

М491276

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

На правах рукописи

КИКВИДЗЕ Омар Георгиевич

УДК 539.374:621.77.016

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕЧЕНИЯ НЕЛИНЕЙНО-
ВЯЗКИХ УПРОЧНЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ В КАНАЛАХ
ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

ОГ.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 - 1989

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.Маланин Н.Н.

Официальные оппоненты: д.ф. - м.н., проф. Шестериков С.А.
к.т.н., с.н.с. Викторова И.В.

Ведущее предприятие - указано в решении Совета

Защита диссертации состоит "4" января 1989 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 техничес-
ком училище имени Н.Э.Баумана, 107005, г.Москва,

ректуре печатью,

Библиотеке МВТУ

19 1989 г.

В.В.Дубинин

Тир 100 экз.

ано к печати 30.06.89г.

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 XXVI съезде КПСС, ставятся задачи: решительно поднять роль науки и техники в качественном преобразовании производительных сил, переводе экономики на рельсы всесторонней интенсификации, получить за пятилетие не менее двух третей прироста производительности общественного труда. Для решения этих задач намечено расширить применение прогрессивных базовых технологий, поднять эффективность использования ресурсов и снизить энерго- и материалоемкость производства. К числу таких технологических процессов относится обработка металлов давлением (ОМД) при высоких температурах. Основными преимуществами горячего формоизменения являются сравнительно небольшие деформирующие усилия, высокая пластичность, что позволяет за один переход получить изделия сложной формы с большими относительными обжатиями, высокий коэффициент использования металла.

Течение металлов в каналах постоянного и переменного сечения является составным компонентом деформирования при прямом выдавливании, волочении круглого прутка и полосы, прокатки, а также при получении изделий сложной формы. Реологическая модель нелинейно-вязкого упрочняющегося материала, на которой основываются теоретические расчеты, расширяет не только класс материалов, но и температурный интервал, в пределах которого ею хорошо описываются кривые ползучести при высоких температурах.

При изготовлении прутков и полос весьма актуальна разработка расчетных методов, позволяющих оценить напряженно-деформированное состояние и прочность заготовки в процессе деформирования, определить усилия формоизменения, подобрать параметры процесса обеспечивающие бездефектное формоизменение. Все это позволяет получить изделие без повреждений и, следовательно, ведет к экономии металла. Знание поля напряжений, возникающее на поверхности контакта между заготовкой и деформирующим инструментом необходимо также для прочностного расчета применяемой оснастки.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1491176

Киквидзе О.Г. Разработка ме

I

МГТУ

БИБЛИОТЕКА

БИБЛИОТЕКА

Цель работы. Для промышленной реализации преимуществ горячего формоизменения необходима разработка методов расчета течения металлов в каналах постоянного и переменного сечений с учетом больших деформаций ползучести, эффектов упрочнения и трения между заготовкой и инструментом на основе уравнения состояния, полно отражающего реологические свойства металлов, а также разработка вычислительных программ, пригодных для решения определенного класса задач горячего формоизменения. В настоящей работе рассматривается течение в цилиндрическом, коническом, клиновидном каналах, а также между параллельными плоскостями.

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

1) экспериментальное изучение свойств сталей при высоких температурах;

2) разработка методов расчета установившегося течения в каналах постоянного и переменного сечения с учетом реальных свойств металлов и условий трения на поверхности контакта;

3) разработка методов расчета неустановившегося течения в каналах постоянного и переменного сечений. Создание вычислительных программ, способствующих внедрению ЭВМ в практику расчетов;

4) применение разработанных методов к расчету прямого выдавливания и волочения круглого прутка и полосы через коническую и клиновидную матрицы соответственно. Оценка напряженно-деформированного состояния, усилия формоизменения и повреждения заготовок в процессе деформирования;

5) экспериментальное исследование горячего выдавливания круглого прутка через коническую матрицу, необходимо для проверки применимости разработанных методов к расчету технологических процессов.

Научная новизна. На основе теории упрочнения впервые разработаны методы расчета течения металлов в каналах постоянного сечения, — переменного сечения в двумерной постановке. Получены новые опытные данные о свойствах сталей при повышенных температурах. Разработана методика определения постоянных кинетического уравнения для сплошности, приближенно описывающего разрушение образца, с учетом больших деформаций.

