

М 449025
Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

Калпин Юрий Григорьевич

УДК 621.73

РАЗРАБОТКА ОБОБЩЕННОЙ ТЕОРИИ И ТЕХНОЛОГИИ
ОБЪЕМНОЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОЙ ШТАМПОВКИ

05.03.05 / процессы и машины обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Московском автомеханическом институте

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Смирнов О.М.,

доктор технических наук, профессор Мануйлов В.Ф.,

доктор технических наук, профессор Живов Л.И.

Ведущая организация - указана в решении специализированного совета.

Защита состоится "___" _____ 198 г. в "___" часов на заседании специализированного совета Д 053.15.05 при МВТУ им. Н.Э.Баумана (107005, г.Москва, 2-ая Бауманская, 5).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского высшего технического университета.

Автор

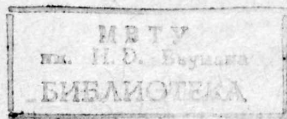
Ученый сек
специализи
профессор,

4449025

В диссертационной работе установлены основные закономерности поведения металлов при изотермическом деформировании, предложена обобщенная теория процессов объемной изотермической штамповки; приведены результаты научных исследований пластичности и сопротивления деформированию металлов при горячей изотермической штамповке, деформирующих усилий и теплового эффекта деформации в основных процессах объемной штамповки: осадки, прямого и обратного выдавливания, облойной и безоблойной штамповки, — контактного трения, а также условий работы штампов, на основании чего предложен научный подход к выбору режимов деформации. Созданы расчетные методики, разработаны и внедрены в производство технологические процессы изотермической штамповки ряда деталей, а также рекомендации по проектированию и совершенствованию установок изотермического деформирования.

Актуальность работы. В решениях XXVI съезда КПСС отмечается, что одной из важнейших задач является повышение эффективности машиностроительного производства за счет совершенствования его технологии. К перспективным технологическим процессам относится деформирование в штампах, нагретых до той же температуры, что и исходная заготовка. Эта разновидность горячего деформирования получила название изотермической штамповки.

Успех любого процесса горячего деформирования металлов зависит от правильного выбора и соблюдения термомеханического режима формоизменения, т.е. определенного сочетания деформации, температуры и скорости деформации. В обычных условиях деформирования в холодном или подогретом до невысокой температуры инструменте возможности поддержания оптимального термомеханического режима обработки во многом ограничены неизбежным остыванием нагретой заготовки при переносе ее от печи к деформирующему оборудованию, укладке в штамп и последующей деформации. Применение изотермической штамповки позволяет выбрать наилучшие режимы деформирования. Постоянство температуры заготовки в процессе штамповки обеспечивает возможность осуществления сколь угодно малой скорости деформации, нижний



предел которой ограничен только требованиями к производительности процесса. При этом снижается сопротивление металла деформированию. Уменьшение усилия при изотермической штамповке является также следствием более равномерной деформации и увеличения эффективности технологической смазки, постоянно находящейся в условиях оптимальной вязкости и образующей тонкий разделительный слой между металлом и инструментом. Важным преимуществом изотермического деформирования является повышение пластичности обрабатываемого металла, что связано с более полным протеканием разупрочняющих процессов и "залечиванием" микротрещин. Нагрев металла проводят, как правило, до температуры, соответствующей нижней границе температурного интервала деформирования, в результате чего снижается окалинообразование, уменьшается дефектный слой на поверхности поковки, а также потребление энергии нагревательным устройством. Исключается опасность перегрева металла и гарантируется получение мелкозернистой структуры и повышенных механических характеристик металла поковки. Инструмент для изотермической штамповки работает при отсутствии термических циклически меняющихся напряжений, не подвержен отпуску, и стойкость штампов может существенно повышаться.

Технологический процесс изотермической штамповки является новым и был впервые предложен в начале шестидесятых годов при участии автора настоящей работы, а затем с успехом применен для деформирования разнообразных сплавов, в первую очередь титановых. Освоение процесса изотермической штамповки потребовало подробного его исследования, так как налицо существенное различие в технологических приемах в сравнении с традиционной штамповкой, не изучены температурно-скоростные режимы деформирования, различаются условия трения и применяемые смазки, а следовательно, изменяется характер течения металла при деформировании, различны требования, предъявляемые к структуре и свойствам штампованных деталей, применяются иные марки штамповых материалов и значительно отличаются условия их работы. Следует упомянуть также о разнообразных конструктивных исполнениях установок для создания изотермических условий.

В последние десятилетия в металлургии новых конструкци-

онных материалов четко выявляется следующая тенденция: получение новых эксплуатационных свойств сопровождается удорожанием и одновременно ухудшением технологических свойств материалов на всех этапах обработки, в первую очередь при обработке давлением, и связанным с этим уменьшением полезного использования. Прослеживается также стремление конструкторов машин к созданию деталей больших габаритов, сложной формы, повышенной жесткости за счет применения тонких и высоких элементов типа ребер, обшивки и т.п. При традиционной штамповке это приводит к повышенному расходу металла, требует создания уникального и дорогостоящего оборудования, резко увеличивает затраты на инструмент.

Изотермическая штамповка в значительной степени решает эти вопросы. Однако чисто эмпирический подход к разработке технологии приводит либо к снижению производительности, либо к ухудшению качества деталей, уменьшению стойкости штампов, снижению экономической эффективности изотермической штамповки и к появлению необоснованных рекомендаций при создании специализированного оборудования и установок изотермического деформирования.

Цель и задачи исследования. Целью диссертации является решение научно-технической проблемы: комплексная разработка высокопроизводительных и экономичных технологических процессов изотермической штамповки деталей высокого качества из малопластичных, труднодеформируемых, дорогостоящих и дефицитных сплавов для изделий новой техники и установок изотермического деформирования. Эта цель достигается путем создания обобщенной теории процессов изотермической штамповки, включающей методику определения оптимальных режимов деформирования и расчета установок изотермической штамповки, и технологических процессов изотермической штамповки ряда деталей из различных сплавов, а также на основе установления областей рационального применения изотермической штамповки и ее сочетания с традиционными методами.

Для решения указанной проблемы поставлены следующие конкретные задачи:

- 1) разработка теории разрушения металлов при горячей деформации и критерия, позволяющего рассчитывать предельную деформацию при произвольном пути нагружения;
- 2) Установление закономерностей влияния температурно-

скоростного режима на сопротивление металла деформированию и усилие штамповки; разработка зависимостей для определения усилия деформирования в основных операциях объемной штамповки;

3) установление аналитических зависимостей изменения температуры заготовки в результате теплового эффекта деформации от параметров штамповки;

4) выявление закономерностей температурного режима работы штампов для изотермической штамповки;

5) разработка и внедрение технологических процессов изотермической штамповки ряда деталей из различных сплавов для изделий новой техники;

6) разработка методики расчета установок изотермического деформирования; проектирование и совершенствование установок.

