot{\epsilon}_e$ и напряжение σ_e , а также $\dot{\epsilon}$ на параметр Удквиста $\eta_e = \int \dot{\epsilon}_e dt$. В качестве оптимальных скоростных условий деформирования заготовок при сложном напряженном состоянии использовался допустимый интервал изменения $\dot{\epsilon}_e$.

В третьем разделе диссертации разработана методика расчета параметров СПФ тонкостенных коробчатых изделий из заготовок сложной формы в плане. Проанализированы особенности, возникающие при исследовании деформирования мембран МКЭ, и рассмотрены методы преодоления трудностей, связанных с решением указанных задач. Рассмотрена постановка задачи и гипотезы, положенные в основу решения. Разработан вариант МКЭ в форме метода перемещений, а также алгоритм решения задачи на ЭВМ.

В работе рассматриваются процессы горячего изотермического деформирования листовых заготовок (мембран), закрепленных по внешнему контуру и нагруженных односторонним давлением P , которое может изменяться во времени по некоторому закону. Форма мембраны в плане может быть достаточно сложной. Материал мембраны считается однородным, изотропным и несжимаемым. Для описания свойств ползучести и повреждаемости исследуемых сверхпластичных сплавов приняты уравнения состояния (I).

В связи с тем, что процессы СПФ протекают относительно медленно, инерционные силы в уравнениях движения не учитываются. Считается, что при анализе вязких течений упругие деформации малы в сравнении с деформациями ползучести и последние принимаются за полные. Толщина листовой заготовки много меньше других размеров в плане, поэтому в процессе деформирования зона краевого эффекта мала по сравнению с основными размерами заготовки и жесткость последней при изгибе считается равной нулю. Напряжения и деформации осредняются по толщине и относятся к срединной поверхности. Напряженное состояние считается плоским. Никаких ограничений на величину деформаций, а также на форму поверхности, по которой деформируется мембрана, и на закон изменения толщины в различных направлениях не накладывается.

Из-за значительных перемещений частиц заготовки в процессе

обработки подобные задачи характеризуются геометрической нелинейностью, причем форма мембраны в значительной мере зависит от деформации. Поэтому необходимо учитывать различия между исходными и текущими координатами частиц. Для этого применяется процедура метода шагов по времени, на каждом из которых сравниваются между собой две близкие конфигурации заготовки. Движение мембраны рассматривается в окрестности ее текущего положения, которое является начальным для последующего деформирования. Задача решается в скоростях, поскольку в условиях горячего формоизменения важны не столько сами конечные деформации, сколько знание истории изменения скоростей деформации во времени. При таком подходе к решению задачи различия между методами описания течения среды Лагранжа и Эйлера пропадают.

Принимается, что инструмент — абсолютно жесткое тело. Это допущение позволяет наиболее просто сформулировать граничные условия задачи.

Начальные условия задаются следующим образом. В момент времени $t = 0$ известны координаты каждой частицы заготовки, поврежденность ω в каждой частице принимается равной нулю. Анализ процесса деформирования заканчивается, когда в какой-либо частице заготовки $\omega = 1$, то есть заканчивается период скрытого разрушения. Распространение фронта разрушения не рассматривается, так как сразу после возникновения зоны разрушения происходит разрыв и выход из строя заготовки.

При численных расчетах с приближением момента разрушения процессы изменения скоростей деформации протекают очень быстро, поэтому точно удовлетворить условию разрушения затруднительно. В диссертации это затруднение преодолевалось путем снижения верхнего предела допустимых значений поврежденности, например, до $\omega_* = 0,99$.

Согласно МКЭ мембрана разбивается на отдельные конечные элементы (КЭ). С целью упрощения решения задачи целесообразно использовать плоские КЭ. Поскольку со сгущением сетки КЭ увеличивается точность аппроксимации поверхности мембраны геометрией вписанного многогранника, то решение должно сходиться и, как показывают расчеты, такая сходимость действительно наблюдается. Возможность применения плоских КЭ обоснована известными энергетическими оценками потребности, а теоретические выводы в литературе подтверждены численными экспериментами. Разбиение мем-

брани на КЭ считается постоянным в течение деформирования.

Вводятся две прямоугольные декартовы системы координат: XYZ - глобальная и $x_0 y_0 z_0$ - локальная (для каждого КЭ своя).

Интерполяционные функции скоростей перемещений в КЭ принимаются в виде линейных функций в локальной системе координат.

