

с. 492/98

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

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

На правах рукописи

ГОЛОВИН Владимир Андреевич

УДК 621.735.016.3

АНАЛИЗ КИНЕМАТИКИ ТЕЧЕНИЯ И ДЕФОРМИРУЕМОСТИ
МЕТАЛЛОВ И РАЗРАБОТКА НОВЫХ МАЛООТХОДНЫХ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ
ШТАМПОВКИ

Специальность 05.03.05 – Процессы и
машины обработки давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Москва – 1988

Работа выполнена в Московском автомеханическом институте

Официальные оппоненты:

Заслуженный деятель науки и техники РСФСР,

доктор технических наук, профессор

Попов Е.А.

доктор технических наук, профессор

Соловцов С.С.

доктор технических наук, профессор

Луговской В.М.

Будущее предприятие - ПО ВАЗ, завод "Автономаль"

Защита состоится "14" декабря 1988 г. в 14³⁰ часов

на заседании специализированного совета Д.053.15.05 в

Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и

ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище

им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, г.Москва, 2-я Бауманская ул.,

дом. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке

Московского высшего технического училища им.Н.Э.Баумана.

мпларе, заверенный

пресу.

___ 198 __ г.

Овчинников А.Г.

тираж 100 экз.Объем 2 п.л.

М 492/98

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. "Основные направления экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года" предусматривают значительное повышение производительности, сокращение расхода материалов и энергии, получение полуфабрикатов и заготовок с заданными физико-механическими свойствами и структурой. Одно из фундаментальных направлений повышения качества продукции, сокращения расхода материалов и энергии, роста эффективности в целом как в металлообработке и машиностроении, так и в металлургии - широкое применение процессов холодной объёмной штамповки, дальнейшее расширение их технологических возможностей.

Современное состояние и дальнейшее развитие процессов холодной объёмной штамповки требуют рационального сочетания и совмещения существующих операций, создания новых комбинированных процессов, разработки методов повышения технологической деформируемости заготовок на основе оптимизации технологии их подготовки к штамповке и кинематики течения металла при деформации, обоснованного перехода к полугорячей штамповке. Это вызвано тенденциями к повышению сложности формы, увеличению массы штампуемых заготовок, к применению сплавов, обеспечивающих повышение эксплуатационных свойств деталей, что, как правило, снижает технологическую деформируемость исходных заготовок и эффективность применения процесса. Пуск в действие новых и расширение существующих мощностей по производству заготовок и деталей холодной объёмной штамповкой в различных отраслях машиностроения, разработка и обоснование технических параметров вновь создаваемого оборудования требуют решения ряда сложных технологических задач. Повышение сложности технологических задач в сочетании с тенденциями улучшения качества и ускорения проектных разработок вызывает необходимость применения научно-обоснованной методологии управления технологической деформируемостью, удовлетворяющей требованиям типизации технологических процессов, стандартизации инструмента, повышения технического уровня оборудования, применения ЭВМ для технологической подготовки производства. В связи с этим становится объективной необходимостью решение актуальной для металлообрабатывающего производства проблемы: создание и применение методологии проектирования процессов холодной объёмной штамповки, основанной на управлении определя-

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1492198

Головин В.А. Анализ кинемат

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

86
м 492198

щими параметрами технологической деформируемости, способствующей ускорению научно-технического прогресса заготовительного производства. Научная и практическая важность проблемы ставит её в ряд актуальных народно-хозяйственных задач. Основные этапы работы выполнены по плану научно-координационного совета по проблеме "Холодная объёмная штамповка" НТС Минвуза СССР в соответствии с программой ГИИТ при СМ СССР (проблема 0.16.01).

Цель работы. Разработка научно-обоснованных методов проектирования технологических процессов холодной объёмной штамповки, обеспечивающих расширение технологических возможностей процесса, увеличение экономии металла и энергии, сокращение расходов на инструмент и повышение качества штампованных заготовок деталей.

Методы исследований. Теоретический анализ проведен методами механики пластической деформации и разрушения, экспериментальные исследования — методами муаровых полос, координатной сетки, тензометрии, механических испытаний, металлографического анализа и фратографии изломов.

Достоверность результатов исследований. Подтверждена внедрением результатов исследований в промышленности. Обеспечена сочетанием методов теоретического анализа и экспериментальных исследований, сходимостью значений величин, полученных различными методами, большим объёмом полученной информации с последующей её обработкой с использованием ЭВМ.

Научная новизна. Разработана обобщенная теория процессов холодной объёмной штамповки, на основании которой проводится выбор и расчёт формоизменения за переход и маршрута формоизменения в целом, а также управление определяющими параметрами технологической деформируемости заготовок. Установлены взаимосвязь пластичности с кинетикой накопления повреждений и видом излома, технологический критерий оценки вида излома. Определены условия локализации деформации, потери пластической устойчивости, базирующиеся на анализе скоростного состояния частиц поля течения с учётом масштабного фактора. Получены уравнения, отражающие механику неравномерности деформации в интегральной и локальной формах.

Оригинальные и имеющие самостоятельное значение в теории холодной объёмной штамповки результаты работы:

— инженерная модель технологической деформируемости заготовок при холодной и полугорячей объёмной штамповке;

– физико-механический подход к решению задач по определению условий потери пластической устойчивости и наступления разрушения, основанный на анализе скоростного состояния частиц очага деформации и деформируемого тела в целом;

– методы и результаты поэтапного исследования неустановившихся стадий процесса формоизменения, базирующиеся на определении инвариантных показателей напряженного и деформированного состояния с учётом истории нагружения, масштабного фактора, как функции относительной протяженности зоны возможного разрушения, её изменения и миграции за время деформации, а также градиента деформации, деформационного упрочнения и условий трения;

– методика выбора способов и режимов повышения технологической деформируемости заготовок, основанная на управлении размерно-морфологическими параметрами структуры и кинематикой течения металла.

Практическая ценность. Создана научно-обоснованная методология решения технологических задач по выбору и расчёту переходов, конструкций рабочего инструмента и технических параметров необходимого оборудования. Для решения технологических задач разработаны: 1) способы заполнения сложных элементов полости штампа, основанные на оптимизации формы и размеров заготовки по величине интенсивности касательных напряжений в зонах затрудненной деформации; 2) классификатор технологической деформируемости заготовок в зависимости от физической природы и металлургического цикла производства металла, контактных условий, структурных и масштабного факторов; формоизменяющих операций по кинематике течения, неравномерности деформаций и относительным величинам инвариантов тензоров напряжений; заготовок и деталей по конструктивно-технологическому типу. Составлены таблицы и графики для их практического применения.

Методология и конструктивно-технологический классификатор вошли в справочную и другую фундаментальную литературу, методические рекомендации и РТМ Минавтопрома и Минстанкопрома используются при типизации технологических процессов и применении ЭВМ в технологической подготовке при холодной объёмной штамповке. Результаты работ отражены в учебных пособиях и курсах лекций для студентов специальности 0503 и 0577. Результаты исследований применены при разработке новых сплавов, обладающих заданными физико-механическими и технологическими свой-

ствами, новых технологических процессов холодной и полугорячей объёмной штамповки заготовок из сплавов черных и цветных металлов на ряде металлообрабатывающих и машиностроительных заводов. Приняты к внедрению более сорока процессов штамповки типовых деталей. Реальный экономический эффект от внедрения составляет более 500 тыс. рублей в год. Новизна в технологии штамповки и конструкции инструмента зарегистрирована во ВНИИГПЭ как изобретения.

Апробация работ. Основные результаты работ представлены на пяти Всесоюзных научно-технических конференциях и двадцати шести республиканских, межотраслевых, отраслевых и городских конференциях, семинарах и совещаниях в г.г. Москве, Ереване, Киеве, Кишинёве, Риге, Таллине, Ташкенте, Барнауле, Белебее, Воронеже и Омске.

Публикации. Научные и практические результаты исследований изложены в 129 работах, в том числе 12 книгах центральных издательств. Одна из книг переведена и издана в Польской Народной Республике. Общий объём публикаций – 260 п.л., в том числе без соавторов – 75 п.л.

Объём работы. Диссертация изложена на 230 страницах машинописного текста, содержит 37 рисунков, 4 таблицы и состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованных источников в количестве 248 наименований и двух приложений с описанием программ и материалами о реализации результатов исследований в промышленности.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Дальнейшее развитие процессов холодной объёмной штамповки неотделимо от состояния и развития теории обработки металлов давлением, базирующейся на механико-математической теории пластичности, физической и физико-химической теории деформации. Наибольший интерес для рассматриваемой проблемы имеют работы по теории обработки давлением Ю.А.Алюшина, К.Н.Богоявленского, О.А.Ганаго, С.И.Губкина, Г.Я.Гуна, Г.А.Деля, Е.М.Макушка, П.Г.Кириллова, В.Л.Колмогорова, П.И.Полухина, Е.А.Попова, И.П.Ренне, Г.А.Смирнова-Аллева, Л.Г.Степанского, И.Я.Тарновского, А.И.Целикова и др., по теории и практике процессов штамповки С.И.Губкина, А.З.Журавлёва, Е.И.Исаченко, А.А.Коставы, А.Д.Матвеева, Г.А.Навроцкого, А.Г.