Методы исследования. Для исследования пластичности в горячем состоянии использована феноменологическая модель накопления и "залечивания" повреждений в металле в процессе деформации. Экспериментальное определение коэффициентов, входящих в полученное дифференциальное уравнение, осуществлено методами кручения, растяжения и сжатия. Исследование пластичности при штамповке поршней проведено с использованием метода координатных сеток и поэтапного деформирования для нахождения накопленных деформаций, скорости деформации и напряженного состояния в точках наиболее вероятного появления трещин. Исследование силовых режимов изотермической штамповки выполнено методом баланса мощности с учетом зависимости сопротивления деформированию от скорости деформации металла в виде степенной функции. Для построения кривых упрочнения в горячем состоянии предложен метод осадки цилиндрических образцов на шероховатых бойках. Теоретическое изучение теплового эффекта деформации проведено на основе баланса теплоты в процессе штамповки, экспериментальное — фотографированием заготовок на спектральнозональную пленку, а тепловые условия работы штампа исследованы с привлечением методов решения уравнения теплопроводности на основе преобразования Лапласа. Для изучения трения при изотермической штамповке использован усовершенствованный метод осадки кольцевых образцов.

Научная новизна. Предложен научный подход к установлению режимов объемной изотермической штамповки, заключающийся в раз-

работке критерия пластичности при горячей изотермической деформации, в определении усилий деформирования металла, реологические свойства которого описывается схемой нелинейно-вязкого тела, и в установлении теплового эффекта деформации для основных процессов объемной штамповки. Предложенный критерий пластичности учитывает восстановление пластических свойств металла при повышенной температуре, причем его аналитическая интерпретация единообразна для любого нециклического и непрерывного пути нагружения. Получены характеристики пластических свойств некоторых сплавов в горячем состоянии методами кручения, растяжения и сжатия. Предложен метод построения кривых упрочнения при горячей деформации осадкой на шероховатых бойках. Для нахождения усилий деформирования разработан метод расчета мощностей на границах очага деформации и между его отдельными элементами, а само определение усилий выполнено с учетом переменного по очагу сопротивления металла деформированию, зависящего от скорости деформации, с учетом кинематических характеристик и жесткости применяемого оборудования и теплового эффекта деформации. Получены расчетные формулы для определения величины тепловыделения при осадке, выдавливании и облойной штамповке. Теоретически исследованы тепловые условия работы штампа при различных кинематических характеристиках штамповых машин. Для исследования трения усовершенствован и распространен на горячую деформацию метод осадки кольцевых образцов.

Получены данные о влиянии горячей деформации на свойства некоторых малопластичных, в том числе литейных, сплавов. Предложен метод расчета термического к.п.д. установок изотермического деформирования.

Практическая ценность. Выявлены технологические преимущества объемной изотермической штамповки перед обычной горячей штамповкой, определены области ее использования. Разработаны расчетные методики для установления оптимальных режимов изотермической штамповки, обеспечивающих получение качественных поковок и высокую стойкость штампа при максимальной производительности. Определено влияние различных технологических факторов на свойства и качество поковок.

Даны рекомендации по выбору оптимальной конструкции инструмента для штамповки и технологических смазок. Проведено обоснование моделирования процессов изотермического деформирования.

Установлена принципиальная возможность штамповки малопластичных литейных сплавов типа силуминов. Исследованы физико-механические свойства и некоторые эксплуатационные характеристики высококремнистых силуминов после изотермической деформации. Разработана методика теплового и электрического расчета установок изотермического деформирования с нагревом сопротивлением и индукционным нагревом; даны рекомендации по их совершенствованию.

Реализация работы в промышленности. Результаты работы использованы при совершенствовании технологических процессов штамповки титановых сплавов и конструкций установок изотермического деформирования; при разработке процесса изотермической штамповки поковок дисковых фрез из быстрорежущих сталей, поковок поршней из высококремнистых силуминов; при создании технологического процесса термомеханической обработки деталей из легированных латуней для узлов гидротрансмиссии к тракторам. Годовой экономический эффект от внедрения результатов работы составляет более 500 тыс. руб.; от внедрения изобретений, связанных с изотермической штамповкой – около 200 тыс. руб.; ожидаемая эффективность – более 500 тыс. руб.

Публикация и апробация работы. Основное содержание работы опубликовано в 2 монографиях, 34 научных статьях, получено 11 авторских свидетельств на изобретения. По результатам работы сделаны доклады на всесоюзных научных конференциях "Закономерности формирования структуры сплавов эвтектического типа", Днепропетровск, 1982, "Теплофизика технологических процессов", Ташкент, 1984, двух республиканских конференциях, Кишинев, 1984, на научно-технических конференциях и семинарах в МАМИ, 1982, МИСиС, 1983, МВТУ им. Н.Э.Баумана, 1983, на научно-техническом совете ВНИИМОТОПРОМ, 1985.

Объем работы. Диссертация изложена на 274 листах машинописного текста, содержит 17 таблиц, 125 рис. и состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка использованных источников в количестве 166 наименований

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Обоснована актуальность темы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, содержатся основные положения, выносимые на защиту.

Состояние вопроса и задачи исследования. Указаны основные недостатки традиционных технологических процессов горячей объемной штамповки в холодном или подогретом до невысокой температуры инструменте, связанные с охлаждением поковки в процессе деформирования: необходимость нагревать заготовку до более высокой температуры, чем это требуется для деформации, повышенный расход энергии для нагрева, огрубление структуры поковки, повышенное окалинообразование, понижение пластичности металла поковки, увеличение деформирующих усилий, понижение точности поковок, уменьшение стойкости штампов из-за отпуска или интенсивного разгара, резкая неравномерность деформации, нестабильность температурных условий работы смазки и невозможность применения в некоторых случаях наиболее эффективных стеклосмазок, эмалей и других составов. Освещены работы в области горячей объемной штамповки, в которых прослеживается тенденция к сохранению теплоты заготовки при переносе ее от нагревательного устройства к деформирующему оборудованию и в процессе деформации путем применения защитно-смазочных покрытий, подогрева штампов и использования теплового эффекта деформации. Изотермическая штамповка является логическим завершением этой тенденции.

Большой вклад в развитие изотермической штамповки внесли советскими исследователями С.З.Фиглиным, В.В.Бойцовым, А.В.Бахаревым, Д.В.Джуромским, Д.И.Каплиным, А.А.Валкаловым, Б.Д.Копыским, В.Ф.Кушниром, В.А.Кобыновым, В.С.Нестеровым и др. Она применяется при штамповке титановых сплавов, ряда сталей, в том числе быстрорежущих, алюминиевых, магниевых и медных сплавов, а также жаропрочных сплавов на никелевой основе как в СССР, так и за рубежом. Имеется так-

же опыт деформирования деталей из малопластичных материалов, в частности из серого чугуна. Технологический процесс изотермической штамповки характеризуется, как правило, меньшим числом штамповочных переходов. При этом весьма эффективно работают смазки типа стекол, эмалей. Для создания изотермических условий используют установки изотермического деформирования, состоящие из нагревательного блока и систем питания, терморегулирования и охлаждения. Существуют установки с индукционным нагревом, нагревом сопротивлением (спиралями или силитовыми стержнями), с газовым нагревом и др. В качестве штампов применяют как жаропрочные сплавы на никелевой или молибденовой основе, так и обычные штамповые стали (для деформирования легких сплавов).