Разработаны методы расчета установившегося течения в коническом и клиновидном каналах. Определены поверхности, ограничивающие очаг деформации на входе и на выходе из них. Разработан алгоритм решения двумерной задачи установившегося течения материала в коническом и клиновидном каналах при наличии на поверхности контакта зон торможения и скольжения. Разработан метод расчета неустановившегося течения нелинейно-вязкого упрочняющегося материала в цилиндрическом канале и между неподвижными плоскостями. Получены основные уравнения неустановившегося течения в коническом и клиновидном каналах и разработан метод для их решения. На основе разработанных выше методов исследования неустановившаяся стадия деформирования при прямом выдавливании круглого прутка и полосы через коническую и клиновидную матрицы. Определена область, в которой действуют растягивающие напряжения и оценена сплошность заготовки в опасной точке при формоизменении. Получена зависимость усилия деформирования от времени $F(t)$.

Достоверность результатов подтверждена экспериментальной проверкой справедливости использования уравнения состояния, сопоставлением результатов численного счета полученных разными методами, сопоставлением с теоретическими исследованиями других авторов и сравнением с данными эксперимента.

Практическая ценность. На основе разработанных методов можно рассчитать технологические процессы ОМД, такие как горячее выдавливание и волочение.

В качестве примера приведены результаты расчета прямого выдавливания круглого прутка и полосы через коническую и клиновидную матрицы соответственно. Определено напряженно-деформированное состояние и оценена сплошность заготовки в процессе деформирования, что является важным для получения изделия без повреждений. На основе численных расчетов получены зависимости максимального усилия от скорости перемещения пресс-штемпеля, а также от коэффициента трения на поверхности контакта металла с матрицей, что имеет важное значение для выбора оборудования и технологической смазки. Получена индикаторная диаграмма, по которой можно судить об изменении мощности оборудования в процессе формоизменения.

Информация о напряженно-деформированном состоянии на поверхности контакта между заготовкой и деформирующим инструментом служит в качестве исходной - для расчета применяемой оснастки.

Создан комплекс программ на алгоритмическом языке FORTRAN-IV реализующих расчеты технологических параметров горячего формоизменения согласно разработанным методикам.

Полученные результаты рекомендуются для обоснованного выбора оптимальных параметров выдавливания прутков и полос из нелинейно-вязких упрочняющихся материалов. Разработанные в диссертации методики внедрены в расчетную практику предприятия.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на Всесоюзной конференции по программе "Металл". "Прогнозирование и управление качеством металлоизделий, получаемых обработкой давлением" (Абакан 1988 г.), на научных семинарах "Пластичность" кафедры "Сопротивление материалов и динамика и прочность машин" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1986, 1987, 1988, 1989 гг.).

Публикации. По результатам диссертации опубликовано 6 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти разделов, выводов и списка литературы. Работа изложена на 176 страницах, включая 57 рисунков и 5 таблиц. Библиография насчитывает 96 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первом разделе приводится обзор литературы в которой исследуется течение вязко-пластичных материалов в цилиндрическом, коническом, клиновидном каналах, а также между параллельными плоскостями.

Влияние вязкости на течение металлов в каналах рассмотрено в работах Г.Ганки, А.А.Ильющина, А.Л.Ишлинского, Н.Н.Малинина, Д.М.Огибалова, В.Г.Литвинова, А.И.Сафрончика, В.Прагера, Н.Кристеску, С.Танга, Д.Дурбана и др.

В большинстве работ рассматривается прямолинейное течение в круглом цилиндрическом канале, а также между параллельными

плоскостями. В случае установившегося деформирования получены аналитические выражения для скорости перемещения, которые описывают стадию течения, когда пограничный слой занимает все сечение канала. Для изучения изменения пограничного слоя во времени, рассматривается неустановившееся деформирование. В настоящее время в основном решены задачи о нестационарном течении средин Бингама и нелинейно-вязких материалов.

В ряде работ исследуется установившееся течение вязко-пластичных материалов в коническом и клиновидном каналах как в одномерной так и в двумерной постановке.

Решение одномерной задачи дает простые формулы для усилия формоизменения, но не позволяет с необходимой полнотой изучить напряженно-деформированное состояние в каждой точке деформируемого металла и следовательно судить о прочности в процессе формоизменения.