Овчинникова, Л.В.Прозорова, Е.И.Семёнова, В.А.Тюрина, А.Э.Арте-
са, А.М.Дмитриева, В.В.Евстифеева, В.А.Евстратова и др., по экс-
периментальной механике – А.А.Богатова, В.К.Воронцова, С.И.Губ-
кина, Г.Д.Деся, В.Л.Колмогорова, П.И.Полухина, И.П.Ренне, Ю.С.Са-
фарова, В.М.Сегала, Г.А.Смирнова-Аляева, В.П.Чикидовского, Н.А.
Чичинева и др. Среди теоретических работ необходимо выделить
особо монографию А.Г.Овчинникова, в которой даны обобщающие ре-
шения задач для прямого, обратного и поперечного выдавливания.

Большое практическое значение при решении технологических
задач и разработке методологии проектирования процессов холод-
ной объёмной штамповки имеют теория деформируемости, инженерные
критерии устойчивости пластического течения, теплофизика процес-
сов, принципы технологической классификации и оптимального авто-
матизированного проектирования. Научные основы теории деформиру-
емости впервые сформулированы С.И.Губкиным. Дальнейшее развитие
эта теория получила в работах В.Л.Колмогорова и А.А.Богатова, Г.Д.
Деся и В.А.Огородникова, М.А.Зайкова и В.Н.Перетятко, А.А.Прес-
някова, Л.Д.Соколова и В.А.Скудникова, Л.Г.Степанского. Анализ кри-
териев устойчивости при растяжении положительных добавочных наг-
рузок Г.Закса, Г.Свифта и др. и положительность работы добавоч-
ных нагрузок Н.Н.Малинина и др. дан Г.Д.Делем. Наиболее близок к
рассматриваемой проблеме деформационный критерий А.Д.Матвеева.
Теплофизика процессов объёмной штамповки рассмотрена в работах
В.Ф.Трахтенберга, принципы технологической классификации – в ра-
ботах Е.И.Исаченкова, оптимального автоматизированного проектиро-
вания – в работах Р.А.Вайсбурда, Г.П.Тетерина и др.

Изучение состояния проблемы показало, что способы повышения
технологической деформируемости, комплексно учитывающие природу
металла, особенно его производства и другие физические факторы, с
одной стороны, и инвариантные характеристики напряженного состоя-
ния, неравномерность напряженного и скоростного состояния и дру-
гие механические факторы, с другой, представлены ограниченно. Кри-
терии применимости холодной и полугорячей объёмной штамповки, об-
общенная методика выбора и расчета переходов как база для созда-
ния автоматизированных систем проектирования технологических про-
цессов и штамповочного инструмента отсутствуют. Решение задач по
развитию научных основ технологии холодной и полугорячей объёмной
штамповки также как и других процессов обработки металлов давле-
нием должно базироваться на объективной информации о напряженно-

деформированном состоянии и кинематике течения металла, условиях локализации деформации и устойчивости пластического течения. Полученная количественная информация должна быть достаточной для оптимизации технологической деформируемости заготовок и процесса в целом по заданным технико-экономическим параметрам: средние и локальные удельные усилия, режим формоизменения и подготовки заготовок для штамповки, структура и качество штампованных заготовок и т.п.

При решении задач на основе теории пластичности физическая сторона вопроса, оказывающая решающее влияние на деформируемость заготовок, технологию штамповки, конструкцию инструмента, технологические параметры штамповочного оборудования, состав технологического комплекса, условия автоматизации, структуру, механические свойства и другие показатели качества штампуемых деталей практически не рассматривается. Среди технологических задач особое место занимает проблема разрушения, содержащая макроскопические, микро- и субмикроскопические аспекты. Первый - феноменологический - рассматривает модели накопления дефектов и условия образования и распространения макротрещин с позиций механики сплошной среды, второй - физический и физико-химический - природу разрушения: условия образования, накопления и заживления субмикро- и микроскопических дефектов, их перехода в макроразрушение. Таким образом, создается объективная необходимость в физико-механическом подходе к решению технологических задач.

Большинство теоретических и экспериментально-аналитических исследований рассматривает установившиеся движения и процессы. Однако наибольший практический интерес имеет объективная информация об изменении технологических усилий, кинематики деформируемой среды и образования дефектов для неустановившихся стадий процесса. Такая информация позволяет в зависимости от заданного критерия (деформируемость, качество и т.п.), определять не только допустимый, но и наиболее рациональный путь деформирования. Множественность и локальность факторов, значительно влияющих на характеристики деформируемости, обуславливают необходимость фундаментальных исследований по определению влияния на деформируемость не только напряженного состояния макрообъемов, но и кинематики течения и разрушения, механических и физико-химических условий на контакте металла с инструментом, условий локализации деформации, микроскопической и суб-

скопической структуры, дислокационных процессов. Оптимизация технологических процессов на основе результатов исследования деформируемости — значительный резерв повышения технико-экономических показателей металлообрабатывающего и машиностроительного производства, качества и эксплуатационных свойств изделий, получаемых холодной объёмной штамповкой.

К числу недостаточно исследованных факторов, определяющих технологическую деформируемость заготовки при холодной объёмной штамповке, относятся: кинематика течения металла и её зависимость от условий трения, геометрии инструмента, масштабного фактора; устойчивость процесса пластической деформации и её зависимость от физической природы металла (в том числе вида излома, закона упрочнения), условий локализации деформации и качества заготовки; неоднородность деформированного состояния, взаимное влияние частей тела на макро- и микроуровне, в том числе дополнительных и остаточных напряжений, градиента деформации и скорости деформации; выбор меры деформируемости с учётом вида излома, требований к качеству получаемой заготовки и стойкости инструмента.

При определении технологической деформируемости заготовки влияние промежуточного слоя (условия трения, массопереноса, способности к адсорбции смазки и покрытию слоем носителя смазки) либо совсем не учитывается, либо учитывается только в числе факторов при определении технологического усилия. Не рассматривается конкретная методика перехода от технологической деформируемости к расчёту устойчивого в производстве технологического процесса, удовлетворяющего требованиям повышения производительности, сокращения расхода металла и энергии.

Силовые характеристики процесса в ряде случаев — главный критерий оценки технологической деформируемости при холодной объёмной штамповке. Абсолютное большинство исследований посвящено определению среднего давления металла на пуансон. Их результаты, как правило, не позволяют объективно оценить распределение удельных давлений по поверхности контакта с инструментом. Знание закона распределения удельных усилий необходимо не только для прогнозирования стойкости инструмента, но и оптимизации кинематики течения металла и конструкции инструмента. На основании изучения состояния вопроса сформулирована цель работы: развитие научных основ технологии холодной объёмной штамповки путём физико-механического подхода к исследованию кинематики течения и технологичес-

кой деформируемости. В соответствии с поставленной целью проведен комплекс исследований общих закономерностей и особенностей процессов холодной объемной штамповки, обеспечивающих расширение технологических возможностей процессов и повышение их технико-экономических показателей.

Часть I. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЩИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ПРОЦЕССОВ ХОЛОДНОЙ ОБЪЕМНОЙ ШТАМПОВКИ

Технологическая деформируемость заготовок. Технологические возможности процессов, зависящие от геометрических, физических и других параметров заготовки характеризуют технологической деформируемостью, которую для инженерных расчётов целесообразно представить уравнением (I), где все члены выражены через деформацию заготовки:

$$D_r(D) - \alpha \geq \varepsilon_{max} \leq D_r(P) - b \quad (I)$$

где ε_{max} - максимально допустимая в производственном процессе деформация заготовки;

$D_r(D)$ - деформация заготовки, ограниченная возможностью макроразрушения;

$D_r(P)$ - деформация заготовки, ограниченная силовыми параметрами инструмента;

α - запас деформируемости, необходимый для стабильного получения штампованных заготовок или деталей заданного качества;

b - запас деформируемости, необходимый для получения заданной стойкости инструмента.