Практически только в изотермических условиях возможно осуществление объемной штамповки в состоянии "сверхпластичности"; исследованию этого вопроса и разработке соответствующих технологических процессов посвящены работы О.М.Смирнова, Л.В.Сурмача, А.С.Базыка и др. То же относится и к деформированию вращающимся бойком в горячем состоянии (работы В.М.Субича, Б.А.Степанова и др.), штамповке при пульсирующем нагружении и другим процессам, требующим длительного контакта металла заготовки с инструментом.

В этой же главе проанализированы основные методы теоретического исследования процессов горячей объемной штамповки, созданные С.Я.Губкиным, М.В.Сторожевым, Е.П.Унковым, Е.И.Семеновым и др., а также многими иностранными учеными. Показано, что для металла, поведение которого описывается схемой вязкого тела, наиболее перспективно применения метода баланса работы (или мощности), в создании и развитии которого решающий вклад сделал И.Я.Тарновским, А.А.Поздеевым, О.А.Ганаго, Л.Г.Степановым, В.П.Доброхотовым, Б.Авицуром и др. Работы этих ученых являются основой определения деформирующих усилий процессов изотермического деформирования.

Освещены также фундаментальные исследования пластичности металлов, выполненные В.Л.Колмогоровым, А.А.Богатовым и их школой, Г.Д.Делем, В.А.Огородниковым, Б.Е.Хайкиным, И.А.Кийко и др., а также исследования теплового эффекта деформации Л.Г.Степановского, Р.И.Непершина и др., использован-

ние и развитие в настоящей работе.

Технологические процессы изотермического деформирования можно разбить на три основные группы:

1) обработка малопластичных металлов: литейных алюминиевых сплавов, бронз, чугуна, жаропрочных сплавов на никелевой основе;

2) штамповка металлов, имеющих высокое сопротивление деформированию: многих титановых и жаропрочных сплавов, быстрорежущих и углеродистых инструментальных сталей;

3) обработка сплавов с узким температурным интервалом деформирования: некоторых титановых сплавов и других металлов.

В связи с этим выявляются три подхода к установлению оптимальных термомеханических режимов деформации и соответствующие им направления научных исследований:

1) исследование пластичности металлов в горячем состоянии и выбор термомеханических режимов, обеспечивающих деформацию без разрушения;

2) определение усилий штамповки и выбор термомеханических режимов, соответствующих оптимальному соотношению между стойкостью штампов и производительностью процессов;

3) расчет изменения температуры заготовки в результате теплового эффекта деформации, выбор режимов, обеспечивающих деформацию в заданном температурном интервале.

К актуальным задачам, связанным с развитием технологии изотермической штамповки, относится также разработка рекомендаций по совершенствованию установок изотермического деформирования.

Исследование пластичности металлов при изотермическом деформировании. В настоящей работе предложено оценивать технологический процесс, следуя В.Л. Колмогорову, по степени использования запаса пластичности $\psi < 1$. Принято, что дифференциал степени использования запаса пластичности

$$d\psi = d\psi_a - d\psi_p, \quad (1)$$

где $d\psi_a$ - дифференциал степени использования запаса пластичности при деформировании без учета разупрочнения; $d\psi_p$ -

то же за счет разупрочнения.

Если исходить из критерия В.Д.Колмогорова - А.А.Богатова, предполагающего нелинейный характер накопления повреждений в металле при деформации,

$$d\psi_2 = \frac{a \varepsilon \psi^{\frac{a-1}{2}} dt}{\lambda_n},$$

где ε - скорость деформации; t - текущее время; λ_n - предельная деформация при деформировании со скоростью, при которой восстановление запаса пластичности пренебрежимо мало; $a > 1$ - коэффициент.

Для случаев деформирования, когда структура металла в процессе штамповки существенно не изменяется, а процесс нагружения - непрерывный и монотонный или квазимонотонный, принято

$$d\psi_p = B(\psi) dt,$$

где $B(\psi)$ - функция, определяемая экспериментально.

Установлено, что $B(\psi) = b(\psi - \psi_m^2)$, где ψ_m - максимальное значение степени использования запаса пластичности в процессе предшествующего нагружения; b - коэффициент.

Величина λ_n аппроксимируется зависимостью

$$\lambda_n = A \left(\frac{1}{K - K_n} - \frac{1}{K_x - K_n} \right),$$

где $K = \frac{\sigma}{\sigma_i}$ - показатель напряженного состояния; σ - среднее напряжение; σ_i - интенсивность напряжений; K_n - показатель напряженного состояния, при котором пластичность металла становится неограниченно большой при любой скорости деформации; K_x - показатель, при котором металл ведет себя как хрупкое тело; A - коэффициент.

Поскольку функции $\psi = \psi(t)$, $K = K(t)$ (здесь ψ - деформация) предполагаются известными, можно интегрировать уравнение (I) при начальном условии $\psi = 0$ при $t = 0$. Теоретически разрушения металла не произойдет, если в течение всего процесса штамповки во всех точках поковки $\psi < 1$.

Для определения коэффициентов A , K_n , K_x , a , b , входящих в критерий пластичности, проведены испытания

некоторых сплавов (силуминов с содержанием кремния 12 и 18%) на кручение, растяжение и сжатие при температуре 420 - 480°C. При кручении испытуемый образец находится между подвижным и неподвижным захватами в замкнутой камере, которая подогревается до температуры испытания с помощью установки изотермического деформирования с индукционным нагревом. Крутящий момент на подвижный захват передается от электродвигателя через ременную передачу, две коробки передач и зубчатую пару. Коробки передач позволяют регулировать скорость деформации на поверхности образца в пределах от 0,0154 до 2,85 с⁻¹. Для измерения крутящего момента на валу, соединяющем коробку передач с зубчатой парой, наклеены тензодатчики сопротивления. Использовали также специальный тензоэлемент, устанавливаемый между подвижным захватом и испытуемым образцом. Тензодатчики через усилитель соединены с осциллографом НО54.1.

Для вязкого металла, сопротивление деформированию σ , которого зависит от интенсивности скоростей деформации $\dot{\epsilon}$, согласно зависимости

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^n, \quad (2)$$

где σ_0 - сопротивление деформированию при скорости деформации $\dot{\epsilon}_0$, n - коэффициент, - крутящий момент при скручивании образца диаметром d и длиной рабочей части L определяется как

$$M = \frac{\pi \sigma_0 d^3}{4 \cdot 3^{\frac{n+1}{2}} (n+3)} \left(\frac{\omega d}{2 \dot{\epsilon}_0 L} \right)^n, \quad (3)$$

где ω - угловая скорость вращения подвижного захвата.

Формула (3) позволяет определять параметры σ_0 , $\dot{\epsilon}_0$, n испытуемых материалов.

Растяжение и сжатие образцов проводили на универсально-испытательной машине, имеющей регулируемую скорость деформирования от 0 до 2 мм/с, и на кривошипном прессе с числом ходов 80 в мин. Для поддержания приблизительно постоянной скорости деформации при работе на испытательной машине скорость движения траверсы корректировали по мере растяжения или осадки образца. С этой же целью растяжение на кривошипном прессе осуществляли с помощью реверса на участке хода

ползуна с возрастающей скоростью его движения, а сжатие - в конце рабочего хода. Диапазон исследованных скоростей деформации - от 0,01 до 25 с⁻¹. Усилие деформирования контролировали с помощью силоизмерителя машины или мессдозы.