Для более полного изучения напряженно-деформированного состояния необходимо решить задачи в многомерной постановке. При решении двумерных задач установившегося течения в коническом и клиновидном каналах предполагается, что скорости перемещения направлены вдоль радиуса. Предположение о радиальности течения позволяет свести решение двумерных задач к интегрированию обыкновенных дифференциальных уравнений. С появлением ЭВМ для решения таких уравнений интенсивно стали развиваться численные методы. Их можно разделить на две группы: сведение решения краевой задачи к последовательности решений задач Коши (метод стрельбы) и непосредственное применение метода конечных разностей (МКР).

Недостатком работ посвященных исследованию установившегося радиального течения вязко-пластичных материалов в коническом и клиновидном каналах является то, что в них не исследуется геометрия очага деформации. При радиальном течении скорость перемещения вычисляется следующим образом $|V_p| = W/\rho^\lambda$, где $W = W(\alpha)$, ρ, α — координаты ($\lambda = 1$ — плоское течение, $\lambda = 2$ — осесимметричное течение). Функцию W следует определить по заданной скорости на входе в канал, а также с учетом поверхности ограничивающей очаг деформации. Геометрия очага деформации исследована в работах Л.Г. Степанского, В. Авитцур, З. Зимермана и др. при радиальном деформировании пластичных материалов в коническом и клиновидном каналах.

В настоящее время в литературе отсутствуют работы, в которых исследуется неустановившееся течение вязко-пластичных материалов в каналах переменного сечения при помощи дифференциальных уравнений движения сплошной среды. Вместе с тем необходимо отметить, что в работах К.И.Романова, О.Зенкевича, Е.Онейта и др. исследуется статия неустановившегося деформирования при осесимметричном выдавливании круглых заготовок через плоскую матрицу методом конечных элементов. На каждом шаге времени перемещения и деформации определяются путем интегрирования скорости перемещения и деформации по времени методом Эйлера. При таком подходе на каждом шаге времени накапливаются погрешности, что связано со схемой интегрирования Эйлера и для того, чтобы получить приемлемые результаты необходимы трудоемкие вычисления.

При высоких гомологических температурах (50%-70%) расчеты целесообразно вести на основе теории ползучести с использованием результатов экспериментального исследования кратковременной ползучести при больших деформациях. Часто в расчетах используется модель нелинейно-вязкого тела. Указанная модель описывает состояние металла, когда на кривых ползучести отсутствует начальный участок. Однако экспериментальные исследования Л.И.Бойцова, В.Н.Бойкова, Э.С.Лазаренко, К.И.Романова и др. показывают, что при высоких температурах многие материалы имеют свойство деформационного упрочнения. Кроме этого одни и те же материалы проявляют свойство деформационного упрочнения с понижением температуры. В таком случае расчеты следует вести на основе теории упрочнения. Теория упрочнения расширяет не только класс материалов, но и температурный интервал в пределах которого ее можно аппроксимировать кривые ползучести. В настоящее время на основе теории упрочнения решены только одномерные задачи осесимметричного и плоского течения в каналах переменного сечения.

Из анализа литературы следует, что течение нелинейно-вязких упрочняющихся материалов в каналах постоянного и переменного сечения изучено недостаточно. Отсутствуют работы, в которых исследовалось бы течение в цилиндрическом канале и между параллельными плоскостями. Недостаточно исследовано деформирование в коническом и клиновидном каналах.

Далее сформулированы задачи, решаемые в последующих разделах диссертации.

Второй раздел посвящен экспериментальному исследованию кратковременной ползучести цилиндрических образцов из стали. Описаны методика и средства проведения эксперимента, а также методика обработки опытных данных. На примере применяемых в промышленности нержавеющей стали 12Х18Н10Т (1000°С) и ст.10ГН2МЗА (1180°С) показано, что в зависимости от свойств и условий горячего формоизменения материалы могут деформироваться с упрочнением. Участок деформационного упрочнения на кривых ползучести для ст.10ГН2МЗА выражен более ярко, чем для ст.12Х18Н10Т. В таком случае кривые ползучести хорошо описываются по теории упрочнения.

$$\dot{\epsilon} \bar{\epsilon}^{\beta} = K \bar{\sigma}^{\gamma} \quad (1)$$

где β , K , γ - постоянные материала при определенной температуре, $\dot{\epsilon}$ - скорость логарифмической деформации ползучести, $\bar{\sigma}$ - действительное напряжение, $\bar{\epsilon}$ - логарифмическая деформация.

