1572642

На правах рукописи

АМИНОВ Олег Викторович

УДК 539.376

РАЗРАБОТКА УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ И МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ПРИКЛАДНЫХ ЗАДАЧ ТЕОРИИ ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ БОЛЬШИХ ДЕФОРМАЦИЯХ

01.02.04 - механика деформируемого твердого тела

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва - 2001

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

Научный руководитель -	доктор технических наук, профессор РОМАНОВ К.И.
Официальные оппоненты -	доктор технических наук, профессор ЗАРУБИН В.С., кандидат технических наук, заведующий лабораторией ИЦП МАЭ ТАШКИНОВ А.В.
Ведущее предприятие -	Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН

Защита диссертации состоится "17" мая 2001 г. в 14³⁰ ч. на заседании диссертационного совета Д 212.141.03 при ... университете им. Н.Э. Баумана по ... д.5.

... заверенные печатью, просьба ...

...отеке МГТУ им.Н.Э.Баумана.

...реля 2001 г.

В.И.ДРОНГ

57 - 47

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1572647
Аминов О.В. Разработка ура

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время в области обработки металлов давлением (ОМД) повышенное внимание уделяется технологиям сверхпластического деформирования, находящим применение в аэрокосмической промышленности, транспортном машиностроении, строительстве. Для производства качественной конкурентноспособной продукции необходимы исследования направленные на выявление таких режимов формоизменения металла, при которых реализуется максимум его деформационной способности, то есть режимов, при которых скорость накопления металлом повреждений минимальна. Одним из факторов, влияющих на показатели пластичности металла в процессах горячего формоизменения, является скорость деформации. Известно, что при одноосном растяжении отличие в предельных относительных удлинениях испытанных образцов в зависимости от скорости их растяжения может достигать сотен процентов. Кроме того, в исследованиях Н.Н. Малинина, К.И. Романова и Э.С. Лазаренко экспериментально установлено, что предельные удлинения образцов сплава ВТ-14 при повышенных температурах в режимах их растяжения постоянной во времени силой (силовое нагружение) и с постоянной скоростью относительного перемещения захватов (кинематическое нагружение) различаются на несколько сотен процентов, что также может быть объяснено различными законами изменения скорости деформации в этих процессах. При первом режиме испытаний скорость деформации монотонно возрастает от некоторого начального значения, стремясь к бесконечности в момент разрушения, во втором - монотонно убывает. Режим растяжения с постоянной скоростью относительного перемещения захватов испытательной машины более благоприятен для достижения максимальных удлинений. В связи с чем можно предположить, что в условиях горячего формоизменения скорость накопления материалом повреждений является функцией текущего значения скорости деформации.

Использование указанного явления при разработке технологических процессов горячего формоизменения способно значительно повысить качество получаемых изделий. Анализ полей напряжений и деформаций в объеме заготовки и принятие на его основе инженерных решений, оптимизация режимов деформирования в ОМД осуществляются на основе решений соответствующих задач механики деформируемого твердого тела (МДТТ). Главная роль в обеспечении адекватности моделей МДТТ поведению реальных тел принадлежит уравнениям состояния. Для того, чтобы учесть вязкие свойства, проявляемые металлами при повышенных температурах, решение задач следует осуществлять на основе уравнений состояния теории ползучести. Однако, среди существующих вариантов кинетических уравнений ползучести и повреждаемости не удалось обнаружить такие, которые позволили бы описать указанные выше экспериментально установленные закономерности. Кроме того, отметим, что

1572647

МГТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

большинство экспериментальных исследований влияния скорости деформации на ресурс пластичности выполнено при постоянной скорости относительного перемещения захватов испытательной машины. Скорость деформации при этом, как отмечалось выше, переменна, что затрудняет использование известных опытных данных для определения функциональной зависимости предельной пластичности материала от скорости деформации.

Таким образом, актуальна задача экспериментального исследования с точки зрения МДТТ влияния скорости деформации на ресурс пластичности материала и разработки на основе полученных объективных экспериментальных данных уравнения состояния теории ползучести и повреждаемости, позволяющего учесть рассматриваемые закономерности при решении краевых задач механики. Использование разработанного уравнения позволит расчетным путем подобрать такие параметры технологических процессов горячего формоизменения, при которых можно ожидать максимум деформационной способности материала заготовки, а также достоверно оценить степень его поврежденности.

Цель работы - экспериментальное исследование влияния скорости деформации на ресурс деформационной способности материала в условиях горячего формоизменения, разработка на основе полученных экспериментальных данных уравнения состояния теории ползучести, учитывающего установленные закономерности, и решение с использованием разработанного уравнения состояния прикладных задач механики деформируемого твердого тела.