Образцы изготавливали из прессованного прутка и нагревали непосредственно на испытательной машине в контейнере с помощью индуктора до температуры 420 и 480 °С. Контроль и поддержание постоянной температуры осуществляли терпарой и терморегулятором. Показатель напряженного состояния при растяжении составлял +0,4; при сжатии - в среднем -0,2. Полученные данные представлены в табл.

Таблица

Сплав	Температура, °С	α	β	A	K_x	K_n
АЛ25,	420	2	0,024	9,1	0,85	-1,8
12% S:	480	2	0,0225	10,0	1,0	-1,74
КС-740,	420	2	0,043	15,2	0,65	-3,23
18% S:	480	2	0,041	10,3	0,65	-2,27

При неоднородно напряженно-деформированном состоянии очаг деформации разбивается на несколько небольших элементов, для которых вычисляют вероятность неразрушения p_i . Затем находят вероятность неразрушения всей поковки:

$$P = p_1 \cdot p_2 \cdots p_i \cdots$$

Методом измерения искажений координатной сетки при поэтапной деформации поковки поршня с малой скоростью, заведомо обеспечивающей деформацию без разрушения, определены значения φ , K , ψ в точках ожидаемого разрушения. Выбрав точку, в которой ψ принимает максимальное значение, с использованием уравнения (1) находим зависимость максимально допустимой скорости деформирования от температуры деформации.

Исследование деформирующих усилий и теплового эффекта деформации. При расчете деформирующих усилий принято, что сопротивление деформированию металла - переменное по очагу и в каждой точке очага связано с интенсивностью скоростей деформации зависимостью (2). Анализ силовых характеристик

для операций осадки, выдавливания, облойной и безоблойной штамповки проведем методом баланса мощности, т.е. равенства мощности активных сил и сил сопротивления, действующих в заготовке при пластической деформации.

Применение этого метода требует выбора кинематически допустимого поля скоростей в очаге деформации. Обычно выбирают поля скоростей, допускающие разрывы касательной к границе очага составляющей скорости. Однако при определении усилий деформирования вязкого металла это допущение приводит к бесконечно большой мощности на такой границе. Поэтому в настоящей работе предполагается, что на границах очага деформации расположены переходные зоны конечной ширины.

Если нормальная составляющая скорости на границе не обращается в нуль, то при течении металла в переходной зоне по дуге окружности интенсивность скоростей деформации

$$\dot{\epsilon}_i = \frac{v_i}{\sqrt{3} r \cos^3 \alpha}$$

Учитывая, что $\dot{\epsilon}_i = \dot{\epsilon}_0 \left(\frac{\dot{\epsilon}_i}{\dot{\epsilon}_0} \right)^n \exp[m'(T_0 - T)]$ (по Л.А.Шофману), где T - температура; m' , $\dot{\epsilon}_0$, $\dot{\epsilon}_{i0}$, T_0 - параметры материала, получим значение удельной мощности (мощности, отнесенной к единице поверхности очага деформации), развиваемой в переходной зоне,

$$n_i^* = \frac{\dot{\epsilon}_0 v_i^{n+1}}{3^{\frac{n+1}{2}} \dot{\epsilon}_{i0}^n} \int_0^{\alpha_2} \frac{d\alpha}{\left(\frac{\dot{\epsilon}_0 v_i^n}{3^{\frac{n+1}{2}} \dot{\epsilon}_{i0}^n c \mu} \int_0^{\alpha} \frac{d\alpha}{\cos^{\frac{3n+2}{2}} \alpha} + r \eta \cos^{\frac{3n+2}{2}} \alpha \right)}$$

где c и μ - удельная теплоемкость и плотность деформируемого металла.

Для изотермических условий приведенное значение касательного напряжения на границе

$$\tau_{sn} \approx \frac{\dot{\epsilon}_0}{\sqrt{3}} \left(\frac{v_i}{\dot{\epsilon}_{i0} r} \right)^n$$

При нормальной составляющей скорости по обе стороны границы, равной нулю,

$$\tau_{sn} = \frac{\dot{\epsilon}_0}{3^{\frac{n+1}{2}}} \left(\frac{v}{\dot{\epsilon}_{i0} b} \right)^n$$

Величины γ и δ выбираются с учетом геометрии очага деформации на основе экспериментальных данных; верхнюю оценку $\bar{\epsilon}_{sn}$ можно получить также из феноменологической теории напряжения течения. По М.А.Большановой

$$d\sigma_i = d\sigma_1 + d\sigma_2,$$

где $d\sigma_1$ - деформационное упрочнение; $d\sigma_2$ - разупрочнение в условиях горячей деформации.

Наилучшим образом экспериментальным данным отвечает форма

$$d\sigma_i = A^{\frac{1}{n}} (\sigma_i - \sigma_H)^{\frac{n-1}{n}} \epsilon_i dt - c (\sigma_i - \sigma_H) dt,$$

где σ_H , A , c , n - параметры металла, откуда при $\gamma=0$

$$\bar{\epsilon}_{sn} = \frac{1}{\sqrt{3}} \left[\sigma_H + \frac{A \sigma_H^{\frac{n}{2}} \alpha_2}{3^{\frac{n}{2}} (n+1)} \right].$$

Для определения коэффициентов, входящих в зависимость (2), ряд сплавов был подвергнут испытанию на растяжение, сжатие и кручение. При испытании на сжатие использовали метод осадки цилиндрических образцов и образцов с выточкой, заполненной смазкой. Однако не всегда удается подобрать нужную смазку. Поэтому был разработан метод построения кривых упрочнения осадкой на шероховатых бойках, заключающийся в том, что для какого-либо эталонного металла, кривая упрочнения которого известна, строят зависимость удельного усилия от деформации, а затем выделяют ту часть удельного усилия, изменение которой связано с изменением формы образца. Эта доля удельного усилия одинакова для любых металлов, деформирование которых проходит в тех же условиях, что и осадка эталонного образца. Таким образом, построив зависимость удельного усилия испытуемого металла от деформации, можно выделить часть удельного усилия, связанного с упрочнением. Этим методом построены кривые упрочнения некоторых сталей и алюминиевых сплавов.

Определение деформирующих усилий позволило получить зависимости, которые можно обобщить формулой

$$P = F K \sigma_0 \left(\frac{v}{\epsilon_{10} B} \right)^n,$$

где v - скорость деформирования, F - площадь поковки в плане, B - один из размеров поковки (обычно максимальный), K - фактор, зависящий от схемы процесса.

При осадке поле скоростей выбрано по рекомендациям

И.Я.Тарновского и др. При $\frac{d}{H} < 6$

$$K = 1 + 0,013 \frac{d}{H} + 0,0007 \left(\frac{d}{H} \right)^2,$$

при $\frac{d}{H} > 6$

$$K = 1 + \frac{\mu}{3} \frac{d}{H},$$

где d и H - диаметр и высота поковки; μ - к-т трения.

Так как скорость деформирования поковки зависит от жесткости применяемого оборудования, а также от утечек из гидросистемы (при применении гидропресса), то и усилие зависит от этих величин. Учет жесткости системы g приводит к следующей формуле:

$$V \approx V_n \frac{H_0 H_K}{H_0 - H_K + \frac{P_M}{g}},$$

где H_0 и H_K - начальная и конечная высота заготовки; V_n - скорость движения ползуна, задаваемая кинематикой машины или производительностью насоса; P_M - усилие осадки, рассчитанное в предположении $V = V_n = \text{const}$. Получена также формула для определения максимального усилия при осадке на кривошипном прессе.

