

ММ 91-124

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ

МОСКОВСКИЙ
ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена
Трудового Красного Знамени государственный технический
университет имени Н.Э. Баумана

На правах рукописи

ХИДЕШЕЛИ КАХАБЕР ВАЛЕРИАНОВИЧ

УДК 621.777.4

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
ШТАМПОВКИ ПОКОВОК ПОЛЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ СЛОЖНОЙ
ФОРМЫ КОМБИНИРОВАННЫМ ВЫДАВЛИВАНИЕМ

Специальность 05.03.05 – Процессы и машины обработки
давлением

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Москва 1990

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

Научный руководитель - Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор Семенов Е.И.

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор Артес А.Э.

- кандидат технических наук, с.н.с. Антошин М.А.

Ведущее предприятие - НИИТАвтопром

Защита состоится "16" мая " 1990 г. в 14³⁰ часов на заседании специализированного совета К.053.15.13 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Ваш отзыв в 1-м экземпляре, заверенный печатью, просим выслать по указанному адресу.

...ться в библиотеке МГТУ
263-65-14.

2" 1990 г.

 Щубин И.Н.

М 481124

заказ 350 объем 1 л.
Баумана.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В условиях развернутой в СССР перестройки и перевода народного хозяйства на новые экономические методы хозяйствования усиливается тенденция к высокой эффективности за счет всесторонней интенсификации общественного производства. "...Усилить режим экономии. Настойчиво добиваться рационального и экономичного расходования всех видов ресурсов, снижения их потерь, ускоренно осуществлять переход к ресурсосберегающим и безотходным технологиям...", говорится в "Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1985-1990 годы и на период до 2000 года". В работе представлены результаты исследований по разработке технологических процессов комбинированного выдавливания поковок полых осесимметричных деталей сложной формы.

Вследствие упрочнения, происходящего при холодной деформации, а также ввиду сложности деформирования материалов с высокими прочностными свойствами при холодном выдавливании возникают большие удельные усилия на инструмент, превышающие допустимые значения, что вызывает снижение стойкости инструмента и необходимость применения более мощного оборудования.

Решение этой проблемы становится возможным путем применения штамповки выдавливанием в условиях неполного горячего деформирования (полугорячее выдавливание). С его помощью становится возможным снижение усилия деформирования в несколько раз по сравнению с холодным выдавливанием, и сохранение его преимуществ, каковыми являются: минимальные затраты на нагрев и отсутствие потерь металла на окислительнообразование, высокая точность поковок, высокое качество поверхности, образование благоприятной микро- и макроструктуры.

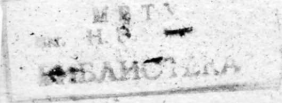
В промышленности широкое применение находят детали типа "двухполостной стакан". Основным недостатком, как и вообще для всех процессов выдавливания, является разностенность стакана, что приводит к вынужденному увеличению припуска и, тем самым, росту расхода металла и ухудшению эксплуатационных качеств изделия. При штамповке деталей данного типа комбинированным выдавливанием (обратное выдавливание, совмещенное с прямым выдавливанием с раздачей) были получены удовлетворительные, с точки зрения разностенности, результаты, что объясняется неподвижностью мат-

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1491124

Хидешели К. В. Разработка ме



рицы относительно нижнего плунсона во время рабочего хода.

Также широко применяют в промышленности детали типа "поршень". Предложен способ изготовления таких деталей комбинированным выдавливанием, включающий в себя обратное выдавливание и прямое выдавливание в стержень с последующим его радиальным выдавливанием в сферу.

Анализ существующих конструкций данных типов деталей показал наличие широкого диапазона типоразмеров, что существенно влияет на кинематику течения, формоизменение и силовой режим.

Анализ рассмотренных нами работ показал, что отсутствуют исследования по формоизменению и силовому режиму получения двухполостных стаканов комбинированным выдавливанием с раздачей, нет сведений о получении деталей типа "поршень" комбинированным выдавливанием, отсутствуют математические модели, позволяющие исследовать процесс в течение всего времени деформации, недостаточно изучены вопросы выбора расчетных схем, нет обоснованных экспериментом аналитических уравнений для определения формоизменения и силового режима, а также для выбора оптимального термомеханического режима. Все это препятствует широкому внедрению прогрессивной технологии штамповки выдавливанием рассматриваемых деталей. Поэтому проведение работ по комплексному исследованию и определению основных параметров процессов комбинированного выдавливания с целью создания научно-обоснованной методики проектирования технологических процессов является актуальной задачей.