Основные факторы, влияющие на деформируемость заготовки и качество штампованной продукции - пластичность материала L_p , качество φ_k , геометрический фактор φ_r , взаимное влияние частей заготовки φ_s , поверхностный фактор φ_n :

$$D = D(L_p, \varphi_k, \varphi_r, \varphi_s, \varphi_n) \quad (2)$$

Определяющие параметры пластичности:

- физическая природа металла или сплава;
- напряженно-деформированное состояние и термомеханический режим деформации

$$L_p = L_p(\pi, \xi_{ij}, \theta) \quad (3)$$

- история нагружения и деформация

$$L_p = L_p[\pi(t) \begin{matrix} t = t_{kp} \\ t = 0 \end{matrix}] \quad (4)$$

- чувствительность к скорости изменения термомеханического

режима

$$L_p = L_p(\dot{\epsilon}_{ij}, \dot{\xi}, \theta) \quad (5)$$

- чувствительность и неоднородность термомеханического режима, характеризующая влияние окрестности частицы, т.е. градиентов ϵ, ξ, θ

$$L_p = L_p\left(\frac{\partial \epsilon_{ij}}{\partial x_i}, \frac{\partial \xi_{ij}}{\partial x_i}, \frac{\partial \theta}{\partial x_i}\right) \quad (6)$$

Коэффициент (модуль) изменения пластичности $m_p = dL_p/d\Pi$, характеризующий интенсивность изменения пластичности в зависимости от коэффициента напряженного состояния - особенность диаграммы пластичности $L_p = L_p(\Pi)$. Модуль m_p определяет выбор частиц, в которых на некотором этапе формоизменения могут образоваться экстремальные условия, вызывающие разрушение, а также методику и эффективность регулирования напряженного состояния с целью повышения пластичности. Пластическая деформация при холодной объёмной штамповке сопровождается зарождением, развитием и накоплением дефектов, обратимых, исчезающих при РТО, не снижая качества деталей, и необратимых, не устранимых последующей РТО, снижающих прочность, пластичность, электропроводность и другие показатели качества детали. Из дислокационной теории пластической деформации и разрушения следует, что поврежденность, также как и пластичность, необходимо оценивать локально, а интенсивность разрыхления $d\Psi/dL$ в области локализации деформации на различных этапах формоизменения от $t=0$ и $L=0 \Rightarrow \Psi$ до $t=t_p$, $L=L_p$ и $\Psi=\Psi_p=1$ резко неравномерна. На начальном этапе деформации $d\Psi/dL$ незначительна, а на стадии, непосредственно предшествующей разрушению, во много раз больше. Малая энергия активизации хрупкого излома приводит к спонтанному возрастанию $d\Psi/dL$. Из дислокационной теории также следует, что кривая $\Psi = \Psi(L)$ должна располагаться ниже прямой, характеризующей линейную зависимость поврежденности от накопленной деформации. Закон накопления повреждений может быть представлен кусочно-линейной зависимостью, определяющей кинетику накопления дефектов и разрушения согласно теории дислокаций. Диаграмма $L_p = L_p(\Pi)$ отражает качественно и количественно пластичность данной частицы тела, диаграмма $\Psi = \Psi(L)$ - кинетику изменения ресурса пластичности этой частицы по мере формоизменения, общее представление о которых дает поверхность поврежденности

$$F(L, \Pi, \Psi) = 0 \quad (7)$$

Наибольшую практическую значимость кинетика зарождения, развития

и накопления дефектов и их качественный переход к разрушению поликристаллического тела (заготовки) имеет при производстве сложных по форме деталей, процессы штамповки которых характеризуются положительными значениями Π и резко выраженной неравномерностью деформации, а также при выборе термомеханического режима тепловой и полугорячей объемной штамповки сложных сплавов с гетерогенной структурой. Вид разрушения определяет качество деформируемого тела, влияние масштабного фактора и устойчивость технологического процесса формоизменения в целом. Анализ известных критериев разрушения показал, что наиболее общую физическую оценку вида разрушения дает энергия активации процесса U_0 , контролирующая скорость разрушения на различных стадиях: U_0^b энергия активации разрыва межатомных связей путем стрыва и U_0^c энергия активации процесса пластической деформации. Из рассмотрения классификации видов изломов, составленной на основе критерия U_0 , следует эффективность применения в качестве технологического критерия оценки излома структурного расположения поверхности разрушения K_u . Критерий K_u весьма чувствителен к изменению критерия U_0 : при переходе от межзеренного разрушения (хрупкого) к внутризеренному (вязкому) величина U_0 увеличивается в $10^3 - 10^5$ раз. Соответственно критерий K_u определяет качество деформируемого тела и устойчивость технологического процесса обработки давлением в целом. Если при вязком разрушении влияние масштабного фактора на деформируемость ограничено, то с переходом к смешанному и особенно к хрупкому разрушению вероятность разрушения с увеличением отношения открытой поверхности заготовки к её объёму резко увеличивается. При внутризеренном разрушении $K_u = 0$. Соответственно технологический процесс устойчив, влияние масштабного фактора с позиций теории вероятности сильно ослаблено. Диаграммы пластичности дают объективные данные для технологических расчетов, поскольку вязкое разрушение есть результат накопления субмикроскопических дефектов зерен поликристалла. При смешанном разрушении $1 > K_u > 0$, межзеренном (хрупком) $K_u = 1$. Хрупкое разрушение есть результат накопления микро- и макродефектов на границах зерен, двойников и т.п. Физическая природа дефектов, предшествующих внутризеренному и межзеренному разрушению, их временные характеристики и геометрические места зарождения и развития различны. Соответственно суммирование таких дефектов, как это принято в механике, не корректно. Кривая пластичности $L_p = L_p(n)$ с переходом от вязкого к

хрупкому разрушению с увеличением Π имеет разрыв или в некотором интервале $\Pi_g \dots \Pi_{xp}$ имеется полоса смешанного разрушения. Следовательно, поверхность поврежденности с учётом физической природы разрушения и вида излома в общем случае должна иметь три области: 1) хрупкого разрушения, 2) вязкого разрушения, 3) неограниченной пластичности.

Границы области хрупкого разрушения:

$$0 \leq (\Lambda_i^p)_{xp} \leq (\Lambda_{max}^p)_{xp} \quad (8)$$

$$1 \equiv (\Psi_{max}^p)_{xp} \geq (\Psi_i)_{xp} \geq 0 \quad (9)$$

$$(\Pi_i)_{xp} \geq (\Pi_{min})_{xp} = (\Pi_0)_{xp} \quad (10)$$

Границы области вязкого разрушения:

$$0 \ll (\Lambda_{min}^p)_g < (\Lambda_{max}^p)_g \rightarrow \infty \quad (11)$$

$$1 \equiv (\Psi_{max}^p)_g \geq (\Psi_i)_g \geq 0 \quad (12)$$

$$(\Pi_0)_g = (\Pi_{max})_g \geq (\Pi_i)_g > \Pi_{\infty} \quad (13)$$

Границы неограниченной пластичности

$$\Lambda_p^p = \infty \quad (14)$$

$$1 > \Psi_{max} \quad (15)$$

$$\Pi_{\infty} = \Pi_{max} \geq \Pi_i \quad (16)$$

Для операций холодной объёмной штамповки с учётом первичных внешних и внутренних дефектов (риски, наклады, трещины, направленные поперек растягивающей деформации) максимальная величина $\Pi \leq 3$ (как правило, $\Pi \leq 2$), минимальная $\Pi \leq -10$. В этом интервале для большинства металлов и сплавов, подвергаемых холодной объёмной штамповке, происходит вязкое разрушение. Соответственно

$$\Lambda_g^p \gg 0, \quad 0 \ll (\Psi_i)_g \leq 0,7 \quad (17)$$

$$2 \geq (\Pi_i)_g \geq -10$$

где $(\Psi_i)_g$ — сумма повреждений, максимально допустимое значение которой зависит от запаса деформируемости α в соотношении (I).

Допустимая накопленная деформация может быть определена в зависимости от технологических и эксплуатационных требований к деформируемому телу.

Определяющие параметры качества заготовки — металлургический цикл производства и технология на каждом этапе; дефекты металлургического происхождения, их наследственность и закон распределения по объёму тела; субмикро-, микро- и макроструктура компонентов и примесей в зависимости от режима предварительной обработки (литьё, горячая прокатка, холодная прокатка + отжиг и др.), наследственность и закон распределения по объёму тела; геометрического фактора — форма, относительные и абсолютные размеры заготовок и деталей.

Определяющий параметр взаимного влияния частей заготовки — чувствительность к неоднородности термомеханического режима:

$$D = D(\varphi_{\theta}) = D\left(\frac{\partial \theta}{\partial x_i}, \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial x_i}, \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_i}\right) \quad (18)$$

и скорости его изменения. Выражается количественно через величину дополнительных и остаточных напряжений в микро- и макрообъёмах (в том числе в пределах всего тела, независимо от физических причин, их вызвавших):

$$(T_{\sigma}) = (T_{\sigma})_{осн} + (T_{\sigma})_{доп} \quad (19)$$

Для оценки влияния дополнительных напряжений на пластичность данной частицы тела целесообразно представить уравнение (19) через инварианты тензора и девиатора напряжений, ответственные за пластичность:

$$\frac{\sigma}{T} = \left(\frac{\sigma}{T}\right)_{осн} + \left[\frac{\sigma}{T}\right]_{доп} \quad (20)$$

При $(\sigma/T)_{доп} > 0$ пластичность данной частицы под действием дополнительных напряжений (а, следовательно, и причин, их вызвавших) уменьшается при $(\sigma/T)_{доп} < 0$ — увеличивается, интенсивность изменения которой зависит от $d\eta/d\varepsilon$. Определяющие параметры поверхностного фактора — физико-химическое состояние поверхностного слоя и микрогеометрия поверхности заготовки, способность поверхностного слоя к взаимодействию с атмосферой, с промежуточным слоем покрытия и смазки, инструментом (адгезия и когезия, перенос металла и т.п.)

— физико-химические свойства ювенильной поверхности, образующейся при внутреннем микро- и макроразрушении; её способность к схватыванию; условия схватывания.