Научная новизна. Впервые экспериментально исследовано влияние скорости деформации на ресурс деформационной способности алюминиевого сплава 01570 при растяжении образцов постоянной во времени силой и с постоянной скоростью относительного перемещения захватов при оптимальной для достижения наибольших удлинений температуре - 500^0С. Разработана и создана новая схема и конструкция испытательного стенда, названного двухкулачковым пластометром, позволяющая проводить испытания на одноосное растяжение образцов материала при постоянной скорости логарифмической деформации до относительных удлинений 1000 %. Выполнена теоретическая и экспериментальная оценка точности задания требуемого закона деформирования образца при использовании двухкулачкового пластометра. Проведены испытания на растяжение образцов сплава 01570 при постоянной скорости деформации вплоть до разрушения в диапазоне скоростей деформации $5 \cdot 10^{-4} \div 1.8 \cdot 10^{-1}$ c^{-1}, то есть экспериментально получена кривая предельной пластичности сплава 01570 при температуре 500^0С. Разработан новый вариант кинетических уравнений ползучести и повреждаемости, учитывающий влияние скорости деформации на ресурс пластичности материала, и методика определения входящих в него констант. На основе разработанного варианта уравнения состояния выполнено описание режимов одноосного растяжения образцов и получены новые решения краевых задач механики горячего формоизменения.

Проведено исследование влияния скорости деформации на ресурс деформационной способности сплава 01570 в случае неодноосного напряженного состояния. Результаты эксперимента сопоставлены с результатами теоретического исследования методом конечных элементов.

Достоверность результатов подтверждается непротиворечивостью их основным положениям механики сплошной среды, решением тестовых задач, а также удовлетворительным согласованием экспериментальных и теоретически полученных значений.

Практическая ценность работы состоит в разработке на основе предложенного варианта уравнения состояния теории ползучести расчетных методик, отражающих влияние скорости деформации на ресурс деформационной способности материала в технологических процессах горячего формоизменения, в частности, при пневмоформовке длинных прямоугольных панелей, что позволяет рационально выбирать параметры этих процессов (например, давления пневмоформовки, скорости деформации) для достижения максимальных вытяжек материала заготовки или минимума накопленных материалом повреждений при заданной степени вытяжки, а также достоверно оценивать поврежденность материала получаемых изделий.

Внедрение. Созданный при выполнении диссертации испытательный стенд (двухкулачковый пластометр) используется при проведении лабораторных работ по курсу «Прикладные задачи теории упругости и пластичности» на кафедре «Прикладная механика» МГТУ им.Н.Э.Баумана.

Апробация работы. В ходе выполнения диссертационной работы результаты исследований докладывались на Международном научно-техническом симпозиуме "Моделирование и критерии подобия в процессах развитого пластического формоизменения" (Орел, 1996 г.), на 4-й Всероссийской научно-технической конференции "Состояние и проблемы технических измерений" (Москва, 1997 г.), на трех научно-технических конференциях аспирантов и молодых ученых кафедры прикладной механики МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1997, 1998, 1999 годах и на научном семинаре "Пластичность" в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2000 году, на научном семинаре в Институте машиноведения им. А.А.Благонравова РАН в 2001г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, содержащего основные результаты и выводы по работе, списка литературы. Работа изложена на 210 страницах, включая 73 рисунка и 8 таблиц. Библиография насчитывает 105 названий.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначены подходы к исследованию процессов горячего формоизменения металлов, где отмечено широкое использование для этих целей аппарата МДТТ, и, в частности, теории ползучести. Показано, что существующие варианты уравнения состояния теории ползучести и

повреждаемости не могут описать известные экспериментальные данные о влиянии скорости деформации на ресурс пластичности материала. Однако различие в предельных относительных удлинениях образцов материала (до нескольких сотен процентов) в зависимости от скорости их растяжения делает актуальной задачу исследования указанного явления и использования полученных результатов (в виде экспериментальных данных, уравнений состояния, решений краевых задач и расчетных методик технологических процессов) при разработке технологий горячего формоизменения металлов. Для этого необходимы испытания образцов материала при постоянной скорости логарифмической деформации (пластометрическое нагружение), что, в свою очередь, требует разработки и создания специальных технических средств. Исходя из вышесказанного обоснована актуальность и сформулированы цели диссертационной работы.

В первой главе выполнен обзор работ, посвященных исследованию влияния скорости деформации на ресурс пластичности промышленных сплавов. Показано, что большинство исследователей сходятся во мнении, что зависимость предельной пластичности металлических материалов имеет четко выраженный максимум при данной температуре в температурно-скоростном интервале горячего формоизменения. Однако, описанные в этих работах экспериментальные данные либо получены при переменной скорости деформации, что затрудняет их использование при определении функциональной зависимости показателя пластичности материала от скорости деформации, а, следовательно, при разработке уравнения состояния, либо носят общий, качественный характер.