Цель и задачи работы. Целью работы является разработка научно-обоснованной методики проектирования технологических процессов изготовления деталей типа "двухполостной стакан" и "поршень" комбинированным выдавливанием и выбора оптимизированного температурного интервала для эффективного осуществления процесса штамповки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Поэтапно исследовать формоизменение заготовки в процессе деформирования и выбрать расчетные схемы процессов комбинированного выдавливания деталей типа "двухполостной стакан" и "поршень".

2. Выполнить экспериментальные исследования закономерностей формоизменения, установить оптимальный энергосиловой режим де-

формирования.

3. Определить оптимальные термомеханические режимы штамповки для разных материалов в широком диапазоне температур, степеней и скоростей деформации.

4. Разработать и опробовать в лабораторных условиях рекомендации по проектированию технологических процессов.

5. Разработать методику теоретического определения силового режима при комбинированном выдавливании, алгоритмы и программы расчетов на ЭЕМ.

Научная новизна. Разработана методика расчета энергосиловых и кинематических параметров процессов комбинированного выдавливания деталей типа "двухполостной стакан" и "поршень" энергетическим методом и получены математические модели для определения силового режима и характера формоизменения при комбинированном выдавливании.

Разработана методика и математическая модель для определения оптимального термомеханического режима штамповки при заданных пластических свойствах штампуемого материала.

На основе результатов теоретических и экспериментальных исследований разработаны научно-обоснованная методика проектирования и технологические процессы комбинированного выдавливания в условиях неполного горячего деформирования.

Автор защищает:

- методику теоретического определения удельного усилия и формоизменения для процессов комбинированного выдавливания;
- методику экспериментального получения аналитических зависимостей формоизменения и удельного усилия от соотношений геометрических размеров;
- методику экспериментального определения прочностных характеристик деформируемого материала от термомеханических условий и установления наиболее эффективных температурных режимов для выдавливания;
- обобщенную методику проектирования технологических процессов комбинированного выдавливания в условиях неполной горячей объемной деформации.

Достоверность научных результатов, полученных с применением современных методов расчета в теоретических исследованиях, подтверждается удовлетворительной сходимостью (в пределах до 16%) ре-

результатов экспериментаов, при проведении которых использована современная техника проведения и обработки данных. Высокая точность полученных данных объясняется также современным уровнем разработанных методик теоретических и экспериментальных исследований.

Практическая ценность. На основе разработанной научно-обоснованной методики можно проектировать технологические процессы комбинированного выдавливания двухполостных стаканов и поршней с определением оптимальных силовых и термомеханических параметров процесса. Разработанная методика проста в применении и ее можно использовать в САПР технологических процессов.

Внедрение результатов. По результатам реализации разработанной методики проектирования были спроектированы техпроцессы и оснастка и отштампованы опытные партии поковок. Результаты разработок переданы для организации промышленного внедрения. Ожидаемый экономический эффект от внедрения на заводе поршневых установок им. Касимова составляет 77 тыс. рублей.

Разработанные методики рекомендованы предприятиям Минтяжмаша ВПТИтяжмашем.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены и обсуждены на научных семинарах кафедры МТБ МТУ им. Н.Э. Баумана в 1988, 1989 и 1990 годах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений.

Работа изложена на 109 страницах машинописного текста, содержит 84 рисунков, 9 таблиц, список литературы из 37 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит обоснование актуальности темы диссертации, научную новизну, основные положения и краткую аннотацию результатов выносимой на защиту результатов работы.

В первой главе проведен анализ литературы по изучаемому вопросу. Дана классификация основных процессов осесимметричного выдавливания, включая простые, совмещенные и комбинированные ви-

ды обработки. Установлено, что с помощью комбинации простых видов выдавливания можно снизить удельные усилия, уменьшить число переходов и повысить качество изготавливаемых деталей.