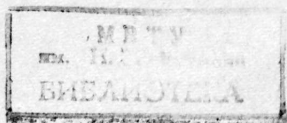
При анализе прямого выдавливания прутков и труб, а также обратного выдавливания использована схема радиального течения металла в очаге деформации (для первого случая - в сферических координатах, для второго и третьего - в торoidных). Определена величина K :

$$K = \frac{a(\lambda^{\beta n} - 1)}{n},$$

где для прямого выдавливания прутков $a = 1$; $\beta = 1,5$; для труб $a = 0,95$; $\beta = 2$; для обратного выдавливания $a = 1,1$; $\beta = 2$; λ - вытяжка.

Результаты экспериментов по проверке полученных формул хорошо совпадают с расчетными значениями усилий.

Сечение очага деформации при облойной штамповке представлено в виде двух трапеций, соприкасающихся большими основаниями, а течение металла в очаге принято радиальным в сходящемся канале. При высоте поковки, превосходящей толщи-



ну очага деформации,

$$K = \frac{1,5}{h} \left[\left(1 + 0,4 \frac{B}{H_3} \right)^{2h} - 1 \right] \left[0,8 + 0,2 \left(1 - \frac{B}{L} \right) \right],$$

где B и L - ширина и длина поковки; H_3 - высота мостика заусенечной канавки.

Получены также формулы для определения усилия штамповки поковок малой толщины, а также максимального усилия при деформировании на кривошипном прессе. Экспериментальная проверка подтверждает работоспособность полученных формул.

Принята схема радиального течения металла в угол штампа при закрытой штамповке. Получено:

$$K = \frac{11(\lambda^{2h} - 1)}{h}; \quad \lambda = \frac{D^2}{4Dh - 4h^2},$$

где D - диаметр поковки; h - радиус закругления угла поковки.

Получены также формула для нахождения максимального усилия штамповки при использовании кривошипного пресса и зависимость радиуса закругления угла от времени выдержки поковки при постоянном усилии ("крип-штамповки"). Формулы проверены экспериментом.

При изотермической штамповке возможно заметное повышение температуры заготовки из-за тепловыделения при деформировании, так как теплопровод от заготовки в процессе штамповки незначителен. Для обеспечения деформирования в заданном температурном интервале скорость штамповки должна быть ограничена. Для выбора оптимальных режимов проведем расчет повышения температуры заготовки при деформации при следующих основных допущениях:

1) равномерное распределение температуры в очаге деформации;

2) тепловой поток от заготовки в штамп подчиняется закону Ньютона:

$$q = \alpha (T - \bar{T}_w),$$

где α - коэффициент теплоотдачи; T и $\bar{T}_w$ - соответственно средняя температура металла поковки и штампа.

Из уравнения теплового баланса заготовки в процессе

деформации получены формулы для определения температуры поковки в конце штамповки; при осадке

$$T = \bar{T}_ш + \frac{q}{b} [1 - \exp(-bt)],$$

$$a = \frac{50 \varepsilon_{ik}^{n+1}}{c \gamma \varepsilon_{i0}^n} \left(1 + \frac{n}{3} \frac{d_k}{H_k} \right); \quad b = ma + \frac{2\alpha}{H_k c \gamma}; \quad \varepsilon_{ik} = \frac{v}{H_k};$$

при выдавливании прутков

$$T = \bar{T}_ш + \frac{2 q_0}{2 c \gamma + q_0 m + \alpha \frac{\lambda - 1}{\lambda v \sin \theta_1}},$$

где q_0 - удельное усилие выдавливания, определенное для $T = \bar{T}_ш$; m - коэффициент, учитывающий влияние температуры на сопротивление металла деформированию; θ_1 - угол матричной воронки.

Аналогичные зависимости найдены также для процессов прямого выдавливания труб, обратного выдавливания и облойной штамповки. Найдены также усилия штамповки с учетом тепловыделения при деформации.

Формулы проверены методом фотографирования заготовок в процессе деформирования на спектрозональную пленку.

Из условия $\frac{dp}{d\theta_1} = 0$ найдены углы матричных воронок при прямом выдавливании и конусности пуансона при обратном выдавливании, обеспечивающие минимальное усилие штамповки. Теоретически определен также профиль пуансона для сквозного прямого выдавливания, обеспечивающий получение стыка между отдельными прутками без пресс-утяжки.

При анализе факторов, связанных со стойкостью штампов изотермического деформирования, необходимо учитывать местное и кратковременное повышение температуры их поверхности в результате трения металла об инструмент. В связи с этим установлены величины тепловых источников на контактной поверхности при осадке, выдавливании и облойной штамповке на различных видах оборудования, найдены наиболее нагруженные в тепловом отношении точки штампа и установлена температура в этих точках. При этом были использованы как готовые решения теории теплопроводности, так и решены некоторые новые задачи методом преобразования Лапласа.

Полученные решения позволили разработать методику выбора оптимальных режимов деформации из условий обеспечения высокой стойкости штампа и деформирования в заданном температурном интервале при максимальной производительности:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} = [\sigma] \\ T = T_b \end{cases}, \quad (4)$$

где $[\sigma]$ - несущая способность штампа с учетом местного разогрева его поверхности; T_b - верхняя граница температурного интервала деформирования.

По уравнениям (4) построены зависимости оптимальных значений скорости деформации и температуры нагрева заготовки и штампа от требуемой величины деформации. Для ориентировочного выбора температуры нагрева штампов можно также пользоваться зависимостью $\frac{\sigma}{\sigma_{пл}}$ от T , где $\sigma_{пл}$ - предел пропорциональности материала штампа. Оптимальной является такая температура, при которой обеспечивается минимальное значение $\frac{\sigma}{\sigma_{пл}}$.

Применение стеклосмазки, работающей в оптимальных температурных условиях, позволяет во многих процессах изотермического деформирования достичь режима гидродинамического трения на контактных поверхностях, что обеспечивает низкое значение коэффициента трения. Для исследования трения в работе применен усовершенствованный метод осадки кольцевых образцов, распространенный на деформацию вязких тел; учтено также влияние на получаемые значения коэффициента трения возможной разницы температуры образца на контактной поверхности и вдали от нее. Этим методом проведена оценка различных смазок для изотермической штамповки.

Разработка, исследование и внедрение технологических процессов изотермического деформирования. Полученные результаты использованы при разработке и внедрении в производство технологических процессов изотермической штамповки малопластичных и труднодеформируемых сплавов, а также сплавов с узким температурным интервалом штамповки.

Впервые в отечественной практике разработан техпроцесс штамповки поковок поршней двигателей внутреннего сгорания из жаропрочных легированных силуминов АЛ25 и КС-740 с содержанием кремния 12 - 19%. Из-за низкой пластичности эти

сплавы относятся к группе литейных сплавов и ранее обработке давлением не подвергались. Обладая наилучшим коэффициентом линейного расширения, высококремнистые силумины в литом состоянии имеют низкий предел выносливости. Кроме того, литье поршней сопровождается большим браком по пористости.