Для изучения истории нагружения время процесса деформирования разбивается на ряд малых шагов и принимается, что в пределах каждого шага справедливы зависимости Стокса для скоростей перемещений и деформаций. Тогда вектор скорости деформации $\{\dot{\epsilon}\}$ в любой точке КЭ

$$\{\dot{\epsilon}\} = [B]\{\dot{\delta}\}, \quad (2)$$

где $[B]$ - матрица, определяемая аппроксимацией скоростей перемещений по КЭ, $\{\dot{\delta}\}$ - вектор неизвестных скоростей перемещений в КЭ.

Разрешая определяющие уравнения в форме Сен-Венана-Леви-Мизеса относительно напряжений, получается определяющее соотношение метода перемещений

$$\{\sigma\} = \frac{G_e}{I_e} [D]\{\epsilon\}, \quad (3)$$

где $\{\sigma\}$ - вектор действительных напряжений, $[D]$ - квадратная матрица, зависящая только от коэффициента поперечной деформации ν , при $\nu = 0,5$.

Матрица жесткости (МЖ) каждого КЭ в локальной системе координат определяется из принципа возможных перемещений. В качестве возможных перемещений принимаются величины, пропорциональные возможным скоростям узловых перемещений $\delta\{\delta\}$. Допустим, что на КЭ действуют внешние силы, приложенные к его узлам. Тогда в пределах шага по времени получается

$$\int_V \delta\{\epsilon\}^T \{\sigma\} dV = \delta\{\delta\}^T \{f\}, \quad (4)$$

где $\{f\}$ - вектор узловых усилий в локальной системе координат, S и V_0 - площадь и объем КЭ.

Уравнение (4), с учетом соотношений (2) и (3) преобразуется к виду

$$[k_e]\{\delta\} = \{f\}, \quad (5)$$

где $[k_e] = \frac{G_e}{I_e} [B]^T [D] [B] I_e$ - МЖ КЭ в локальных координатах,

h - толщина КЭ.

Для составления ансамбля элементов и записи соответствующих уравнений равновесия выполняется преобразование к глобальным координатам с помощью матрицы $[L]$

$$[k_e]\{\Delta\} = \{F\}, \quad (6)$$

где $[k_e] = [L]^T[k_L][L]$ - МЭ КЭ в глобальных координатах, $\{\Delta\}$ и $\{F\}$ - векторы скоростей перемещений и узловых усилий КЭ в глобальной системе координат.

После вычисления МЭ всех элементов в глобальных координатах применяется принцип возможных перемещений ко всей заготовке. Тогда получается основное матричное уравнение МКЭ

$$[K]\{V\} = \{R\}, \quad (7)$$

где $\{V\}$ и $\{R\}$ - векторы узловых перемещений и узловых усилий сетки КЭ, $[K]$ - МЭ всей мембраны.

Давление заменяется приложенными в узлах сосредоточенными силами, которые определяются из условия статического равновесия с учетом изменения размеров и положения КЭ. Эти силы входят в вектор $\{R\}$.

В уравнении (7) МЭ $[K]$ зависит от достигнутого уровня скоростей узловых перемещений и повреждаемости каждого КЭ. Указанное обстоятельство значительно усложняет задачу из-за необходимости решать на каждом шаге по времени систему нелинейных алгебраических уравнений со многими неизвестными. Для решения этой системы применен метод переменных параметров упругости, сводящий нелинейную задачу к последовательности линейных. В конце каждой итерации i сходимость найденного приближенного решения к действительному устанавливается численно путем проверки выполнения критерия сходимости

$$\|V\|_2 - \|V\|_{2,i-1} / \|V\|_2 < \varepsilon_V, \quad (8)$$

где $\|V\|_2 = [\|V\|_2^2]^{\frac{1}{2}}$ - Евклидова норма вектора, ε_V - точность итерационного метода.

Для улучшения сходимости итерационного метода использовался процесс Эйткена.

По найденным с учетом граничных условий задачи скоростям узловых перемещений сетки КЭ $\{V\}$ в глобальной системе координат

нат формируются векторы $\{\dot{\Delta}\}$. Для определения напряжений осуществляется переход к локальным координатам. Затем по соотношениям (2) и (3) вычисляются скорости деформаций и компоненты напряжений во множестве точек деформируемой мембраны.

Применение описанного итерационного метода позволяет удовлетворить с заданной точностью уравнения равновесия в любой момент времени, включая $t = 0$.