Первый определяющий параметр поверхностного фактора ответственен за интенсивность накопления и аннигиляции дефектов, деформи-

руемость и качество поверхностного слоя заготовки. В слое, ограниченном свободными поверхностями, значения деформируемости заготовок регламентируются соотношениями (3), (4), (5), (20), отнесенными к микро- и макрообъемам. В приконтактном поверхностном слое значения деформируемости регламентируются напряженно-деформированным состоянием и физико-химическими явлениями, отнесенными к субмикро- и микрообъемам контактирующей пары системы деформируемое тело (заготовка) $\rightleftharpoons$ промежуточный слой $\rightleftharpoons$ инструмент, а при разрыве промежуточного слоя - деформируемое тело $\rightleftharpoons$ инструмент. Второй определяющий параметр поверхностного фактора ответственен за интенсивность заживления внутренних дефектов первичных, образовавшихся до деформации, и вторичных, возникающих и развивающихся в процессе деформации. Факторы, влияющие на сопротивление деформированию и деформируемость тела, подобны:

$$D_T(P) = D_T [P(S, \varphi_k, \varphi_r, \varphi_\theta, \varphi_n)] \quad (21)$$

где S - сопротивление деформации.

Следовательно, рассмотрение влияния факторов на $D_T = D_T(D)$ и $D_T = D_T(P)$ неотделимо. Особенности определения и оптимизации значений $D_T(P)$: каждый из множества параметров может при реально возможных условиях штамповки существенно изменить значения L_p и D , но некоторые из них оказывают на S , p , P незначительное влияние и их из числа определяющих параметров $D_T(P)$ допустимо исключить; за меру пластичности принимают L_p или A_p , значения которых зависят от напряженного состояния рассматриваемой частицы, за меру сопротивления деформации - напряжение течения при линейном напряженном состоянии, т.е.

$$S = S[(\Pi, \mu_\epsilon)(t)]_{\substack{\tau = \tau_{кр} \\ \tau = 0}} = const$$

Таким образом, уравнения (3) и (4) заменяются на уравнение, отражающее влияние значений деформации, скорости и температуры деформации, а уравнения (5) и (6) не учитываются.

При холодной объемной штамповке стали и тяжелых цветных металлов и сплавов влияние теплового эффекта на сопротивление деформации незначительно и при скорости деформации $\approx$ до 40 с^{-1} влиянием скоростного упрочнения можно пренебречь. При скоростях деформирования, реализуемых при полугорячей штамповке на механических прессах, влиянием скоростного упрочнения пренебречь нельзя. Значение $(\dot{\epsilon})^n$ с повышением скорости вначале резко возрастает, а

затем интенсивности скоростного упрочнения уменьшается и после достижения максимума плавно уменьшается, оставаясь достаточно большой. В отличие от механических испытаний, особенно на растяжение, где скорость деформации является функцией нагрузки, в производственном процессе — задается кинематикой исполнительного механизма машины и профилем рабочей части инструмента. Скорость деформации изменяется в широких пределах по мере прохождения каждой частицы через очаг деформации $S = S[\dot{\epsilon}(x_i, t), \xi(x_i, t)]$. На S оказывает влияние не только $\dot{\epsilon}$, но и ξ . Определение по кривым $S = S(\dot{\epsilon} = \text{const})$, приведенным в литературе по результатам испытаний на пластометре, может привести к значительной ошибке, так как не учитывается кинематическое состояние очага деформации. Для инженерных расчетов предлагается использовать зависимость $S = S(\bar{\epsilon}, u)$, где u — скорость деформации, усредненная по объему очага деформации и времени деформации.

Неравномерность и локализация деформации. Неравномерность и локализация деформации на субмикро-, микро- и макроуровнях — самопроизвольные явления, сопровождающие любой процесс пластического формоизменения — следствия законов сохранения, термодинамики, дискретности строения поликристалла и неотъемлемости действия геометрического фактора. Возможность простого нагружения и равномерной деформации не доказана. Поэтому простое нагружение и равномерная деформация могут рассматриваться как пределы, степень приближения к которым — один из критериев оценки эффективности управления напряженным состоянием, кинематикой течения металла в реальном процессе формоизменения. Для наглядности такой оценки представим фактически накопленную частицей тела деформацию в виде суммы $L = L_u + L_g + L_\mu$, где L_u — деформация при идеальном процессе; L_g , L_μ — деформации, накопленные вследствие дополнительных сдвигов. За значение L_g ответственны форма заготовки, геометрия и кинематика движения рабочих частей инструмента, от которых зависит кинематика течения металла и неравномерность деформации тела в целом, за значение L_μ — условия трения, которые определяют упрочнение поверхностного слоя. Соответственно удобно для инженерных оценок представить в виде суммы удельное усилие $p = p_u + p_g + p_\mu$ и относительное удельное усилие $\bar{p} = \bar{p}_u + \bar{p}_g + \bar{p}_\mu$. Механика неравномерности деформаций отражается уравнением (20), по которому поле $(\epsilon_{ij})_{\text{зоп}}$ самопроизвольно накладывается

на поле $(\sigma_{ij})_{осн}$, с тем, чтобы компенсировать неравномерность деформаций и обеспечить целостность (неразрывность) тела. Согласно законов сохранения необходимое и достаточное значение дополнительных напряжений должно соответствовать минимуму возрастания потенциальной энергии. Через инвариантные величины, используемые в теории деформируемости, уравнение (20) можно выразить уравнениями:

$$\Pi = \Pi_{осн} + (\frac{1}{2} \Pi_{гол}) \quad (22)$$

$$L = L_{осн} + L_{гол} \quad (23)$$

Влияние неравномерности деформации на деформируемость тела в локальной форме, т.е. отнесенное к частице и её ближайшей окрестности, определяется алгебраическим значением дополнительных напряжений второго ряда (в терминологии С.И.Губкина), т.е. $\Pi_{голI}$ и $L_{голII}$ в уравнениях (22) и (23). Деформационный критерий оценки неравномерности деформации в локальной форме — градиент деформации. В направлении $grad L(M)$ пластичность окрестности увеличивается, так как $\Pi_{гол} < 0$, а в обратном направлении (если приписать градиенту деформации знак минус) — уменьшается, т.е.

$\Pi_{голII} > 0$. Объективная с достаточной для практики точностью информация для построений линий уровня L может быть получена прямыми экспериментальными методами: координационной сетки при стационарных и муаровых полос при нестационарных процессах формоизменения. Значение градиента деформации определяется физической природой материала, которая отражается коэффициентами деформационного Π и скоростного упрочнения в уравнении кривой упрочнения. При увеличении интенсивности упрочнения $grad L(M)$ уменьшается. Чем больше интенсивность упрочнения, тем больше сопротивление деформации рассматриваемого элемента по сравнению с взаимноуравновешиваемым, тем больше деформация последнего и меньше приращение L и её градиент.

Образование очага деформации — локализация деформации на макроуровне. Согласно дислокационной теории очаг деформации — это система пачек скольжения толщиной в несколько тысяч атомных слоёв, разделяемых поверхностями скольжения дислокаций. Процесс локализации деформации на макроуровне при простых операциях штамповки состоит из трёх основных стадий:

I) начальная (неустановившаяся) стадия, на которой происходит образование и увеличение очага деформации (очага течения).

Объём V_T и масса очага деформации m_T увеличиваются до некоторого максимального значения. Скоростное состояние в различных точках очага деформации и траектории перемещения частиц изменяются во времени. Интенсивность увеличения V_T и m_T функционально связана со скоростью относительного сближения частей инструмента v_n :

$$\frac{dV_T}{dt}(v_n) > 0, \quad V_T \rightarrow V_T^{max}$$

2) установившаяся стадия процесса, на которой после достижения V_T и m_T некоторого максимума, определяемого законами сохранения при заданных условиях, скоростное состояние в различных точках очага деформации на n траектории перемещения частиц не изменяются во времени. В простых операциях выдавливания обычно реализуется псевдоустановившаяся стадия. Интенсивность увеличения V_T и m_T незначительна, практически не зависит от v_n и определяется интенсивностью упрочнения материала:

$$\frac{dV_T}{dt}(v_n) = 0, \quad \frac{dV_T}{dt}(m_T) > 0$$

3) заключительная (неустановившаяся) стадия процесса, на которой V_T и m_T уменьшаются:

$$\frac{dV_T}{dt}(v_n) < 0, \quad V_T \rightarrow 0$$

Очаг деформации ограничен поверхностями сопряжения (перехода):

1) с промежуточным слоем, через который осуществляется прямая и обратная связь деформируемого тела и инструмента.

На первой стадии процесса $dF_1/dt > 0$, на второй $dF_1/dt = 0$, на третьей $dF_1/dt \leq 0$;

2) с частью деформируемого тела, питающего очаг деформации. На первой стадии за счёт этой части происходит увеличение V_T и m_T путём относительного перемещения F_2 , без перехода через неё массы, $dF_2/dt > 0$; на второй — без относительного перемещения F_2 , но с переходом через неё массы, $dF_2/dt = 0$; на третьей — $F_2 = 0$;

3) с частью деформируемого тела, вышедшего за пределы очага деформации. На первой стадии $F_3 = 0$, на второй $F_3(t) = const$, на третьей $dF_3/dt < 0$;

4) с окружающей средой, т.е. свободные поверхности;

5) с жёсткими частями деформируемого тела, находящимися между очагом деформации и контактной или свободной поверхностью тела.