Разработаны и испытаны два варианта технологического процесса штамповки. Вариант первый: исходная заготовка - прессованный пруток. Техпроцесс включает следующие основные операции: отрезка заготовок, нагрев, изотермическая штамповка в один или два перехода на кривошипном прессе, обрезка заусенца. Вариант второй: исходная заготовка - отливка. Технологический процесс отличается тем, что штамповка проводится не менее чем в два перехода для лучшей проработки структуры в донной части поршня.

Исследован и освоен процесс прессования высококремнистых силуминов. После деформации свойства металла существенно улучшаются: увеличивается предел выносливости на 50%, прочность и пластичность сплава, а также теплопроводность (на 6 - 10%), что играет важную роль по снижению теплонпряженности поршня при работе на двигателе. Проведенные испытания физико-механических свойств силуминов позволили определить минимальное значение деформации, в результате которой литой сплав приобретает свойства деформированного.

Исследованы различные технологические смазки при штамповке и даны рекомендации по их выбору. Разработан штамп для изотермической штамповки поршня (а.с. № 969410), на заводе им. Дзержинского ПО "Киевтрактородеталь" создан участок изотермической штамповки поковок поршней диаметром 110 мм двигателя Д-240 на базе кривошипного прессы усилием 4 МН с числом ходов 18 в мин.

Применение штамповки вместо литья позволяет изменить конструкцию поршня, что дает значительную экономию дизельного топлива при эксплуатации двигателя.

Освоен и внедрен на спортивных машинах технологический процесс штамповки поковок поршней отечественных мотоциклов из сплава КС-740, включающий следующие операции: отливку слитков диаметром 110 мм, прессование прутков диаметром 55 мм, отрезку заготовок, штамповку в один или два перехода

на гидравлическом прессе усилием 2 МН. При испытании на стендовом двигателе и в дорожных условиях штампованные поршни обнаруживают значительно более высокие эксплуатационные характеристики, чем литые.

Значительный эффект обеспечивает применение изотермической штамповки для изготовления поковок дисковых фрез из быстрорежущей стали Р6М5. Испытаниями на растяжение, сжатие и кручение установлен оптимальный температурный интервал штамповки этой стали (ниже точки начала $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения), найдены значения сопротивления деформированию при различных скоростях деформации. В связи с тем, что найденный температурный интервал штамповки очень узок (не более 50°C), штамповка поковок дисковых фрез малой толщины возможна только в изотермических условиях.

Штамповка проводится за один или два перехода на гидравлическом прессе усилием 6,3 МН с применением стеклосмазки. Измерение твердости поковок после штамповки показывает, что температура нагрева и деформации $750 - 800^{\circ}\text{C}$ обеспечивает получение минимальных значений твердости ($\text{HRC} = 16 + 22$), что позволяет проводить обработку поковок резанием без предварительной разупрочняющей термической обработки. Изучение микроструктуры исходной заготовки иковки фрезы обнаружило интенсивное дробление карбидов при деформации, в результате чего карбидная неоднородность быстрорежущей стали уменьшается на 2 - 3 балла, а стойкость режущего инструмента на операциях фрезерования увеличивается в 1,5 - 1,7 раза.

Многие детали гидроаппаратуры, изготавливаемые из латуни, работают в условиях высоких циклических нагрузок, что требует повышенных механических характеристик применяемых материалов и предъявляет высокие требования к структуре металла. Разработан технологический процесс изотермической штамповки приставного дна к аксиально-поршневой машине, который предусматривает деформацию с последующей закалкой. Такая технология обеспечивает получения мелкозернистой структуры и значительное увеличение работоспособности детали и всего изделия. Термомеханическая обработка латуни при штамповке приставного дна в обычных условиях невозможна из-за очень узкого интервала температур закалки ($700 - 730^{\circ}\text{C}$) и

быстрого охлаждения заготовки в холодном штампе.

Штамповка осуществляется на кривошипном горячештамповочном прессе усилием 10 МН. После штамповки, совмещенной с закалкой, проводят холодную обрезку заусенца на прессе усилием 1,6 МН и старение. В штампе к КГШП 10 МН предусмотрено 4 индуктора для нагрева штамповых вставок, теплоизолированных от остальных деталей штампового блока.

Определенные трудности при внедрении процессов изотермической штамповки встречаются в связи с отсутствием единой методики теплового и электрического расчета установок изотермического деформирования. В настоящей работе предложена такая методика. Расчет заключается в определении потерь теплоты нагреваемым узлом при работе в стационарном режиме, нахождении термического к.п.д. установки при ее разогреве и нахождении электрических параметров установки. Получена формула для вычисления средней мощности, подводимой к нагреваемому узлу при разогреве установки:

$$P = \frac{Q}{1 - \exp \frac{Q t}{G c (T_0 - T_K)}}$$

где Q - тепловые потери установки при работе в стационарном режиме; t - время нагрева установки от температуры T_0 до T_K ; G - масса нагреваемого узла; c - средняя удельная теплоемкость нагреваемого металла.

По предложенной методике проведем расчет установок различных типов и оценена эффективность различных мероприятий по их совершенствованию: улучшения теплоизоляции нагреваемого узла, увеличения выходного напряжения понижающего трансформатора, применения нагрева сопротивлением вместо индукционного нагрева, использования в установках с индукционным нагревом индуктора, изготовленного из профиля специальной формы, замены цельного муфеля из жаропрочного сплава муфелем сборной конструкции, имеющим обойму из магнитного материала, применения магнитопровода С-образной формы, использования для нагрева тока высокой частоты.

Расчетные методики для нахождения оптимальных технологических параметров и рекомендации по совершенствованию установок изотермического деформирования внедрены в промышленнос-

ти. Суммарный годовой экономический эффект от внедрения составляет более 500 тыс. руб.

В заключение работы проанализированы технико-экономические показатели изотермической штамповки: повышение качества поковок, улучшение условий труда, сокращение расхода металла за счет уменьшения припусков на обработку резанием и напусков (штамповочных уклонов, пленок под пробивку и т.п.) на 20 - 70 %, уменьшение трудоемкости обработки резанием на 10 - 30 %, снижение расхода электроэнергии на 15 - 50 %. В то же время отмечается увеличение трудоемкости штамповки на 20 - 150 % и расходов на технологическую смазку. На основании анализа технико-экономических показателей определена область рационального применения изотермической штамповки:

- 1) деформирование малопластичных металлов, практически не поддающихся обработке давлением в обычных условиях;
- 2) штамповка заготовок с элементами небольшой толщины (высокими и узкими ребрами, тонкими полотнами), которые в обычных условиях можно получать только с большими напусками;
- 3) штамповка поковок повышенной точности, особенно для деталей из дорогостоящих металлов;
- 4) штамповка поковок крупногабаритных деталей, требующих при обычных условиях деформирования уникального оборудования;
- 5) штамповка поковок для изделий, к качеству и надежности которых предъявляют повышенные требования.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

I. Проведенные исследования и обобщение производственного опыта позволили установить уникальные возможности изотермической штамповки в отношении улучшения деформируемости малопластичных и высокопрочных сплавов. В условиях изотермической штамповки наблюдается значительное увеличение пластичности и снижение напряжений течения. Анализ состояния изучаемого предмета показал, что известные методы оценки этих возможностей не позволяют раскрыть их в полной мере; в ряде случаев это приводит к ошибочным выводам и крупным материальным потерям. Не определены с достижимой строгостью термомеханические режимы обработки, контактные напряжения, изменение пластичности, усилия штамповки и тепловой эффект деформации.