Предлагаемый вариант МКЭ не применим для анализа начального этапа деформирования мембраны. В связи с этим при решении задач "для выхода из нуля" необходимо первоначальную форму мембраны аппроксимировать одним из возможных способов. Наиболее просто начальная форма задается приближенно так, чтобы удовлетворялись граничные условия. Расчеты СМЭ квадратной мембраны показывают, что уже через 4с после начала деформирования решения, получаемые с различными первоначальными формами мембраны, не отличаются.

Описание движения материала заготовки, т.е. положения, занимаемые последовательно частицами, получается интегрированием поля скоростей во времени. Интегрирование уравнения (7) по времени выполнялось методом, аналогичным методу Эйлера с итерациями. В конце интервала времени Δt_n координаты узлов сетки КЭ изменяются, вычисляется повреждаемость и расчет продолжается далее. На следующем шаге по времени повреждаемость принимается равной значению, накопленному на предыдущих шагах с учетом истории нагружения. Уравнение повреждаемости интегрируется численно методом Эйлера при значениях напряжений, соответствующих предыдущему шагу нагружения. Толщина КЭ на каждом шаге по времени определяется из условия несжимаемости.

При расчете процессов СМЭ коробчатых изделий на стадии оформления граней помимо условий устойчивости, точности и сходимости численного решения на Δt_n накладывается дополнительное ограничение конфигурацией границ матрицы.

СМЭ мембраны внутри матрицы анализировали для двух предельных кинематических граничных условий: при идеальном (без трения) скольжении частиц мембраны относительно матрицы и при прилипании частиц мембраны к матрице.

Проверка достоверности получаемых результатов и корректности постановки задачи производилась путем оценки точности и сходимости алгоритма численного счета и сравнением решений,

получаемых по разработанной методике, с аналитическими и численными результатами других авторов и сопоставлением с экспериментальными данными. С помощью численного эксперимента установлено, что разработанный алгоритм обладает монотонной сходимостью при увеличении числа КЭ, уменьшении шага по времени и возрастании точности определения поля скоростей перемещений. Результаты расчета квадратной мембраны практически не отличались, если наибольшая высота мембраны $Z_{\text{пр}}$ в возмущенном состоянии не превышала $3h_0$. Решение тестовой задачи (деформирования длинной узкой прямоугольной мембраны) аналитическим и численным методами показало незначительное накопление погрешностей численного счета в условиях больших перемещений и существенного изменения формы поверхности деформируемой мембраны. Различие соответствующих времен до разрушения t_d составляет менее 6%, перемещений центра мембраны в момент разрушения W_{max}^* - менее 2%. При этом на всем протяжении процесса деформирования форма поперечных сечений мембраны достаточно хорошо аппроксимируется КЭ.

Используя созданный программный комплекс MEMBFE на алгоритмическом языке ПЛ/I, исследованы большие деформации квадратных, прямоугольных и эллиптических мембран как в условиях свободного формоизменения, так и внутри матрицы.

Определена степень исчерпания несущей способности мембран, форма и толщина в различных сечениях в разные моменты времени, что является важным для практического использования СПР. Выявлено распределение повреждаемости в течение всего периода формоизменения и показано, что особенно интенсивное накопление повреждений при свободной формовке происходит в заключительный период деформирования. Установлены общие закономерности свободного деформирования мембран. Рассчитаны законы оптимального нагружения мембран давлением $p(t)$, знание которых позволяет вести процессы деформирования в лучших термомеханических условиях. Определены области локализации деформаций в зависимости от размеров мембран и величины формирующего давления.

В четвертом разделе разработаны методики приближенного решения задач горячего деформирования прямоугольных и квадратных мембран, основанные на гипотезах о форме поверхности заготовок в характерных сечениях и о траекториях движения

частиц в окрестностях полюса. Сопоставление полученных результатов с решениями МКЭ и экспериментальными данными позволило проверить справедливость допущений и указать пределы применимости приближенных решений.

В пятом разделе изложены некоторые результаты экспериментального исследования горячего деформирования мембран в квадратной (60 x 60 мм) и прямоугольной (72 x 50 мм) матрицах. Рассмотрены методика и средства проведения эксперимента. Экспериментальная работа включает 4 основных направления: 1) обоснование принимаемых гипотез; 2) свободное деформирование внутри матриц до разрушения; 3) формовка тонкостенных коробок; 4) подтверждение рекомендаций. Основное внимание сосредотачивалось на изучении распределения толщины в характерных сечениях деформируемой заготовки в процессе формоизменения и определении формы поверхности заготовки. С целью проверки соответствия принятой расчетной схемы реальным процессам СИФ время до разрушения при свободной формовке и время изготовления коробок, а также форма и толщина заготовок в отдельные моменты формоизменения, найденные расчетным путем, сравнивались с полученными экспериментально. Совпадение результатов оказалось хорошим.