Для уменьшения разброса свойств ползучести образцы изготавливались из одного слитка. Для каждого материала испытания выполнены не менее, чем при четырех уровнях начального напряжения $\bar{\sigma}_0$; при определенном значении $\bar{\sigma}_0$ опыты проводились не менее чем на трех образцах.

Расчеты параметров уравнения состояния (1) проводились при больших деформациях. Чтобы оценить точность найденных коэффициентов, были сопоставлены между собой экспериментальные и теоретические кривые ползучести. Согласование оказалось достаточно хорошим, причем все расчетные кривые ползучести находятся в соответствующих доверительных интервалах.

Разрушение образцов описывалось кинетическим уравнением для сплошности ψ (в начальный момент времени $\psi = 1$, в момент разрушения $\psi = 0$).

$$\dot{\psi} = -\dot{\epsilon} (\bar{\sigma} / \psi)^m \quad (2)$$

где $\dot{\epsilon}$, m - постоянные материала при определенной температуре, точкой обозначена производная по времени. Разрушение имело вязкий характер. Разработана методика расчета параметров $\dot{\epsilon}$ и m при больших деформациях с учетом деформации разрушения.

В третьем разделе уравнение состояния (1) и кинетическое уравнение (2) рассмотренные в условиях одноосного растяжения обобщены на случай сложного напряженного состояния путем заме-

ны скорости деформации и напряжения на эквивалентные: скорость деформации ξ_e и напряжение $\bar{\sigma}_e$; а также $\bar{\epsilon}$ на параметр Удк-виста $\rho = \int \xi_e dt$. Напряжение в уравнении (2) заменяется эквивалентным напряжением, которое вычисляется по формуле В.П.Сдобырева.

Рассматривается течение в цилиндрическом и коническом каналах. При исследовании полагается, что деформирование изотермическое, течение в каналах ламинарное, материал изотропный, деформирующий инструмент абсолютно жесткий. За полные деформации принимаются деформации ползучести.

При исследовании течения в цилиндрическом канале принято, что на поверхности контакта материала с каналом имеет место прилипание. В случае установившегося течения получено аналитическое выражение для скорости перемещения. Рассмотрено неустановившееся течение. Решение нестационарной задачи сводится к интегрированию дифференциального уравнения, которое в безразмерных величинах имеет вид:

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{t}} = \frac{1}{\bar{\tau}} \frac{\partial}{\partial \bar{\tau}} \left[\left| \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{\tau}} \right|^{m_1-1} \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{\tau}} \left(\int \frac{\partial \bar{V}}{\partial \bar{\tau}} d\bar{t} \right)^{m_2} \bar{\tau} \right] + \bar{\tau}, \quad (3)$$

где $m_1 = 1/\gamma$, $m_2 = \beta/\gamma$, $\bar{V} = V_z/V_0$ - осевая скорость перемещения, V_0 - средняя скорость перемещения, $\bar{\tau}$ - координата вдоль радиуса, $\bar{\tau} = a\bar{\sigma}_0/a\bar{\sigma}$. Для того, чтобы вычислить интеграл по времени в правой части уравнения (3), вводится новое переменное $\bar{Z} = \int \partial \bar{V} d\bar{t} / \partial \bar{\tau}$; для которого имеем дифференциальное уравнение

$$\partial \bar{Z} / \partial \bar{t} = \partial \bar{V} / \partial \bar{\tau}. \quad (4)$$

Граничные и начальные условия:

$$\bar{Z}(\bar{\tau}, 0) = 0, \quad (5)$$

$$\bar{V}(1/2, \bar{t}) = 0, \quad \partial \bar{V} / \partial \bar{\tau} \Big|_{\bar{\tau}=0} = 0, \quad \bar{V}(\bar{\tau}, 0) = 1. \quad (6)$$

Неизвестная функция $\bar{Z}$ определяется из условия постоянства расхода в единицу времени.