2. Показано, что учет влияния скорости деформации и неоднородности напряженно-деформированного состояния металла на пластичность вносит существенную погрешность в расчет предельных деформаций и не позволяет определить оптимальные термо-скоростные режимы штамповки. Разработан новый вариант феноменологической теории разрушения, учитывающий непрерывное уменьшение степени использования запаса пластичности из-за "залечивания" дефектов в процессе штамповки в условиях горячего деформирования, а также расчет предельной деформации при неоднородном напряженно-деформированном состоянии, основанный на вероятностном характере разрушения.

3. Установлено, что из известных факторов, влияющих на стойкость штампа, при изотермической штамповке основным фактором является соотношение между прочностью материала инструмента и контактными напряжениями. Эти напряжения необходимо рассчитывать с учетом влияния скорости на сопротивление деформированию, ярко проявляющегося в условиях изотермической штамповки. Разработан новый метод расчета, в котором принято переменное напряжение течения в очаге деформации как функция скорости деформации, а также учтены кинематические характеристики оборудования и его жесткость.

4. Для разработанных расчетных методик требуются уточненные данные о напряжении течения при горячей деформации. На основе представления о сопротивлении деформированию как о функционале, зависящем от пути деформирования, развита феноменологическая теория напряжения течения при горячей деформации. В результате получено универсальное выражение, позволяющее определять напряжение течения в процессах с быстрым изменением скорости и других частных случаях. Предложен новый метод построения кривых упрочнения осадкой на шероховатых бойках, рекомендуемый для испытаний в условиях, когда применение других методов встречает затруднения.

5. Обнаруженные закономерности, присущие изотермической штамповке (высокая однородность деформации и теплоизолирующее действие применяемых защитно-смазочных покрытий), позволили принять новые допущения в тепловых расчетах и получить аналитические зависимости для основных технологических операций с учетом влияния температуры на сопротивление деформированию и теплоотвода в штамп. Такие зависимости позволяют выбрать оптимальные

термомеханические режимы изотермической штамповки.

6. Имели место недостаточно точные представления о роли смазки, условиях на контакте заготовки со штампом и значениях коэффициента трения. Разработана методика выбора скорости деформирования, обеспечивающей режим жидкостного трения, с учетом вязкости применяемой смазки. Установлено, что для определения коэффициента трения при горячей штамповке методом осадки кольцевых образцов необходимо учитывать реологические характеристики обрабатываемого металла, а также различие температуры на контактной поверхности и внутри нее. Метод осадки кольцевых образцов усовершенствован и распространен на условия изотермической штамповки.

7. В результате разработки и решения перечисленных задач созданы научные основы технологии изотермической штамповки. Решена научно-техническая проблема: комплексная разработка высокопроизводительных и экономичных технологических процессов изотермической штамповки деталей повышенной надежности из малопластичных, труднодеформируемых, дорогостоящих и дефицитных сплавов для изделий новой техники и установок изотермического деформирования.

Научно обоснованный выбор термомеханических режимов деформации позволил разработать, освоить и внедрить в производство новые и оптимизировать существующие технологические процессы изотермической штамповки, а также рекомендации по совершенствованию установок изотермического деформирования, что обеспечило суммарный годовой экономический эффект более 500 тыс. руб.

Установлена область рационального применения изотермической штамповки.

Разработан и впервые в отечественной практике осуществлен технологический процесс штамповки поковок поршней из легированных силуминов с содержанием кремния более 12 % для двигателей внутреннего сгорания. Штампованные поршни внедрены на спортивных мотоциклах. Ожидаемая эффективность от внедрения технологии составляет более 500 тыс. руб.

Разработан и внедрен в производство процесс изотермической штамповки поковок дисковых фрез из стали Р6М5.

Внедрение 5 сделанных в процессе работы изобретений дало экономический эффект около 200 тыс. руб. в год.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах.

1. Бойцов В.В., Калпин Ю.Г., Фиглин С.З. Особенности изотермического прессования титановых сплавов. - Кузнечно-штамповочное производство, 1968, № 12, с. 7 - 10.
2. Бойцов В.В., Калпин Ю.Г., Фиглин С.З. Характер течения металла при прессовании титановых сплавов в изотермических условиях. - Кузнечно-штамповочное производство, 1971, № 11, с. 3 - 5.
3. Преимущества горячей изотермической штамповки /С.З.Фиглин, В.В.Бойцов, А.В.Бахарев, Ю.Г.Калпин. - Кузнечно-штамповочное производство, 1972, № 9, с. 6 - 9.
4. Процессы обработки сплавов на основе титана / Л.А.Никольский, С.З.Фиглин, В.В.Бойцов, Ю.Г.Калпин и др. - Кузнечно-штамповочное производство, 1973, № 3, с. 43 - 44.
5. Изотермическое деформирование серого чугуна /В.В.Бойцов, А.В.Бахарев, Ю.Г.Калпин и др. - Кузнечно-штамповочное производство, 1973, № 8, с. 12 - 14.
6. Тепловыделение на контакте между металлом и инструментом при горячей штамповке лопаток / Я.М.Охрименко, Н.А.Кравченко, Ю.Г.Калпин и др. - Известия вузов. Черная металлургия, 1974, № 1, с. 97 - 101.
7. Температура в приконтактной зоне штампов при штамповке лопаток из жаропрочных сплавов / Я.М.Охрименко, Н.А.Кравченко, Ю.Г.Калпин и др. - Известия вузов. Черная металлургия, 1974, № 3, с. 61 - 64.
8. Горячая изотермическая штамповка заготовок дискового инструмента из быстрорежущих сталей /И.А.Норицин, В.Ф.Кушпир, Ю.Г.Калпин и др. - Вестник машиностроения, 1974, № 4, с. 66-69.
9. Горячая штамповка и прессование титановых сплавов / Л.А.Никольский, С.З.Фиглин, Ю.Г.Калпин и др. М.: Машиностроение, 1975. - 286 с.
10. Фиглин С.З., Калпин Ю.Г., Бойцов В.В. Тепловыделение при изотермической осадке и прессовании. - Кузнечно-штамповочное производство, 1975, № 6, с. 9 - 11.
11. Температура в поверхностном слое инструмента при пассивном контакте со штампованной заготовкой / Я.М.Охрименко, Н.А.Кравченко, Ю.Г.Калпин и др. - Известия вузов. Черная металлургия, 1975, № 7, с. 116 - 118.
12. Бойцов В.В., Калпин Ю.Г., Фиглин С.З. О термомехани-

ческом режиме изотермического деформирования титановых сплавов. - Кузнечно-штамповочное производство, 1975, № 12, с. 1 - 3.

13. Калпин Д.Г., Вакалов А.А. Расчёт усилий закрытой штамповки поковок удлиненной формы. - Машины и технология обработки металлов давлением: Сб./ ОмПИ, 1975, с. 44 - 52.