Показано, что стандартное испытательное оборудование не может обеспечить проведение экспериментов на растяжение образцов материала при постоянной логарифмической скорости деформации до относительных удлинений порядка 1000% в условиях горячего формоизменения. В связи с чем проведен анализ существующих конструкций специальных технических средств, пластометров, предназначенных для проведения испытаний при постоянном значении какого-либо параметра (напряжения, скорости деформации). Пластометры для растяжения образцов при постоянном напряжении, используемые, как правило, при изучении реономных свойств материалов, в работах Кеннеди предложено разделять на профильные, отличающиеся использованием специально спрофилированной детали, служащей для компенсации усилия при уменьшении в процессе растяжения площади поперечного сечения образца, и геометрические, в которых компенсация усилия, действующего на образец, осуществляется путем изменения какого-либо геометрического параметра установки (например, плеча действия силы, передаваемой на образец, при изменении взаимного расположения частей установки при деформировании образца) без использования профильных деталей. Показано, что известные конструкции, относящиеся к категории профильных, при более высокой сложности изготовления профилированной детали по сравнению с элементами установок

геометрического типа обладают большей точностью компенсации нагрузки на образец и, как правило, не имеют ограничений на величину удлинения образца. Однако, использование этих пластометров для реализации закона деформирования образца при постоянной скорости логарифмической деформации путем определенного пересчета профилированной детали требует включения в систему уравнений, определяющих профиль кулачка, зависимости $\sigma\left(\bar{\varepsilon}\right)$, имеющей место при требуемом законе деформирования, где σ - действительное напряжение, $\bar{\varepsilon}$ - логарифмическая деформация образца. Такой подход не может быть признан приемлемым вследствие его невысокой точности. Основные элементы пластометров, предназначенных для испытания образцов материала при постоянном значении напряжения разрабатывались для преобразования закона изменения усилия, действующего на образец, при его деформировании. При разработке пластометра, предназначенного для испытания образцов материала при постоянном значении логарифмической скорости деформации, следует преобразовывать закон изменения скорости растяжения образца. Тем не менее, отмечено, что некоторые элементы рассмотренных устройств принципиально могут быть использованы в пластометрах для испытаний в условиях горячего формоизменения при постоянной скорости логарифмической деформации.

Большинство конструкций испытательных стендов для испытания образцов материала при постоянной скорости деформации разрабатывалось для проведения экспериментов при высоких скоростях и усилиях деформирования, в основном характерных для технологических процессов прокатки. Предельные относительные удлинения образцов материала при этом не превышали 100 %. В качестве основного элемента приведенных в обзоре устройств использовался профилированный соответствующим образом кулачок, который, вращаясь, воздействовал на узел испытательной машины, соединенный с подвижным захватом образца, заставляя его перемещаться по заданному закону. Однако, распространение этого принципа в область больших относительных удлинений (до нескольких сотен процентов), характерных для механики горячего формоизменения, вызывает ряд трудностей. Габариты таких кулачков определяются максимальным углом давления, выбранным законом движения, наибольшим подъемом толкателя и углом поворота кулачка, соответствующего этому подъему. На практике оптимально подобрать эти параметры не всегда удается, поскольку резкое увеличение радиуса кулачка (для реализации больших удлинений образца) при ограниченном угле поворота ведет к увеличению угла давления и габаритов кулачка, либо требует существенного уменьшения начальной длины образца, а следовательно, и площади его поперечного сечения. На основе проведенного анализа делается вывод, что существующие конструкции пластометров не могут быть использованы для проведения необходимых в соответствии с целями настоящей диссертации испытаний. Сформулированы требования, которым должна удовлетворять конструкция

испытательного стенда, предназначенного для проведения испытаний при постоянной скорости логарифмической деформации в условиях горячего формоизменения.

Во второй главе представлены методика и результаты экспериментального исследования одноосной ползучести алюминиевого сплава 01570 при температуре 500^0С при силовом нагружении в диапазоне начальных напряжений $5 \div 11$ МПа и при кинематическом нагружении в диапазоне начальных скоростей деформации $5 \cdot 10^{-3} \div 1.4 \cdot 10^{-1}$ $с^{-1}$. Получено существенное различие относительных удлинений образцов сплава 01570 при разрушении (до нескольких сотен процентов) для силового и кинематического режимов нагружения, а также значительное изменение значения предельного удлинения образца при изменении величины начальной скорости деформации при одном и том же виде нагружения. Разработана кинематическая схема и конструкция двухкулачкового пластометра. Представлена методика и результаты экспериментов на растяжение образцов материала при постоянной скорости деформации и температуре 500^0С в диапазоне скоростей деформации $5 \cdot 10^{-4} \div 1.8 \cdot 10^{-1}$ $с^{-1}$.