Рассмотрим эволюцию градиента деформации частицы по мере её движения от поверхности входа в очаг деформации F_2 к поверхности выхода из очага деформации F_3 . Примем, что поверхность F_2 совпадает с поверхностью уровня $L \equiv 0$, а на поверхности F_3 $0 \leq L \neq \text{const}$. Траектория движения частицы по очагу деформации также, как и кривая упрочнения, может быть разделена на два участка. На первом (начальном) участке траектории интенсивность упрочнения значительно больше, чем на втором (если он существует в рассматриваемом процессе), т.е. $[\text{grad } L(M_i)]_I < [\text{grad } L(M_i)]_{II}$. Соответственно при заданном ΔL между уровнями геометрический путь движения частиц на первом участке больше, чем на втором. С увеличением интенсивности упрочнения (при прочих равных условиях) длина траектории перемещения, глубина проникновения очага деформации и равномерность деформации увеличиваются.

Потеря устойчивости пластического деформирования при холодной объёмной штамповке сопровождается: 1) относительным сдвигом частей заготовки по поверхностям раздела течения; 2) образованием наплывов или внеконтактной деформацией; 3) продольным изгибом. Следствия потери устойчивости первого вида — накопления необратимых микродефектов в зоне локализации, образование наружных и внутренних трещин, заканчивающееся разделением тела на два или несколько частей. Потере устойчивости этого вида наиболее часто предшествует образование двух или нескольких очагов деформации, соответствующих простым операциям. При совмещенных операциях с двумя или несколькими направлениями течения на некотором этапе деформирования согласно законам сохранения наличие и развитие этих очагов деформации становится энергетически невыгодным и наступает их взаимодействие с образованием трубчатого очага деформации, в котором концентрируется пластическая деформация. Остальные части тела, внешние и внутренние, относительно этой трубки получают переносное движение. Один из путей решения задач по устойчивости пластического течения такого типа на инженерном уровне — экспериментально-аналитическое исследование процесса образования очагов деформации, их взаимодействия и изменения во времени на основе дислокационной теории. Поверхности скольжения интерпретируем механически как поверхности неустойчивости, т.е. поверхности разрыва касательной составляющей скорости. Наибольшая вероятность потери устойчивости на второй и особенно на третьей поверхностях, ограничивающих очаг деформации на линиях пересечения с первой и пятой

поверхностью. Наличие жестких зон и соответственно поверхностей неустойчивости, их ограничивающих — свидетельства несовершенства технологии или нетехнологичности конструкции заготовки детали. При переходе от второй стационарной стадии простых процессов, либо минуя вторую от первой к третьей с относительным сдвигом частей заготовки деформированное состояние частиц характеризуется соотношениями:

$$\frac{dL}{dt} \rightarrow 0 \quad \frac{dL}{dt} \gg 0$$

а кинематическое состояние соответственно уравнениями

$$v_i = v_0$$

$$v_i = v_0 + (v_{i,j})$$

Тогда все частицы деформируемого тела можно разделить на четыре основные группы:

I	II	III	IV
$v_i = v_0 + (v_{i,j})$	$v_i = v_0 + (v_{i,j})$	$v_i = v_0 + (v_{i,j})$	$v_i = v_0$
$\frac{dL}{dt} > 0$	$\frac{dL}{dt} > 0$	$\frac{dL}{dt} > 0$	$\frac{dL}{dt} \equiv 0$
$\frac{dL}{dt}$	$\frac{dL}{dt}$	$\frac{dL}{dt}$	$\frac{dL}{dt}$
$\text{grad}_{e_x} L(t) = \text{const}$	$\frac{d[\text{grad} L]}{dt} < 0$	$\frac{d[\text{grad} L]}{dt} \gg 0$	$\text{grad}_{e_x} L(t) \equiv 0$

К первой группе относятся точки (частицы при мгновенном рассмотрении) одного (или нескольких независимых друг от друга очагов деформации) на установившейся стадии процесса, форма, размеры, масса которого (или нескольких очагов деформации) во времени не изменяются. Градиент деформации $\text{grad}_{e_x} L$ в любом направлении очага течения e_x не изменяется во времени, то есть $\text{grad}_{e_x} L(t) = \text{const}$. На установившейся стадии, если деформация не охватывает всего объема тела, имеются две зоны тела, точки которой относятся к четвертой группе. Из одной металл поступает в очаг течения, а во вторую выходит из очага деформации. Согласно условий непроницаемости стенок инструмента и неразрывности масса первой зоны тела непрерывно уменьшается, второй — увеличивается. Другие зоны тела с точками четвертой группы — жесткие зоны — свидетельство несовершенства кинематики течения металла, вызванного

недостатками конструкции инструмента и технологии формоизменения в целом. Области тела, обнаруженные на некотором этапе исследования, относящиеся ко второй и третьей группам точек, а также вновь образовавшиеся жесткие зоны (четвертая группа точек), значительное расширение жестких зон — это свидетельство потери устойчивости деформирования.

Кинематика течения металла. Информация о кинематике течения металла получалась методами муаровых полос, координатной сетки, а также численным методом "потоков", основанным на дискретизации деформируемой среды, разработанным С.И.Ковалевым и И.В.Ширко, Метод муаровых полос более точен, чем координатной сетки, позволяет наглядно определить геометрическое расположение жестких зон, областей однородного деформированного состояния и переносного движения, градиентов деформации, линий разрыва скоростей и другие особенности формоизменения; экспериментальная информация удобна для обработки на ЭВМ. В связи с этим метод муаровых полос применен как основной, а координатной сетки как дополнительный при качественном анализе для предварительного определения наличия и геометрии локальных явлений и при количественном анализе избирательно для проверки объективности информации, полученной методом муаровых полос.

Метод муаровых полос показывает мгновенную картину кинематики течения металла и при обычной трактовке не позволяет определить накопленную частицей деформацию и другие параметры, характеризующие историю деформирования. Разработанная и примененная в работе графо-аналитическая методика исследования позволяет следить за изменением напряженно-деформируемого состояния данной частицы по мере её прохождения через очаг деформации как при установившемся, так и при не установившемся процессе формоизменения. Технологические расчёты основаны на теории течения и модели жесткопластического упрочняемого тела, как наиболее близко отражающих поведение реального металла при условии несжимаемости. Интегральную характеристику в поперечном главной оси при плоской деформации и радиальном направлении при осесимметричной деформации предложено определять как интенсивность приращения перемещения в направлении главной оси симметрии Z , т.е. при плоской и при осесимметричной деформации. Производная определяется как $\epsilon_g \delta$, где δ — угол касательной к линии координатной сетки, в точке, где расположена рассматриваемая частица, с главной осью.

При $t_g = \delta \text{ grad}_z L = 0$ деформация данной частицы и её окрестности однородна. Чем больше $t_g \delta$, тем больше неоднородность деформации. При перегибе координатной линии происходит разрыв значений $\text{grad}_z L$, что вызывает необходимость приписывать $\text{grad}_z L$ знак минус. По картинам муаровых полос $\text{grad}_z L$ определяли в заданном направлении по изолиниям накопленной деформации рассматриваемого поля течения. Метод потоков применен для получения информации о напряженно-деформированном состоянии металла на установившейся стадии прямого выдавливания в условиях плоской деформации. Применение модели упруго-пластического тела позволяет более полно отразить реологические характеристики реального металла: локальное изменение напряженно-деформированного состояния под действием дополнительных и остаточных напряжений.

Часть 2. РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Практическая реализация общих закономерностей процессов холодной объемной штамповки осуществлялась исследованием кинематики течения, разработкой и внедрением методов повышения технологической деформируемости, методологии решения технологических задач и новых технологических процессов холодной и полугорячей объемной штамповки, обеспечивающих повышение эффективности и ускорение научно-технического прогресса заготовительного производства в машиностроении.

Исследование кинематики течения. Методом муаровых полос, а также методами потоков и координатной сетки получена информация по полю течения при плоской и осесимметричной деформации, о градиентах напряжений и деформаций и других параметрах напряженно-деформированного состояния с учетом истории нагружения, необходимая для определения деформируемости, а также абсолютных и относительных значений удельных усилий на инструмент и их распределения по поверхности контакта. Составлены алгоритмы расчетов параметров формоизменения, реализованные с применением ЭВМ для решения технологических задач по штамповке заготовок с развилками, ступенчатых и полых заготовок.

Из рассмотрения картин муаровых полос и результатов численной обработки полученной информации при осесимметричном редуцировании следует, что значения угла конусности матрицы и деформации относятся к числу основных критериев, определяющих появление вне-

контактной деформации (напылов). С увеличением угла 2α доля L_2 в общем значении L приконтактных слоев возрастает, увеличивается $\text{grad}_2 L$. Значение $\text{grad}_2 L$ увеличивается также с уменьшением ε . Наибольший интерес при анализе явления потери пластической устойчивости при редуцировании за счет внеконтактной деформации (напыла) представляют слои, прилегающие к поверхности контакта в зоне первой поверхности неустойчивости. С увеличением значений 2α и уменьшением L первая поверхность неустойчивости в зоне контакта перемещается в сторону направления движения металла. Таким образом, самопроизвольно увеличивается длина траектории перемещения частицы в этой области и соответственно уменьшается $\text{grad}_2 L$ вдоль траектории. При последовательном редуцировании уровень L увеличивается, а соответственно $\text{grad}_2 L$ по сечению меньше. Таким образом, третьим основным критерием неустойчивости является физико-механическое состояние поверхностного слоя: величина предварительного упрочнения и модуль упрочнения, соотношение между τ_s^n металла поверхностного слоя и τ_μ . Из этого следует, что границы применимости редуцирования (без помещения всей заготовки в полость матрицы) зависят от оптимального сочетания значений $2\alpha, \varepsilon, \tau_s^n/\tau_\mu$. Одним из конкретных решений, направленных на расширение этих границ, является предварительная калибровка волочением. Величина деформации при калибровке должна быть тем больше, чем меньше ε при редуцировании. Поверхностный слой не должен содержать пор и других дефектов, снижающих τ_s^n . В случае, когда обеспечивается устойчивость процесса второго вида, но существует опасность осевого разрушения, целесообразно уменьшать 2α ($2\alpha < 28-30^\circ$). Значения осевых растягивающих напряжений значительно возрастают при $\varepsilon < 0,15$.