$$\int_0^{1/2} \bar{V} \bar{\tau} d\bar{\tau} = 1/8. \quad (7)$$

Интегрирование уравнений (3) и (4) проводится методом прямых. Заменяя в них производные по координате $\bar{\tau}$ конечно-разностными аналогами получается система обыкновенных дифференциальных уравнений относительно значений скорости перемещения в точках деления. Интервал по времени разделяется на ряд малых интерва-

лов и считается, что в течение каждого из них $\bar{f} = \text{const.}$ На каждом шаге времени задача решается методом стрельбы. Параметром стрельбы является $\bar{f}$ и подбирается так, чтобы удовлетворить (7). Для того, чтобы получить нулевое приближение для $\bar{f}$ ($\bar{f}^{(0)}$) используется метод дискретного продолжения решения по параметру. В правой части (3) нелинейные слагаемые умножаются на параметр q . При $q = 0$ легко определяется $\bar{f}$; а при $q = 1$ получается решение исходного уравнения (3). На каждом шаге параметра уравнение (7) решается модифицированным методом Ньютона.

$$\bar{f}^{(k+1)} = \bar{f}^{(k)} - J^{-1} H(\bar{f}^{(k)}, q_v) \quad (8)$$

где k - номер итерации; $J = dH/d\bar{f}^{(0)}$ - якобиан, $H = \int_0^2 \sqrt{5} d\bar{f} - 1/8$. В результате интегрирования получено распределение скорости перемещения в сечении канала в разные моменты времени. Установлено время, за которое скорость на оси достигает значения скорости установившегося течения. Результаты численного счета для указанного момента времени хорошо совпадают с данными решения стационарной задачи.

В.В. Соколовским установлено, что при радиальном, установившемся течении упрочняющегося материала в коническом канале, решение двумерной задачи сводится к интегрированию системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В работе для более общего случая уравнения состояния (уравнения (I)) решение двумерной задачи также сведено к интегрированию системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений.

Рассмотрено установившееся течение материала в коническом канале ограниченного слева и справа некоторыми поверхностями. Указанные поверхности представляют собой геометрическое место точек, в которых меняется направление скорости перемещения, и в работе называются поверхностями разрыва скоростей. Предполагается, что скорость перемещения на входе и на выходе из канала направлена вдоль оси, а в канале - вдоль радиуса. Задача решается в сферической системе координат. Принятое допущение о радиальном течении и условие несжимаемости позволили установить законы изменения компонентов скорости деформации по радиусу. Поверхность разрыва скоростей определяется из условия равенства скоростей, нормальных к поверхности разрыва слева и справа от нее.

Решение двумерной задачи сведено к интегрированию системы

обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\psi'' + f_1(\psi)(\psi')^2 + f_2(\psi, \chi')\psi' + f_3(\psi, \chi', \chi'') = 0, \quad (9)$$

$$\chi'' + f_4(\chi)(\chi')^2 + f_5(\chi, \psi) = 0, \quad (10)$$

где $\psi = \psi(\alpha)$ — функция с помощью которой определяются компоненты девиатора напряжений, $\chi = 2\rho_{1p} \sin \alpha / D_1$, ρ_{1p} — поверхность разрыва скоростей на входе в канал, D_1 — диаметр канала на входе, штрихом обозначена производная по α .

На поверхности контакта принята пропорциональная зависимость сил трения от максимального касательного напряжения $\tau = k\tau_{\max}$. Тогда для интегрирования системы уравнений (9), (10) необходимо использовать граничные условия.

$$\alpha = 0 \quad \chi = 0, \psi = 0; \quad \alpha = \alpha_1, \quad \chi = 1, \psi = \alpha_1 \cos \alpha_1 / 2. \quad (11)$$

Решение уравнений (9), (10) проводится МКР. Решение нелинейных алгебраических уравнений, которые получаются после замены производных центральными конечно-разностными аналогами проводится методом простой итерации. В качестве нулевого приближения для ψ и χ приняты линейные функции, удовлетворяющие граничным условиям.