Для изучения влияния скорости деформации на ресурс пластичности материала в условиях горячего формоизменения был выбран алюминиевый сплав 01570, который согласно известным экспериментальным данным в диапазоне температур 500^0С и скоростей деформаций механики горячего формоизменения металлов деформируется сверхпластично. Перед проведением испытаний было определено процентное содержание следующих химических элементов в исследуемых образцах: Mg 6.0-6.1%, Mn 0.3%, Si 1.3%, Sc 0.25%, а также было установлено, что образцы имели ультрамелкозернистую структуру с размером зерна 5 мкм при наличии развитой субструктуры. Отмечено, что известные экспериментальные данные о влиянии скорости деформации на ресурс пластичности данного сплава получены при переменной скорости деформации образца.

В результате проведенных экспериментов на растяжение образцов сплава 01570 постоянной во времени силой установлено, что у кривых ползучести данного сплава в исследованном диапазоне напряжений отсутствует участок упрочнения, характер разрушения образцов вязкохрупкий, с ростом значения начального напряжения предельная пластичность сплава 01570 монотонно снижается. Средние значения деформаций при разрушении образцов представлены в таблице 1.

таблица 1

σ_0, МПа	$\varepsilon^{ср}_{*экс*}$,%	$\bar{\varepsilon}^{ср}_{*экс*}$	$\bar{\varepsilon}_{*теор}$
5	385	1.58	1.64
7	348	1.50	1.52
9	274	1.32	1.41
11	245	1.24	1.31

Эксперименты на растяжение образцов данного сплава при постоянной скорости относительного перемещения захватов образца характеризуется меньшим разбросом опытных данных по сравнению с силовым режимом нагружения и разрушение образцов было вязкохрупким. При значении начальной скорости деформации 0.14 c^{-1} диаграмма деформирования сплава имеет значительный участок упрочнения, что, по-видимому, может быть объяснено развитием в образцах пластических деформаций. С увеличением значения начальной скорости деформации в исследованном диапазоне скоростей пластичность сплава убывала. Средние величины экспериментально полученных предельных деформаций образцов и максимальные напряжения течения $\sigma_{0\,max}$ представлены в таблице 2.

таблица 2

ξ_0, c^{-1}	$\varepsilon^{экс}_{*ср}$, %	$\bar{\varepsilon}^{экс}_{ср}$	$\bar{\varepsilon}^{мех}_{*}$	$\bar{\sigma}^{экс}_{max\,ср}$	$\bar{\sigma}^{мех}_{max\,ср}$
0.005	670	2.04	2.04	11.6	13.0
0.01	526	1.83	1.96	17.5	17.2
0.05	380	1.57	1.37	31.3	32.7
0.1	253	1.26	1.17	43.3	43.1
0.14	183	1.04	1.08/(1.03)*	49.6	49.3

* - значение получено с учетом диаграммы мгновенного растяжения материала.

Таким образом, проведенные эксперименты на растяжение образцов сплава 01570 при силовом и кинематическом нагружении позволяют утверждать, что предельные удлинения образцов, полученные при этих режимах нагружения существенно различаются между собой, что может быть объяснено различными законами изменения скоростей деформации. Для проведения испытаний на одноосное растяжение образцов сплава 01570 при постоянном значении скорости логарифмической деформации (пластометрическое нагружение) была разработана конструкция двухкулачкового пластометра, кинематическая схема которого показана на рис.1. Предполагается, что кулачки 1 и 2 для передачи вращения используют чистое качение (точка контакта кулачков лежит на линии центров их вращения). Радиусы кулачков ρ_1 и ρ_2 в зависимости от углов их поворота φ_1 и φ_2 определяются зависимостями:

$$\begin{cases} \rho_1(\varphi_1) = \dfrac{C_e \cdot \rho_{10}/\rho_{20} \cdot \exp(\rho_{10}/\rho_{20} \cdot R_2/l_0 \cdot \varphi_1)}{1 + \rho_{10}/\rho_{20} \cdot \exp(\rho_{10}/\rho_{20} \cdot R_2/l_0 \cdot \varphi_1)}; \\ \rho_2(\varphi_2) = \dfrac{C_e}{1 + \rho_{10}/\rho_{20} \cdot (R_2/l_0 \cdot \varphi_1 + 1)}, \end{cases}$$

где C_e - межосевое расстояние, ρ_{10} и ρ_{20} - радиусы кулачков 1 и 2 в начальном положении $(\varphi_{1,2} = 0)$, R_2 - радиус шкива 2, l_0 - длина рабочей части образца в недеформированном состоянии.