Исследование влияния масштабного фактора на кинематику течения при выдавливании проведено на геометрически подобных образцах диаметром и высотой от 10 до 100 мм методами координатной сетки и муаровых полос. Сравнение значений $\text{grad}_2 L$ подтверждает вывод об усилении неравномерности деформации с увеличением отношения поверхности трения к объёму деформируемого тела, а соответственно повышение доли $\bar{p}_\mu$ в значении удельного усилия.

При исследовании процессов комбинированного выдавливания наибольшее внимание было уделено взаимодействию очагов деформации и получению исходных данных для определения условий потери пластической устойчивости первого вида. Наиболее сильно эти явления выра-

жены при совмещении выдавливания полости и сплошного стержня. Вначале образуются самостоятельные очаги деформации при выдавливании полости и стержня. Затем образуется очаг деформации в виде трубки, а ранее образовавшиеся очаги деформации как энергетически менее выгодные, перестают действовать. Изменение накопленной деформации и градиента деформации для частиц, расположенных на одной из конкретных поперечных линий координационной сетки до деформации, подтверждает изложенную в главе три методологию определения условий потери пластической устойчивости первого вида. Наиболее сильно, как показал анализ картин муаровых полос и координатной сетки, потеря пластической устойчивости проявляется при матрице и пуансоне с углами 180° и равенстве степеней деформации, обеспечивающих минимальную толщину трубки, наибольшую интенсивность и абсолютное значение накопленной деформации, минимальный путь локализации и разрушения, т.е. минимум минимуму энергии, затрачиваемой на пластическую деформацию. Отсюда следует, что подавление потери пластической устойчивости первого вида может быть достигнуто увеличением длины и ширины трубки, т.е. объема, охваченного пластической деформацией. Это достигается рациональным выбором профилей рабочей части инструмента, а если возможно, и соотношений деформаций при образовании полости и стержня.

Повышение технологической деформируемости. Основные направления повышения технологической деформируемости заготовок: повышение качества проката, применение наиболее рациональных режимов РТО, проведение формоизменения в заданном интервале показателей напряженного состояния и применение наиболее рациональных термомеханических режимов формоизменения.

Первое направление реализовано созданием новых марок сплавов и совершенствованием металлургических циклов производства с тем, чтобы прокат удовлетворял требованиям современной технологии штамповки и тенденциям повышения эксплуатационных характеристик деталей. Разработаны и внедрены новые марки сплавов, обладающие заданными технологическими свойствами. При отработке технологии производства этих сплавов было впервые показано, что микролегирование позволяет не только повысить механические свойства, но и воздействовать на способность сплава к схватыванию с инструментом при холодной объемной штамповке, что позволяет исключить сложную и трудоёмкую операцию нанесения слоя носителя смазочного материала.

ла. Результаты исследований обобщены в виде таблиц и диаграмм, данные которых позволяют оценить влияние металлургического цикла на деформируемость, включая вид разрушения, и оптимизировать выбор термомеханического режима. На основе данных о растворимости компонентов и примесей, температурах и типах превращений составлена качественная и количественная зависимость пластичности и технологической деформируемости от химического состава, металлургического цикла, газонасыщенности и других дефектов металлургического происхождения.

Второе направление повышения технологической деформируемости реализовано разработкой и применением режимов предварительной и промежуточной РТО, обеспечивающих получение заданного уровня технологической деформируемости заготовок, соответствующих принятому интервалу термомеханических параметров штамповки. Получение заданного уровня технологической деформируемости заготовок путём РТО производилось на основе исследований влияния структурного фактора на пластичность и сопротивление деформации. В качестве объектов исследования были приняты конструкционные углеродистые и низколегированные стали ферритно-перлитного класса, применяемые в автотракторостроении и других отраслях машиностроения для ряда типовых деталей, форма, размеры, масса и серийность производства которых позволяют эффективно применять холодную объёмную штамповку. Выбор марок сталей для исследования обусловлен также типичностью структуры проката в состоянии поставки. Структурные факторы, ответственные за технологическую деформируемость заготовок при холодной деформации, зависят от природы сплава. Структурные факторы, определяющие уровень технологической деформируемости заготовок из малоуглеродистых (меньше 0,25% углерода) конструктивных сталей: размер, однородность, наличие полосчатости и ячеистой структуры феррита, а также степень легированности ферритного зерна для низколегированных хромом и никелем сталей.

Возможность использования сквозного индукционного нагрева взамен печного для РТО заготовок из углеродистых и низколегированных сталей с пониженным содержанием углерода, доказанная совместно с А.М. Соколовым, открывает широкие перспективы для интенсификации процессов холодной объёмной штамповки. Это связано с сокращением длительности и снижением трудоёмкости обработки, с отказом от сложных способов защиты от окалинообразования и повышением качества поверхности заготовок, с возможностью проведения

РТО заготовок в автоматизированных поточных линиях, управле-
 ных ЭВМ. Для разработки способа РТО с применением нагрева ТВЧ
 исследовано влияние параметров сквозного индукционного нагрева
 и скорости последующего охлаждения на кинетику фазовых превра-
 щений, формирование структуры и технологическую деформируемость.
 Установлено, что нагрев необходим замедленный, а оптимальный
 режим нагрева должен обеспечивать полное завершение аустениза-
 ции в объеме заготовки, однородность структуры по сечению заго-
 товки, для чего необходимо минимальный перепад температур $\Delta \theta_{min}$
 между наружными и центральными слоями, отсутствие окалина и
 взаимодействие поверхностного слоя заготовки с атмосферой.

Структурные факторы, определяющие уровень технологической
 деформируемости заготовок из среднеуглеродистых (0,35...0,50%
 углерода), в том числе низколегированных хромом и никелем ста-
 лей: форма, размер и распределение в ферритной матрице частиц
 цемента.

Третье направление повышения технологической деформируемо-
 сти реализовано разработкой и применением режимов формоизмене-
 ния, кинематика течения металла при которых обеспечивает пласти-
 ческую деформацию всех частиц тела в заданном интервале показа-
 телей напряженного и деформированного (скоростного) состояния,
 составленных из инвариантов тензоров напряжений и деформаций
 (скоростей деформаций). Опираясь на распределение инвариантных
 характеристик напряженного и деформированного состояния оптими-
 зировали кинематику течения по заданному критерию ($\psi, L_p, grad L,$
 $S_{ij}, \dot{S}_{ij}, \bar{\rho}$) или совокупности критериев.

Четвертое направление повышения технологической деформируе-
 мости реализовано разработкой и внедрением термомеханических ре-
 жимов формоизменения на основе рационального применения как хо-
 лодной, так и полугорячей объемной штамповки. Все славы, для ко-
 торых представляет практический интерес теплое и полугорячее де-
 формирование, предложено разделить на следующие группы: однофаз-
 ные латуни, медноникелевые и никелевые сплавы; нержавеющие стали
 аустенитного класса; стали легированные, в том числе инструмента-
 льные, типа P18, P6M5; стали с повышенным содержанием углерода и
 низколегированные, в которых проявляется эффект деформационного
 старения; стали низкоуглеродистые.

Для решения задач по эффективности перехода к штамповке при
 повышенных температурах по основному критерию (давлению металла

на инструмент) предложен графический метод, в котором принято, что единственной и полной характеристикой сопротивления деформации данного сплава (при определенных химическом составе, состоянии и т.п.) при холодной объемной штамповке является кривая упрочнения, каждой точке которой соответствует при заданных условиях формоизменения (подготовка поверхности, геометрия инструмента и т.д.) только одна точка на кривой зависимости давления металла на инструмент от деформации.

Методология решения технологических задач. Разработанная методология решения технологических задач базируется на многокритериальном конструктивно-технологическом классификаторе, составляющие которого и их характеристика приведены в таблице. Классификатор проверен при разработке и внедрении технологических процессов и конструкций штампов, обосновании технологических требований к штамповочному оборудованию. Классификатор может служить основой типизации технологических процессов, стандартизации инструмента, улучшения технологичности конструкции деталей, повышения технического уровня оборудования, применения ЭВМ для технологической подготовки производства.