14. Калпин Д.Г., Беликов Э.К. Определение усилия обратного изотермического выдавливания. - Научно-технический прогресс в автомобильной промышленности: Сб./ МАМИ, 1976, вып. 5, с. 65-67.

15. Калпин Д.Г., Елисеев Г.В. Определение коэффициента трения при горячей изотермической осадке. - Известия вузов. Машиностроение, 1976, № 5, с. 157 - 160.

16. Кутнир В.Ф., Лейшин В.Б., Калпин Д.Г. Возможности изотермической штамповки заготовок дисковых фрез из быстрорежущих сталей. - Технология производства, научная организация труда и управления, 1977, № 1, с. 9 - 12.

17. Калпин Д.Г., Кобяков В.А. Расчет усилия изотермической закрытой штамповки. - Теория и технология обработки металлов давлением: Сб./ КуАИ им. С.П.Королева, 1977, с. 46 - 50.

18. Герчиков А.Б., Калпин Д.Г., Елисеев Г.В. Исследование смазок для горячей штамповки. - Кузнечно-штамповочное производство, 1977, № 4, с. 17 - 19.

19. Изотермическое деформирование металлов / С.З.Фиглин, В.В.Бойцов, Д.Г.Калпин и др. - М.: Машиностроение, 1978. - 240 с.

20. Исследование пластичности сплава АЛ25 при горячей деформации / Д.Г.Калпин, Г.Б.Гершман, В.А.Кобяков и др. - Обработка металлов давлением в автомобилестроении: Сб./ МАМИ, 1978, вып. 1, с. 32 - 34.

21. Влияние смазочно-охлаждающей жидкости на стойкость тяжелонагруженных штампов / Д.В.Смирнова, Я.М.Охрименко, Д.Г.Калпин и др. - Кузнечно-штамповочное производство, 1978, № 10, с. 31 - 33.

22. Изотермическая штамповка поршней из сплава АЛ25 / Д.Г.Калпин, Г.Б.Гершман, В.А.Кобяков и др. - Кузнечно-штамповочное производство, 1979, № 2, с. 12 - 14.

23. Джуромский Ю.В., Калпин Д.Г., Агапов Н.А. Расчет термодинамических параметров при облойной изотермической штамповке. - Технология производства, научная организация труда и управления, 1980, № 4, с. 10 - 12.

24. Калпин Д.Г., Кобяков В.А. Особенности расчета устано-

вок для изотермического деформирования с индукционным нагревом. - Обработка металлов давлением в автомобилестроении: Сб./ МАМИ, 1980, вып. 2, с. 151 - 154.

25. Опыт штамповки поршней из литейного алюминиевого сплава АЛ25 / Д.Г.Калпин, Г.Б.Гершман, Е.В.Исаев и др. - Кузнечно-штамповочное производство, 1982, № 3, с. 11 - 12.

26. Калпин Д.Г. О выборе режимов деформации при горячей изотермической штамповке. - Технология, организация и экономика машиностроительного производства, 1982, № 8, с. 5 - 6.

27. Опыт изотермической штамповки автотракторных деталей из цветных металлов и сплавов / Д.Г.Калпин, Г.Б.Гершман, Е.В.Исаев и др. - Автоматизация процессов обработки металлов давлением в автомобилестроении: Сб./ МАМИ, 1983, с. 66 - 69.

28. Калпин Д.Г. Изотермическая штамповка поршней из высококремнистых силуминов. - Технология, организация и экономика машиностроительного производства, 1984, № 2, с. 5 - 7.

29. Калпин Д.Г. Критерий пластичности при горячей деформации. - Депонир. научн. работы / ВИНТИ, 1984, № 3 (149), №61ап-Д83.

30. Бойцов В.В., Изаков И.А., Калпин Д.Г. Оптимальная скорость деформирования при изотермической штамповке титановых сплавов. - Депонир. научн. работы / ВИНТИ, 1984, № 10 (156), № 153мп-84Деп.

31. Калпин Д.Г. Изотермическая штамповка поковок поршней из силуминов. - Высокопроизводительные металлосберегающие процессы обработки давлением: Тез. докл. респ. конф. - Кишинев, 1984, с. 132 - 133.

32. Калпин Д.Г., Гершман Г.Б. Применение изотермической штамповки для получения заготовок из цветных металлов в автотракторостроении. - Экономия материальных, трудовых и финансовых ресурсов путем применения в производстве порошковой металлургии, прогрессивных материалов, высокоэффективного оборудования и безотходной технологии: Тез. докл. респ. конф. - Кишинев, 1985, с. 53 - 55.

33. Навроцкий Г.А., Калпин Д.Г., Маслов Ю.В. Изотермическая штамповка сплавов с узким температурным интервалом деформирования. - Теплофизика технологических процессов: Тез. докл. VI Всес. конф. - Ташкент, 1984, с. 34.

34. Калпин Д.Г. О причинах брака при штамповке поршней из

высококремнистых силуминов. - Кузнечно-штамповочное производство, 1985, № 4, с. 26 - 29.

35. А.с. I59382. Способ пластического деформирования металлов и сплавов / С.З.Фиглин, А.Б.Герчиков, Д.Г.Калпин. - Оpubл. в Б.И., 1963, № 4.

36. А.с. 445503. Способ горячего изотермического прессования металлов / С.З.Фиглин, Д.Г.Калпин, В.В.Бойцов и др. - Оpubл. в Б.И., 1974, № 37.

37. А.с. 450632. Способ горячего изотермического прессования металлов / В.В.Бойцов, А.В.Бахарев, Д.Г.Калпин и др. - Оpubл. в Б.И., 1974, № 43.

38. А.с. 452407. Способ изготовления заготовок лопаток / А.В.Бахарев, В.В.Бойцов, Д.Г.Калпин и др. - Оpubл. в Б.И., 1974, № 45.

39. А.с. 485809. Способ получения изделий / С.З.Фиглин, В.В.Бойцов, Д.Г.Калпин и др. - Оpubл. в Б.И., 1975, № 36.

40. А.с. 668752. Устройство для нагрева штампов / В.В.Бойцов, Ю.В.Джуромский, Д.Г.Калпин и др. - Оpubл. в Б.И., 1979, № 23.

41. А.с. 969410. Штамп для получения полых поковок / Д.Г.Калпин, В.А.Кобяков, Е.И.Исаев и др. - Оpubл. в Б.И., 1982, № 40.

42. А.с. I015970. Способ нагружения ступенчатого пуансона при обратном выдавливании полых изделий / С.З.Фиглин, В.В.Бойцов, Д.Г.Калпин и др. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 17.

43. А.с. I061902. Штамп для изотермической штамповки / Ю.В.Джуромский, С.З.Фиглин, Д.Г.Калпин и др. - Оpubл. в Б.И., 1983, № 47.

44. А.с. I106572. Инструментальный узел устройства для изотермической штамповки / С.З.Фиглин, Д.Г.Калпин, В.В.Бойцов и др. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 29.

45. А.с. I127680. Штамп для изотермической штамповки / В.В.Бойцов, С.З.Фиглин, Д.Г.Калпин и др. - Оpubл. в Б.И., 1984, № 45.

Ротаметр

Объем 2,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 1325

Ротапринт МВТУ им. Н.Э.Баумана

Подписано к печати 21.11.1986г. ЛН° 44824