Была проведена оценка погрешности задания постоянной скорости деформации при растяжении образца с использованием созданной конструкции двухкулачкового пластометра. Установлено, что наибольшая погрешность возникает вследствие растяжимости гибких тяг 3 и 4, используемых в данной конструкции, что необходимо учитывать при ее дальнейшем использовании и модернизации. При этом максимум погрешности имеет место на начальном (упругом) участке диаграммы деформирования, и его величина в проводимых экспериментах лежит в диапазоне от 5 до 15 % для различных скоростей растяжения. На протяжении основного времени деформирования образца погрешность задания скорости деформации не превышает 1-3%.

С использованием двухкулачкового пластометра была получена экспериментальная кривая предельной пластичности алюминиевого сплава 01570 при температуре 500^0С, показанная на рис.2. Средние значения деформаций при разрушении образцов в зависимости от величины скорости деформации при их растяжении представлены в таблице 3.

таблица 3

ξ, c^{-1}	ε_{*cp},%	$\bar{\varepsilon}_{*cp}$
$5 \cdot 10^{-4}$	549	1.870
$1 \cdot 10^{-3}$	693	2.071
$3 \cdot 10^{-3}$	833	2.233
$6 \cdot 10^{-3}$	640	2.000
$1 \cdot 10^{-2}$	505	1.800
$3 \cdot 10^{-2}$	408	1.625
$6 \cdot 10^{-2}$	217	1.523
$1 \cdot 10^{-1}$	180	1.030
$1.8 \cdot 10^{-1}$	147	0.903

В третьей главе на основе полученных экспериментальных данных разработан вариант уравнения состояния теории ползучести, учитывающий влияние скорости деформации на ресурс пластичности материала, а также методика определения входящих в него констант. Получены аналитические выражения для описания одноосной ползучести образцов материала при силовом, кинематическом и пластометрическом нагружениях. Приведена постановка краевых задач механики горячего формоизменения, методики их решения при использовании разработанного варианта уравнения состояния на примере плоского напряженного состояния ползучести при больших деформациях тонкой кольцевой пластинки, нагруженной по одному из контуров, а также пневмоформовки длинной прямоугольной панели, в том числе, определения режимов, оптимальных с точки зрения получения наибольших удлинений материала заготовки.

Реализуя высказанное предположение, подтвержденное результатами выполненного экспериметального исследования (глава 2 настоящей диссертации), о том, что интенсивность накопления материалом повреждений зависит от текущего значения скорости деформации, предлагается уравнение состояния теории ползучести в виде:

$$\begin{cases} \xi^c = \dfrac{k \cdot \sigma_e^n}{(1-\omega)^m}; \\ \dot{\omega} = \dfrac{\xi_e^c}{\eta_{e*}(\xi_e^c)}, \end{cases}$$

где k, n, m - постоянные материала при данной температуре, ξ_e^c - эквивалентная скорость деформаций ползучести, σ_e - эквивалентное напряжение, $\eta_{e*}(\xi_e^c)$ - функция параметра Удквиста в зависимости от скоростей деформации ползучести. Вид функции $\eta_{e*}(\xi_e^c)$ предлагается определять, используя результаты экспериментов при нагружении до разрушения при постоянном значении ξ_e^c. Разработанный вариант уравнения состояния предполагается использовать для описания деформирования металлов в условиях горячего формоизменения, что накладывает ограничения на экспериментально исследуемый диапазон скоростей деформации. Однако, в испытаниях на одноосное напряженное состояние образцов материала при силовом и кинематическом нагружениях скорость деформации может как значительно убывать, так и значительно возрастать в процессе деформирования. Следовательно, при аппроксимации зависимости $\eta_{e*}(\xi_e^c)$ необходимо учитывать поведение выбранной функции вне указанного диапазона скоростей деформации. Опираясь на известные экспериментальные данные предположим, что кривая предельной пластичности $\eta_{e*}(\xi_e^c)$ монотонно возрастает при $\xi_e \le \xi_{опт}$, а при $\xi_e > \xi_{опт}$ монотонно убывает, принимая при этом только положительные значения, где $\xi_{опт}$ - значение скорости деформации, при котором пластичность материала максимальна. В настоящей диссертации предлагается зависимость $\eta_{e*}(\xi_e^c)$, полученную при одноосном растяжении образцов, аппроксимировать функцией $\eta_{e*}(\xi_e^c) = \bar{\varepsilon}_*(\xi) = A_i \cdot \xi^{B_i}$, $A_i > 0$, $i = 1,2$ на двух участках: первом - $\xi_1 \le \xi_{гр}$ и втором $\xi_2 > \xi_{гр}$, где граничное значение скорости деформации $\xi_{гр}$ определяется как точка пересечения аппроксимирующих кривых.