Для проверки достоверности полученных результатов уравнения (9) и (10) решались также методом продолжения решения по параметру, для чего они записывались в виде:

$$X' = Q(X, q), \quad (12)$$

где $X = (\bar{w}, \psi', \psi, \chi', \chi)^T$, $\bar{w} = w/w(0)$ — функция с помощью которой определяются скорости перемещения. Для нее имеется дифференциальное уравнение, которое следует из условия совместности деформации.

$$\bar{w}' = -2\sqrt{3} \bar{w} \tan 2\psi \quad (13)$$

На каждом шаге параметра q задача решается методом стрельбы, используя пристрелку по модифицированному методу Ньютона. Параметрами стрельбы являются значения функций ψ' и χ' в начале интервала интегрирования и подбираются так, чтобы удовлетворить граничные условия в конце интервала интегрирования. Результаты численного счета в пределах 1-2% совпадают с теми, которые получаются в решении МКР. Кроме этого результаты расчета для частного случая течения упрочняющегося материала, хорошо совпа-

дают с численными данными, приведенными в монографии В.В. Соколовского.

В диссертации разработан алгоритм решения двумерной задачи установившегося течения материала в коническом канале с использованием закона трения Кулона на поверхности контакта. Поверхность канала разделяется на две области. Зона, где справедливо условие $\tau = \tau_{\max} = b_e / \sqrt{3}$ называется зоной торможения. К ней примыкает зона скольжения, где справедлив закон Кулона $\tau = \mu b_{\alpha}$. Границы зон определяются из условия:

$$\sqrt{3} \mu b_{\alpha} / b_e = 1. \quad (14)$$

Зона скольжения существует у выхода из канала. Установлено, что с уменьшением коэффициента трения μ граница зон скольжения и торможения перемещается к входу в канал.

В работе исследован процесс заполнения конического канала, когда на входе задано нестационарное поле скорости перемещения. Решение нестационарной задачи сведено к интегрированию системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\partial \bar{\Phi} / \partial \bar{t} = G_0(\psi, \psi', \psi'', g_1), \quad \partial g_1 / \partial \bar{t} = G_1(\bar{p}_{1p}, \psi), \quad (15)$$

где $\bar{\Phi} = -\partial(\bar{p}_{1p}^{3m_1-1} \bar{W}) / \partial \alpha$, $\bar{p}_{1p} = p_{1p} / D_1$, $g_1 = \sqrt{3} p$.

Свободная поверхность в очаге деформации определяется как

$\bar{p}_{c\theta} = ctg \alpha_1 / (2 \cos \alpha) - \int \bar{V}_{p\theta} |d\bar{t}|$, где α_1 - угол конусности канала, $\bar{V}_{p\theta} = V_{p\theta} / V_0$ - безразмерная скорость перемещения на свободной поверхности, V_0 - средняя скорость перемещения на входе в канал.

Для того, чтобы проинтегрировать уравнение (15) используем метод прямых. Производные по координате α заменяются конечно-разностными аналогами и при этом учитываются граничные условия. В работе при решении нестационарной задачи использованы условия (II) для ψ . Таким образом, задача сводится к задаче Коши относительно $\bar{\Phi}$ ($\bar{\Phi}_i$ - значения функции $\bar{\Phi}$ в точках деления).

Начальные условия задаются следующим образом. В момент времени $\bar{t} = 0$ касательные напряжения $\tau = 0$, и поэтому $\psi = 0$. Из уравнения (13) следует, что $\bar{W} = 1$. Поскольку скорость перемещения на входе в канал задана, то определяется $\bar{p}_{1p}$, после чего легко находится $\bar{\Phi}$, а для g_1 имеем: $g_1(\alpha, 0) = 0$.

Время деформирования разделяется на ряд малых шагов и считается, что на каждом из них $\bar{p}_{1p}$ постоянна. В пределах шага $\bar{W}$

вычисляется следующим образом:

$$\bar{W} = (\bar{P}_{\text{дп}}^{3m,1}(0) - \int \bar{\Phi} d\alpha) / \bar{P}_{\text{дп}}^{3m,1}(\alpha), \quad (16)$$

где $\bar{P}_{\text{дп}}$ - берется с предыдущего шага. После определения $\bar{W}$ находится Ψ

$$\Psi = \alpha \operatorname{arctg}[-\partial \bar{W} / (2\sqrt{3} \bar{W} \partial \alpha)] / 2. \quad (17)$$

В центральной части материал течет интенсивнее и выходит раньше из очага деформации, чем часть материала у поверхности контакта. Поэтому на каждом шаге времени сравниваются свободная поверхность и поверхность разрыва скоростей на выходе из канала (в случае, когда условие трения на контактной поверхности не меняется, поверхность разрыва скоростей на входе и на выходе из канала подобны). Канал будет заполнен материалом, тогда когда ближайшая точка у поверхности контакта выйдет из очага деформации. Если к тому же считать, что скорость перемещения на входе не меняется во времени, то с указанного момента течение станет установившимся.