Для решения конкретных задач, связанных с выбором и расчетом переходов, разработаны номограммы и рекомендации, применение которых позволяет минимизировать $\bar{\rho}$, приближая интенсивность касательных напряжений T в очаге деформации к теоретическому максимуму, путем самопроизвольного (штамповка сплошного полого многогранника, переходящего в плоский торец, выпуклого высокого рельефа, тонкостенных и других сложных элементов конструкции деталей с предварительным набором аккумулятора металла заданных форм и размеров) и принудительного регулирования напряженного состояния (штамповка полых деталей с противонапряжением, штамповка деталей с массивной головкой и удлиненным конусом с предварительным выдавливанием полости расчетных размеров), а также на основе оптимизации формы и размеров очага деформации и рационального направления сил трения.

Реализация методологии проектирования новых технологических процессов штамповки. Методология проектирования процессов холодной объемной штамповки применена при разработке более сорока новых технологических процессов штамповки типовых деталей, применяемых в машиностроении. Разработанные процессы приняты к внедрению с общим экономическим эффектом более одного миллиона рублей в год.

Структура конструктивно-технологического классификатора

26

Наименование	Критерии	Основное содержание	Назначение
I	2	3	4
1. Конструктивно-технологическая классификация деталей.	Форма, абсолютные и относительные размеры, масса деталей.	Разделение деталей различных конструкций на классы и подклассы по технологическому полюбю с указанием основных элементов деталей и их сочетаний. Формирование технологического кода деталей	Оптимизация выбора маршрута формоизменения в зависимости от характерных конструктивных элементов деталей и их сочетаний. Формирование технологического кода деталей
2. Классификация заготовок по технологической деформируемости.	$D_T = D_T(A),$ $D_T = D_T(P),$ L_P, K_u, ψ, P	Зависимость технологической деформируемости заготовок от физической природы металла и качества проката, условий на контакте, структурного и масляного факторов.	Выбор максимально допустимых деформаций и других термомеханических параметров процесса формоизменения в зависимости от заданных требований к качеству деталей и стойкости инструмента.
3. Классификация операций по кинематике течения металла; по направлению и значению сил трения	$P, grad L, \bar{P}$ $P, P_n,$ $grad L, \mu$	Технологическая характеристика операций в зависимости от кинематики течения металла.	Выбор параметров заготовки, формоизменяющих операций и конструкций инструмента с учётом условий потери пластической устойчивости, разрушения, экономической стойкости инструмента и качества деталей.

Реализованный в промышленности экономический эффект составляет более 500 тыс. рублей в год.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Модель технологической деформируемости заготовок при холодной объёмной штамповке отражает физические особенности и механику пластической деформации, а также реализуемые в производстве условия формоизменения. Основные факторы, существенно влияющие на технологическую деформируемость: пластичность материала, качество и взаимное влияние частей заготовки, геометрический и поверхностный факторы. Рассмотрены определяющие параметры факторов (напряженно-деформированное состояние и термомеханический режим деформации, история нагружения и деформации, чувствительность к скорости изменения термомеханического режима, модуль изменения пластичности и др.) и пути управления их значениями. Введена поверхность поврежденности, применение которой позволяет дать качественное и количественное представление о взаимосвязи кривых пластичности с кинетикой изменения ресурса пластичности по мере формоизменения. Показано, что при изменении вида излома происходит разрыв кривых зависимости пластичности от термомеханических параметров процесса. В качестве технологического критерия оценки вида излома применено структурное расположение поверхности разрушения, определяющего значения запаса деформируемости, необходимого для устойчивости технологического процесса формоизменения и степень влияния масштабного фактора.

2. Условия локализации деформации, потери пластической устойчивости и наступления разрушения при основных операциях холодной объёмной штамповки охарактеризованы скоростным состоянием частиц поля течения. Потеря устойчивости пластического деформирования с образованием раздела течения с незамкнутым или замкнутым контуром некоторой толщины, с позиций механики характеризуется пиковыми значениями градиента деформации и их разрывом, дислокационной теории — интерпретируется как поверхность неустойчивости. Определяющие параметры потери устойчивости путём внеконтактной деформации (редуцирование): а) сочетание деформаций и профиля (угла конуса) рабочей части матрицы; б) физико-механическое состояние поверхности контакта и промежуточного слоя заготовки.

3. Механика неравномерности деформации заготовки интегрально отражена уравнением, по которому тензор дополнительных напряжений

самопроизвольно накладывается на тензор основных напряжений. Этому уравнению соответствует система уравнений, составленных из инвариантов тензоров напряжений и деформаций, применяемых в теории деформируемости. Неравномерность деформации в локальной форме характеризует градиент деформации, пики и разрывы значений которого — свидетельства несовершенства кинематики течения металла, заданной технологией и конструкцией рабочих частей инструмента.

4. Полученная методами муаровых полос, а также координатной сетки и дискретизации пластической среды информация о практически реализуемых градиентах напряжений и деформаций и других параметрах напряженного и деформированного (скоростного) состояния позволяет определять деформируемость заготовок, абсолютные и относительные удельные усилия на инструмент и их распределение по поверхности контакта с учётом истории нагружения, а реализация составленных алгоритмов расчёта параметров формоизменения — решать с применением ЭВМ технологические задачи по разработке новых и совершенствованию существующих процессов холодной объёмной штамповки заготовок и деталей с развилками, ступенчатыми, полых, многогранных и других подобных конструкций.

5. Определены основные направления повышения технологической деформируемости заготовок: 1) повышение качества заготовок; 2) управление структурными факторами; 3) проведение формоизменения в наиболее рациональном интервале показателей напряженного и деформированного состояния; 4) применение наиболее эффективных термомеханических режимов деформации. Реализация первого направления основана на создании новых марок сплавов и совершенствовании металлургических циклов производства с тем, чтобы качество проката удовлетворяло требованиям технологии штамповки, а свойства деталей — требованиям при их эксплуатации. Впервые доказано, что микролегирование позволяет воздействовать не только на структурный фактор, газонасыщенность, но и на способность металла к схватыванию с инструментом, что особенно важно для сплавов с высоким сопротивлением коррозии, покрытие которых носителем смазки вызывает значительные трудности. Для ряда групп сплавов, подвергаемых холодной объёмной штамповке, составлена качественная и количественная зависимость технологической деформируемости заготовок от содержания

основных компонентов и примесей, металлургического цикла, а также газонасыщенности и других дефектов металлургического происхождения.

Второе направление реализовано разработкой и применением режимов РТО, обеспечивающих получение заданного уровня технологической деформируемости заготовок из углеродистых и низколегированных сталей ферритно-перлитного класса. Решение конкретных задач основано на определении зависимости технологической деформируемости от размерно-морфологических параметров структуры.

Третье направление реализовано разработкой и применением режимов формоизменения, кинематики течения металла, которые обеспечивают пластическую деформацию в заданном интервале показателей напряженного и деформированного (скоростного) состояния, составленных из инвариантов тензоров напряжений и деформаций (скоростей деформаций). Решение конкретных задач сводится к определению координат частиц с экстремальным сочетанием параметров и управлению кинематикой течения металла на основе выбора форм и размеров заготовок по переходам, профиля и кинематики относительного движения рабочих частей инструмента. Оптимизацию кинематики течения производят минимизацией заданного критерия или совокупности критериев (поврежденность, накопленная деформация, градиент деформации, относительное удельное усилие и т.п.).

Четвертое направление реализовано разработкой и внедрением классификации сталей и сплавов по эффективности применения различных термомеханических режимов и методики определения границ областей эффективного применения холодной и полугорячей объемной штамповки, основанной на единственности функциональной взаимосвязи сопротивления деформации и удельных усилий при заданных термомеханических параметрах.

6. Разработана методология решения технологических задач при холодной объемной штамповке, базирующаяся на конструктивно-технологическом классификаторе, структура которого предусматривает критерии: геометрический (форма, размеры), кинематики течения, напряженного, деформированного и скоростного состояния частиц деформируемого тела и технологической деформируемости заготовок. Классификатор проверен при разработке и внедрении новых технологических процессов, конструкций штампов, обосновании технологических требований к автоматизированным штампо-

вочным комплексам, вошел в справочную литературу и использован в ряде РТМ и метеопических рекомендациях Минстанкопрома и Минавтопрома. Показано, что конструктивно-технологический классификатор — основа типизации технологических процессов, стандартизации инструмента, унификации деталей и узлов машин, повышения технического уровня штамповочного оборудования, применения ЭВМ для технологической подготовки производства.

7. Разработанная методология решения технологических задач с определением конкретных значений параметров по конструктивно-технологическому классификатору внедрена при проектировании процессов холодной и полугорячей объёмной штамповки. Запроектированы и приняты к внедрению новые ресурсосберегающие процессы штамповки более сорока типовых деталей, применяемых в автомобильной промышленности и других отраслях машиностроения. Внедрение новых процессов для рассмотренной номенклатуры деталей позволяет, по сравнению с обработкой резанием, а также горячей штамповкой и комбинированными процессами (сварка, литьё, штамповка) уменьшить расход металла не менее чем в 1,5 раза, повысить производительность труда в 3-5 раз и более. Реализованный экономический эффект в сфере производства составил более 500 тыс. рублей в год. Кроме того, переход от обработки резанием и комбинированных процессов к холодной и полугорячей объёмной штамповке улучшает служебные свойства деталей, а соответственно увеличивает их долговечность и надёжность в эксплуатации.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Головин В.А. Проблема штампуемости при холодной и полугорячей объёмной штамповке // Кузнечно-штамповочное производство. — 1981. — № 8. — С. 21-24.