На основе разработанного варианта уравнения состояния получены зависимости, описывающие результаты экспериментов при силовом, кинематическом и пластометрическом нагружениях.

Разработанный вариант уравнения состояния позволяет отразить все особенности кривой предельной пластичности материала в условиях горячего

формоизменения (например, наличие максимума), а, следовательно, методами математического моделирования подобрать параметры технологического процесса для реализации режима наименьшего накопления материалом повреждений.

Задача о ползучести пластинки при больших деформациях решалась на основе потенциалов ползучести типа Треска-Сен-Венана и Мизеса при использовании уравнения состояния нелинейно-вязкого тела, а также потенциала типа Мизеса и разработанного варианта уравнения состояния. Решения полученные для более простых моделей материала, на начальном этапе деформирования пластинки служили для проверки правильности численных значений, полученных на основе разработанного варианта уравнения состояния. При этом показано, что при больших деформациях для материалов, поведение которых может быть описано на основе разработанного варианта уравнения состояния, значения напряжений могут существенно отличаться от полученных при использовании уравнения состояния нелинейно-вязкого тела, и, соответственно, повреждения, накопленные материалом при переменных во времени и в объеме пластинки полях скоростей деформации, по-видимому, более достоверно будут оценены при использовании разработанного варианта уравнения состояния.

При решении задачи пневмоформовки длинной прямоугольной панели показано, что использование разработанного варианта уравнения состояния позволяет описать немонотонный характер зависимости максимальной вытяжки материала панели от величины внешнего воздействия (например, постоянного давления пневмоформовки), а также описать закон изменения давления пневмоформовки, при котором скорость деформации панели остается постоянной (при принятой расчетной схеме).

В четвертой главе выполнено теоретическое и экспериментальное исследование неодноосной ползучести алюминиевого сплава 01570 при температуре 500^0С.

Экспериментальное исследование неодноосной ползучести сплава 01570 проводилось на образцах, показанных на рис.3, изготовленных из материала той же плавки, что и образцы для одноосных испытаний. Рабочая длина (база) образца имела выкружки, то есть образец изготавливался таким образом, чтобы следы плоскостей торцевых граней используемых захватов на плоскости образца определяли рабочую длину l_0 (рис.3). Образцы испытывались при кинематическом нагружении. При изготовлении образцов перед операцией фрезерования выкружек на их поверхность царапанием наносилась ортогональная сетка с шагом 2 ± 0.05 мм. Программа испытаний состояла в проведении экспериментов на растяжение образцов до разрушения и до промежуточных степеней вытяжки. При этом фиксировались основные параметры напряженно-деформированного состояния образцов: искажение контура выкружек и нанесенных, ортогональных в недеформированном состоянии сеток, а также кривые растяжения. Испытания проводились при двух скоростях растяжения 0.2 и 2 мм/с. Средние удлинения при разрушении

пластинок с базой $l_0 = 20$ мм указаны в таблице 4. Результаты экспериментов позволяют утверждать, что в условиях неодноосного напряженного состояния также имеет место зависимость ресурса пластичности материала от скорости деформации. Кроме того, были проведены эксперименты на растяжение образцов (рис.3) при тех же скоростях до промежуточных степеней вытяжки с целью дальнейшего сопоставления параметров их напряженно-деформированного состояния с результатами расчетов.

Теоретический анализ растяжения пластинок проводился методом конечных элементов (МКЭ) в форме метода перемещений, предложенным в работах Н.Н.Малинина и К.И.Романова. Неизвестными при такой формулировке МКЭ являются скорости узловых перемещений сетки конечных элементов. В качестве конечного элемента использовался плоский треугольный конечный элемент. Расчеты проводились на основе разработанного уравнения состояния. Система нелинейных алгебраических уравнений, получаемая в результате применения процедур конечно-элементного анализа решалась по методу переменных параметров упругости. После определения поля скоростей интегрирование по времени осуществлялось методом, аналогичным методу Эйлера. С учетом принятого уравнения состояния после вычисления поля скоростей для каждого КЭ определялось значение эквивалентной скорости деформации и в зависимости от положения этого значения по отношению к $\xi_{\text{кр}}$ выбирались константы A_i и B_i для определения приращения поврежденности материала данного КЭ на следующем шаге по времени. Значения удлинений образцов при разрушении, полученные при решении задачи МКЭ представлены в таблице 4. Для промежуточных степеней вытяжки и для момента разрушения образца представлено сопоставление деформированного контура выкружки и искаженных линий нанесенной сетки. Результаты расчетов показали удовлетворительное согласование указанных параметров, а также экспериментальных и теоретических диаграмм растяжения образцов для рассматриваемых скоростей деформирования.