В приложениях приведены описания программ на языке ПЛ/I, реализованных на ЭВМ ЕС-1033 и предназначенных для: 1) обработки кривых ползучести по большим деформациям и определения параметров уравнений состояния; 2) расчета МКЭ процессов СИФ мембран сложной формы в плане; 3) расчета деформирования прямоугольных и квадратных мембран по приближенным методикам.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

I. Впервые выполнено комплексное исследование механики горячего деформирования неосесимметричных мембран в процессах СИФ от выбора уравнения состояния материала и решения МКЭ связанной задачи ползучести и повреждаемости частиц заготовки в условиях неустановившегося вязкого течения до определения практически важных режимов оптимального деформирования. Применение уравнений состояния реономных тел, включающих структурный параметр повреждаемости, позволило получить наиболее полную информацию о напряженно-деформированном состоянии от-

дальних частиц заготовки в различные моменты формоизменения, определить области, близкие к разрушению, и оценить степень истощения пластичности материала.

2. Получены новые опытные данные о ползучести и повреждаемости перспективных промышленных листовых сверхпластичных сплавов при больших деформациях, относительно малых длительностях деформирования и вязко-хрупком разрушении.

3. Разработаны методики определения параметров уравнений состояния по большим деформациям ползучести и определены указанные коэффициенты для исследуемых сверхпластичных сплавов.

4. Установлено, что в условиях горячего формоизменения анизотропия ползучести сверхпластичных материалов либо отсутствует, либо проявляется незначительно и при решении технологических задач СПФ материал можно считать изотропным.

5. Поставлены и решены связанные задачи ползучести и повреждаемости неосесимметричных мембран и листовых заготовок в процессах СПФ при больших деформациях, для чего использован один из наиболее перспективных численных методов решения задач механики сплошных сред - МКЭ.

6. Разработан вариант МКЭ в форме метода перемещений, позволяющий исследовать напряженно-деформированное состояние и повреждаемость неосесимметричных листовых заготовок с учетом истории нагружения и реальных свойств сверхпластичных сплавов.

7. Точность и сходимость предложенного алгоритма расчета подтверждается численными экспериментами, сопоставлением с теоретическими и экспериментальными исследованиями других авторов и сравнением с данными эксперимента.

8. Возможности разработанного варианта МКЭ и алгоритма расчета на ЭЭМ продемонстрированы на примере исследования процессов ползучести и разрушения квадратных, прямоугольных и эллиптических мембран, а также формовки тонкостенных коробчатых изделий. Теоретически установлены практически важные общие закономерности деформирования листовых заготовок, необходимые для разработки и совершенствования технологии СПФ и являющиеся основой для создания приближенных методов расчета. Получены графики изменения рабочего давления во времени, позволяющие сократить технологический цикл производства коробчатых изделий и повысить производительность труда.

9. Создан комплекс вычислительных программ, открывающих

путь внедрения ЭКМ в практику расчетов технологических параметров СПЗ коробчатых изделий.

Ю. Получено приближенное решение задач свободного деформирования прямоугольных и квадратных мембран в условиях горячего формоизменения, произведена оценка точности этого решения путем сравнения с экспериментальными данными и решением МКЭ, указаны пределы применимости.

II. Проведена широкая программа лабораторных экспериментальных исследований ползучести и разрушения мембран в процессах горячего формоизменения и СПЗ тонкостенных коробчатых изделий. Анализ экспериментальных данных позволил подтвердить допущения, принятые в расчетах, достоверность теоретических исследований и рекомендаций.

Содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Ханин А.И. Горячее деформирование прямоугольных мембран // ИВУЗ. Машиностроение. - 1984. - № 9. - С. 153.
2. Малинин Н.Н., Романов К.И., Ханин А.И. Исследование горячего деформирования мембран методом конечных элементов // ИВУЗ. Машиностроение. - 1984. - № 9. - С. 112-117.
3. Малинин Н.Н., Романов К.И., Ханин А.И. Теоретическое исследование газостатической формовки полых тонкостенных изделий // Расчеты на прочность. - 1985. - Вып. 26. - С. 123-134.
4. Ханин А.И. Ползучесть и разрушение мембран в условиях горячего формоизменения // ИВУЗ. Машиностроение. - 1986. - № 6. - С. 160.
5. Ханин А.И. Кратковременная ползучесть сверхпластичных сплавов. Латуны Л63 // ИВУЗ. Машиностроение. - 1987. - № 8. - С. 12-16.

Ханин