2. Головин В.А. Актуальные проблемы холодной и полугорячей объёмной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство. — 1985. — № 8. — С. 34-35.

3. Головин В.А. Штампуемость стали. Принципиальные схемы технологических процессов. Получение заготовок и их дозирование. Предварительная и промежуточная термообработка. Подготовка поверхности. Проектирование и расчет переходов. Накатывание резьбы и профилей // Холодная объёмная штамповка. — М.: Машиностроение, 1973. — С. 28-45, 82-101, 108-137, 153-183, 461-471.

4. Головин В.А. Принципиальные схемы технологических процессов, основы их проектирования при штамповке на прессах. Особенности штамповки на прессах. Производство заготовок, предварительная и промужуточная термическая обработка, подготовка поверхности. Конструирование штампованных заготовок и деталей. Особенности технологии штамповки заготовок из сплавов цветных металлов и легированных сталей. Калибровка и чеканка // Ковка и штамповка. Справочник. Т.3. Холодная объёмная штамповка. -М.: Машиностроение, 1987. -С.16-23, 96-116, 121-181.

5. Головин В.А. Пластическая деформация и разрушение при обработке металлов давлением. Технологическая деформируемость слитков и заготовок из тяжелых цветных металлов. // Листы и ленты из тяжелых цветных металлов. М.: Металлургия, 1985. -С.91-244.

6. Головин В.А. Типовые технологические процессы холодной штамповки стержневых деталей на многопозиционных автоматах. Методические рекомендации. Минстанкопром. -М.: НИИМаш, -1981. -44с.

7. Головин В.А. Принципиальные особенности процессов. Термины и определения. Исходные материалы и их подготовка к холодной объёмной штамповке. Формоизменяющие операции. Проектирование и расчёт технологических процессов холодной объёмной штамповки. Конструирование и расчёт штампов для холодной объёмной штамповки. // Технология и оборудование холодной штамповки. -М.: Машиностроение, 1987. -С.226-290.

8. Головин В.А. Технологическая деформируемость и качество при холодной объёмной штамповке // Повышение эффективности штамповочного производства. -М.: МДНТП. -1981. -С.86-92.

9. Головин В.А. Определение инженерных показателей технологической деформируемости // Совершенствование процессов объёмной штамповки. -М.: МДНТП. -1980. -С.81-85.

10. Головин В.А. Основные направления повышения эффективности производства заготовок холодной и полугорячей объёмной штамповкой // Повышение эффективности штамповочного производства. -М.: МДНТП. -1981. -С.127-135.

11. Головин В.А. Производство заготовок и деталей холодной объёмной штамповкой в общем машиностроении // Расширение области применения методов холодного и полугорячего объёмного деформирования. -М.: ЦНИИТЭИ тракторосельхозмаш. -1971. -С.17-25.

12. Головин В.А. Повышение качества изделий, получаемых холодной объёмной штамповкой // Повышение точности и качества

при штамповке. -М.: МДНТП. -1975. -С.55-60.

13. Головин В.А. Повышение качества и эффективности при холодной объёмной штамповке. // Качество и эффективность при листовой и объёмной штамповке. -М.: МДНТП. -1977. -С.39-46.

14. Головин В.А. Холодная объёмная штамповка в мелкосерийном производстве // Штамповка в мелкосерийном производстве. -М.: МДНТП. -1979. -С.10-14.

15. Головин В.А. Совершенствование технологии выдавливания с целью механизации и автоматизации // Современная листовая и объёмная штамповка. -М.: МДНТП. -1969. -С.3-8.

16. Головин В.А., Митькин А.Н., Резников А.Г. Технология холодной объёмной штамповки выдавливанием // -М.: Машиностроение. -1970. -152с.

17. *Gołowin W.A., Mitkin A.N., Rieznikow A.G. Wyciskanie metali na zimno. -Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. -1973. -184.*

18. Головин В.А., Евстратов В.А., Рудман Л.И. Холодная и полугорячая объёмная штамповка на прессах. Методические рекомендации. Минстанкопром. -М.: НИИМаш. -1981. -73с.

19. Головин В.А., Ковалёв С.И., Щербаков А.М. Напряженно-деформированное состояние металла при двухканальном холодном выдавливании деталей с развилками // Совершенствование процессов объёмной штамповки. -М.: МДНТП. -1980. -С.85-91.

20. Головин В.А., Базык А.С. Конструктивно-технологическая классификация деталей // Холодная объёмная штамповка. -М.: Машиностроение. -1973. -С.101-108.

21. Головин В.А., Базык А.С. Конструктивно-технологическая классификация осесимметричных поковок и деталей, получаемых холодной объёмной штамповкой. Обобщенная характеристика конструктивно-технологических типов осесимметричных деталей и поковок, получаемых холодной объёмной штамповкой // Прогрессивные процессы, штампы и оборудование для холодной и горячей штамповки. -М.: МДНТП. -1971. -С.146-151, 156-161.

22. Головин В.А., Букин-Батырев И.К. Рекомендации по выбору стали // Холодная объёмная штамповка. -М.: Машиностроение. -М.1973. -С.7-27.

23. Головин В.А., Филиппов Ю.К. Исследование кинематики течения металла при нестационарных процессах холодной объёмной штамповки // Обработка металлов давлением в автомобилестроении.

Межвузовский сборник. -М.: МАМИ. - 1984. -С.73-76.

24. Головин В.А., Митькин А.Н. Штамповка типовых деталей // Холодная объёмная штамповка. -М.: Машиностроение. -1973. -С. 225-233.

25. Головин В.А., Митькин А.Н., Букин-Батырев И.К. Конструирование и расчёт инструмента // Холодная объёмная штамповка. -М.: Машиностроение. -1973. с.192-225.

26. Головин В.А., Митькин А.Н., Кобяков В.А. Разработка и внедрение технологического процесса холодной объёмной штамповки внутренней гайки крепления заднего колеса автомобиля //Прогрессивные процессы, штампы и оборудование для холодной и горячей штамповки. -М.: МДНТП. -1971. -С.152-161.

27. Головин В.А., Митькин А.Н., Оленин Л.Д. Определение технологических усилий // Холодная объёмная штамповка. -М.: Машиностроение. -1973. -С.183-191.

28. Головин В.А., Соколов А.М., Лужников С.А. Исследование и разработка процесса отжига заготовок перед холодной деформацией с применением индукционного нагрева // Современные достижения в области холодной объёмной штамповки. -М.: МДНТП. -1984. -С.47-52.

29. Навроцкий Г.А., Головин В.А., Шibaков В.Г. Анализ напряженно-деформированного состояния при холодной высадке //Вестник машиностроения. -1979. - №11. -С.50-52.

30. Масштабный фактор при выдавливании крупных стержневых деталей / В.А.Головин, Ю.А.Митькин, А.Г.Резников и др.// Расчёты на прочность и малоотходная технология в машиностроении. Омск: Изд. ОмПИ. -1987. -С.53-57.

31. Влияние разупрочняющей термической обработки на пластичность и деформируемость сталей 40Х и 12ХН3А /В.А.Белов, А.А.Богатов, В.А.Головин и др. // Автомобильное производство. -1984 - №8. -С.7-12.

32. Исследование изменения поврежденности стали 40Х при холодной пластической деформации и термической обработке/ В.А. Белов, А.А.Богатов, В.А.Головин и др. // ФММ. -1985. -Т.60. -Вып.5. -С.1004-1009.

33. Митькин А.Н., Головин В.А., Богодист В.А. Холодная объёмная штамповка внутренней гайки крепления сдвоенных колес автомобиля // Автомобильная промышленность. -1973. -№6.-С.35-36.

34. Митькин А.Н., Головин В.А., Митькин Ю.А. Штамповка ступенчатых валов редуцированием // Автомобильное производство. -1985. -№4. -С.4-7.

35. Разработка и внедрение процесса холодной объёмной штамповки детали типа "шпиндель" / В.А.Головин, Ю.К.Филиппов, Л.В.Гипп и др. // Кузнечно-прессовое машиностроение. -1980. -№4. -С.3-8.

36. Холодная объёмная штамповка шаровых пальцев большегрузных автомобилей / Г.А.Навроцкий, И.Н.Филькин, В.А.Головин и др. // Кузнечно-штамповочное производство. -1984. -№4. -С.28-31.

37. Конструктивно-технологические требования к автоматам для холодной объёмной штамповки коротких деталей сложной формы / Г.А.Навроцкий, В.А.Головин, Ю.К.Филиппов и др. // Кузнечно-штамповочное производство. -1983. -№4. -С.27-29.

38. Головин В.А., Митькин Ю.А., Брылеев В.Н. Исследование процесса полугорячей штамповки подшипниковых сталеи // Современные достижения в области холодной объёмной штамповки. -М.: МДНП, -1984. -С.82-89.

39. Штампы для холодной объёмной штамповки / Г.А.Навроцкий, В.А.Головин, В.В.Евстифеев и др. -М.: НИИМаш, -1977. -63с.

40. Конструирование штампов для холодной объёмной штамповки / Г.А.Навроцкий, В.А.Головин, В.В.Евстифеев и др. -М.: НИИМаш, - 1976. -67с.

Головин