Используя созданный пакет прикладных программ на алгоритмическом языке FORTRAN-IV, исследовано горячее прямое выдавливание круглого прутка через коническую матрицу путем сопряжения двух прямолинейных течений (в цилиндрическом и коническом каналах) на поверхности разрыва скоростей на входе в матрицу. Определено напряженное состояние заготовки в процессе формоизменения. Получены зависимости усилия выдавливания от коэффициента трения, от скорости перемещения пресс-штемпеля. Установлено, что с увеличением скорости перемещения деформирующего инструмента увеличивается усилие формоизменения, тем самым увеличивается мощность оборудования, необходимая для деформирования заготовки.

Для исследования стадии неустановившегося течения использовались решения нестационарных задач. Получена зависимость усилия выдавливания от времени $F(t)$. Определена форма заготовки в разные моменты времени. Расчеты напряженного состояния показали, что в процессе формоизменения существует область, в которой возникают растягивающие радиальные напряжения. Используя кинетическое уравнение для сплошности (2) оценена прочность заготовки в опасной точке на оси.

В четвертом разделе рассмотрено плоское течение материала между неподвижными параллельными плоскостями и в клиновидном

канале.

Также как и при осесимметричном течении исследовано установившееся и неуставившееся деформирование между параллельными плоскостями. Получено распределение скорости перемещения по сечению канала в разные моменты времени. Установлено время, за которое скорость на оси достигает значения скорости установившегося течения. Дано сопоставление результатов численного счета с данными расчета установившегося деформирования.

Рассмотрено установившееся радиальное течение материала в клиновидном канале. Так же, как и при осесимметричном течении решение двумерной задачи сведено к интегрированию системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решается МКР и методом продолжения решения по параметру. Достоверность полученных результатов проверяется также сопоставлением с данными других авторов.

Исследован процесс заполнения клиновидного канала. Приведены основные уравнения, описывающие неуставившееся течение в канале. Решение нестационарной краевой задачи, после замены производных по угловой координате с учетом граничных условий, сведено к решению задачи Коши. Установлено время, за которое течение в канале становится установившимся. Для заданного момента времени дано сопоставление результатов расчета с данными решения стационарной задачи.

Проведенные исследования течения материала между параллельными плоскостями и в клиновидном канале использованы для расчета технологических параметров прямого выдавливания полосы через клиновидную матрицу.

В пятом разделе изложены результаты экспериментального исследования горячего выдавливания круглого прутка через коническую матрицу. Рассмотрены методика и средства проведения эксперимента. Заготовки изготавливались из того же слитка, что и образцы, испытанные на ползучесть в условиях одноосного растяжения.

Целью эксперимента являлась подтверждение применимости принятой расчетной схемы и разработанных методик для расчета технологического процесса. Выдавливание проводилось из контейнера диаметром $D_0 = 40$ мм, через коническую матрицу с углом при

вершине 45° и разными диаметрами матричной воронки I4, I6, I8, 20 мм. Изменение сетки нанесенной на диаметрально сечении заготовки позволяет заключить, что для больших углов конусности матрицы α_1 ($\alpha_1 \leq 45^\circ$) можно приближенно принять предположение о радиальности течения. Основное внимание сосредотачивалось на изучении силового режима.

При деформировании части заготовок стенки контейнера и матрицы смазывались графито-масляной смесью и фиксировалось максимальное давление в рабочем цилиндре пресса. Данные эксперимента сопоставлены с теоретическими расчетами установившегося течения в коническом канале с использованием закона Кулона на поверхности контакта. Погрешность в максимальном усилии составила 15%.