таблица 4

Скорость растяжения	Удлинения при разрушении образцов, мм		Максимальное значение деформирующего усилия, Н	
	эксперимент	теория	эксперимент	теория
0.2	44.3	40.5	133	135
2	13.5	15.0	410	368

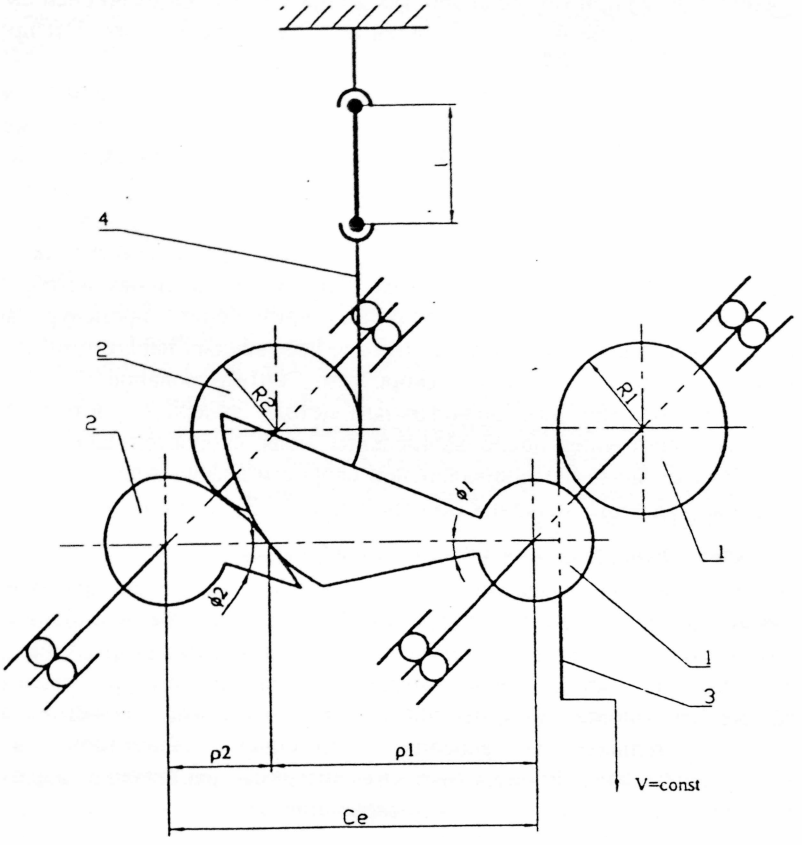

Рис.1.

Кинематическая схема двухкулачкового пластометра для растяжения образцов материала при постоянной скорости логарифмической деформации в условиях сверхпластичности

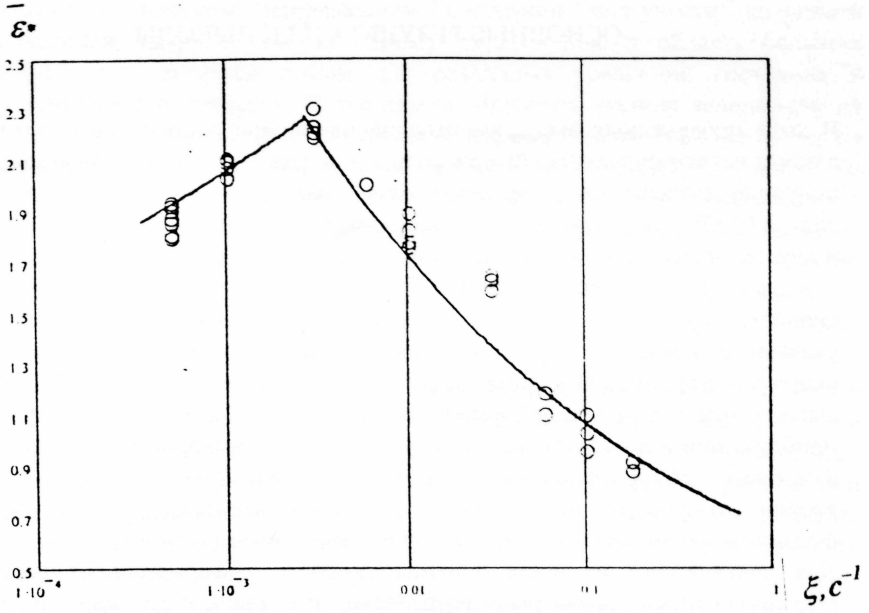

Рис.2.
Кривая предельной пластичности алюминиевого сплава 01570 при температуре 500°С