Часть образцов выдавливалась без смазки. При этом записывалась индикаторная диаграмма. Если сравнить значения максимального усилия, полученные из эксперимента и на основе расчета не установившегося течения, то погрешность составит 14%. Расчет основанный на установившемся течении дает разницу в максимальном усилии (по сравнению с экспериментальным) 23%. Очевидно, что результаты решения нестационарной задачи лучше описывают процесс деформирования и силовой режим.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Выполнено комплексное исследование механики осесимметричного и плоского течения нелинейно-вязких упрочняющихся материалов в каналах постоянного и переменного сечения.

2. Получены новые экспериментальные данные о ползучести металлов при высоких температурах. Разработана методика определения постоянных кинетического уравнения для сплошности, приближенно описывающего разрушение образца, по большим деформациям.

3. Получены аналитические выражения для скорости перемещения при установившемся течении материала в каналах постоянного сечения.

4. Разработан метод расчета не установившегося течения материала в цилиндрическом канале и между параллельными плоскостями. Для решения нестационарной задачи использован метод прямых в сочетании с методом продолжения решения по параметру. Установлено время, за которое скорость перемещения на оси дости-

гает скорости установившегося течения.

5. Разработан метод расчета установившегося течения нелинейно-вязких упрочняющихся материалов в коническом и клиновидном каналах. Решение двумерной задачи сведено к интегрированию системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решается МКР и методом продолжения решения по параметру. На поверхности контакта принята пропорциональная зависимость сил трения от максимального касательного напряжения.

6. Разработан алгоритм решения двумерной задачи установившегося течения материала в коническом и клиновидном каналах с использованием закона Кулона на поверхности контакта. Получена зависимость усилия формоизменения от коэффициента трения.

7. Разработан метод расчета неустановившегося течения материала в каналах переменного сечения. Решение нестационарной задачи проводится методом прямых. На каждом шаге времени решается задача Коши. Определено время за которое течение устанавливается. Для указанного момента времени дано сопоставление с результатами расчета установившегося течения.

8. Разработанные методы расчета течения материала в каналах постоянного и переменного сечения использованы для расчета прямого выдавливания круглого прутка и полосы через коническую и клиновидную матрицы соответственно. Определено напряженно-деформированное состояние заготовки. Установлено, что в процессе формоизменения возникают растягивающие напряжения. Оценена прочность заготовки в опасной точке на оси. Получена индикаторная диаграмма. Продолжительность неустановившейся стадии деформирования составляет $I_4 + I_0\%$ от всего времени формоизменения.

9. Созданный комплекс вычислительных программ способствует внедрению ЭВМ в практику расчетов технологических процессов ОМД.

10. Проведено экспериментальное исследование горячего выдавливания круглого прутка через коническую матрицу. Изменение сетки нанесенной на диаметральный сечении заготовки позволяет заключить, что для больших углов конусности матрицы можно приближенно принять предположение о радиальности течения в матрице. Исследован силовой режим. Анализ опытных данных показал удовлет-

ворительное совпадение результатов эксперимента с теоретическими расчетами.

Содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Киквидзе О.Г., Малинин Н.Н. Горячее прессование прутка в конической матрице // ИВУЗ. Машиностроение. - 1984. - № 10. - С.103-106.

2. Киквидзе О.Г., Малинин Н.Н. Горячее прессование полосы в клиновидной матрице // ИВУЗ. Машиностроение. - 1984. - № 7. - С.116-119.

3. Киквидзе О.Г., Малинин Н.Н. Прессование нелинейно-вязкого упрочняющегося материала через коническую матрицу // ИВУЗ. Машиностроение. - 1987. - № 9. - С.116-119.

4. Киквидзе О.Г. Исследование стадии неуставившегося течения при прямом прессовании нелинейно-вязкого упрочняющегося материала через коническую матрицу // Прогнозирование и управление качеством металлоизделий, получаемых обработкой давлением: Тезисы докладов У Всесоюзной конференции. - Абакан., 1988 - С.190-191.

5. Киквидзе О.Г. Прессование нелинейно-вязкого упрочняющегося материала через коническую матрицу // ИВУЗ. Машиностроение. - 1987. - № 12. - С.106-109.

6. Киквидзе О.Г. Неуставившееся течение нелинейно-вязкого упрочняющегося материала в контейнере // Изв. АН СССР. МТТ. - 1989. - № 3. - С.95-97.

О.Киквидзе