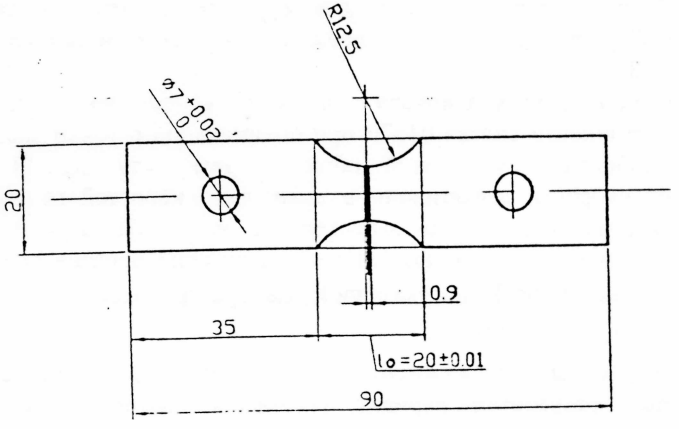

Рис.3.
Образец для испытаний

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В ходе проведенных экспериментов на одноосное растяжение образцов алюминиевого сплава 01570 при силовом и кинематическом нагружении получено существенное различие относительных удлинений образцов сплава 01570 при разрушении (в несколько сотен процентов) для силового и кинематического нагружений, а также значительное изменение значения предельного удлинения образца при изменении величины начальной скорости деформации при одном и том же виде нагружения. Поскольку указанные режимы деформирования отличаются законами изменения скоростей деформации в процессе растяжения образцов, то можно сделать вывод о том, что ресурс деформационной способности материала в первом приближении является функцией текущего значения скорости деформации в процессе деформирования. Известные варианты уравнений состояния теории ползучести, используемые для описания процессов горячего формоизменения металлов, не описывают указанные закономерности.
2. Для дальнейшего изучения влияния скорости деформации на ресурс пластичности материала была разработана и создана новая конструкция кулачкового пластометра, названная двухкулачковым пластометром, позволяющая осуществлять растяжение образцов материала при постоянной скорости логарифмической деформации до относительных удлинений 1000 %. Проведена теоретическая и экспериментальная оценка погрешности задания постоянной в процессе испытания скорости деформации. Согласно проведенным оценкам указанная погрешность в течение большей (порядка 95%) части времени деформирования образца не превышает 2-3%.
3. С использованием двухкулачкового пластометра получена кривая предельной пластичности сплава 01570 при оптимальной с точки зрения достижения наибольших удлинений образцов температуре 500^0С в зависимости от скорости деформации в диапазоне скоростей горячего формоизменения, имеющая ярко выраженный максимум. При этом установлено, что максимальная предельная деформация образца сплава 01570 $\bar{\varepsilon}_* = 2.30$ $(\varepsilon_* = 900\%)$ при указанной температуре реализуется при скорости деформации $\xi = 0.003$ с$^{-1}$.
4. На основе полученных экспериментальных данных при одноосном растяжении был разработан вариант уравнения состояния теории ползучести, отражающий влияние скорости деформации на ресурс пластичности материала, позволяющий описать результаты проведенных экспериментов.
5. На основе разработанного варианта уравнения состояния решены краевые задачи механики горячего формоизменения. Распространение решения

задачи о плоском напряженном состоянии ползучести кольцевой пластинки, нагруженной по одному из контуров, в область больших деформаций является новым для различных уравнений состояния и потенциалов ползучести. В частности, приведен пример использования разработанного варианта уравнения состояния. Также проведен анализ решений задачи пневмоформовки длинной прямоугольной панели на основе различных вариантов уравнений состояния теории ползучести и показано, что решение данной задачи на основе разработанного варианта уравнения состояния позволяет учесть немонотонный характер деформационных свойств сверхпластичного материала в зависимости от величины внешнего воздействия (например, давления пневмоформовки или скорости деформации).

7. В работе экспериментально показано, что эффект влияния скорости деформации на ресурс пластичности материала имеет место и при неодноосной ползучести. Теоретически результаты проведенных экспериментов с достаточной степенью точности описаны при решении задачи методом конечных элементов на основе разработанного варианта уравнения состояния со значениями констант, найденных по результатам одноосных испытаний.
8. Таким образом, выполненное в диссертации исследование создает основу для использования на практике данных о реальных физико-механических свойствах материалов в условиях горячего формоизменения.