Проведен обзор комбинированного выдавливания в работах Л.Д.Оленина, Л.Г.Степанского, R. Geiger, В.М.Колесникова, В.В.Грязнова, Ф.А.Коммеля, Л.А.Шофмана, М.Ю.Пискарева, И.М.Исмагилова, X. Kudo и др. Приведены расчетные схемы для каждого рассматриваемого процесса и краткое описание методов теоретического анализа. Дано сопоставление результатов, полученных разными авторами.

Отмечена недостаточная полнота информации о характере силового режима и формоизменения в течение всего процесса деформирования в зависимости от формы и размеров инструмента и исходной заготовки.

Рассмотрена область применения и особенности неполного горячего объемного деформирования. Показаны основные преимущества этого способа, определены нижняя и верхняя границы температурного интервала неполной горячей штамповки. Установлена важность влияния температурно-силовых условий на стойкость инструмента. Отмечено отсутствие в литературе сведений о совместном влиянии свойств материала штампуемого изделия, температуры, скорости и степени деформации на напряжение текучести и выборе оптимального температурного режима штамповки в зависимости от значений напряжения текучести и распределения удельных усилий.

Сформулированы цели и задачи исследования.

Во второй главе разработаны методики проведения теоретических и экспериментальных исследований.

В качестве метода теоретического исследования использован энергетический метод с использованием вариационного принципа о существовании такого поля скоростей среди всех кинематически возможных, которое соответствует минимуму мощности деформирования.

Теоретическое определение кинематического состояния и силового режима проводили в следующей последовательности:

1. Выбор расчетной схемы экспериментально-аналитическим методом координатных сеток, который позволяет разделять очаг пластической деформации на зоны, удобные для задания кинематически возможных полей скоростей.

2. Определение в каждой зоне кинематически возможного поля скоростей, которое удовлетворяет граничным условиям, условию

неразрывности на границах между зонами в интегральной форме и условию постоянства объема.

3. Определение компонентов скоростей деформации.

4. Определение интенсивности скоростей деформации в каждой зоне.

5. Расчеты мощностей внутренних сил, мощностей сил трения и мощностей сил среза и полной мощности деформирования или мощности нагрузки.

6. Расчет величины относительного удельного усилия.

7. Разработка методики определения формоизменения в любой момент деформирования.

8. Определение варьируемых параметров, входящих в выражениях, путем использования принципа минимизации полной энергии деформации.

В методике проведения экспериментальных исследований приведены марки исследуемых материалов, экспериментальная оснастка, используемое оборудование, регистрирующая и измерительная аппаратура.

Изложена методика нанесения, измерения и обработки координатной сетки. Исследование проводили поэтапно. Для каждого этапа изготавливаем составные заготовки, спаянные сплавом Вуда с прямой координатной сеткой и продавливаем на определенный шаг пуансона. По координатам определенного узла до (ρ_0, ξ_0) и после (ρ, ξ) деформирования определяем перемещения, а затем скорости течения частиц металла, в результате чего строим эпюры скоростей течения.

В методике экспериментального исследования формоизменения и силового режима учтены зависимости от геометрических размеров инструмента и заготовки в любой момент деформирования. Чтобы получить полноценную картину с учетом одновременного влияния всех факторов использован аппарат математической статистики.

Методика выбора оптимальных энергосиловых и термомеханических режимов включает следующие пункты:

1. Испытание образцов из аналогичных штампуемой заготовке материалов с учетом влияния температуры, скорости и степени деформации. Построение с помощью статистической обработки математических моделей пластических свойств данного материала в зависимости от указанных факторов.

2. Определение величины относительного удельного усилия по

данным теоретических и экспериментальных исследований.

3. Определение допустимого значения напряжения текучести по величине относительного удельного усилия для выбранного допустимого значения удельного усилия.

4. Выбор температурного режима штамповки данного материала с обеспечением заданной величины удельного усилия на инструменте для фиксированных значений напряжения текучести, скорости и степени деформации из математической модели.

В третьей главе приведен теоретический анализ процессов комбинированного выдавливания деталей типа "двухполостной стакан" и "поршень".

Обоснованы расчетные схемы для обеих деталей, которые показаны на рисунках 1 и 2.

В случае процесса комбинированного выдавливания с раздачей двухполостного стакана принята расчетная схема на две стадии: стационарная (рис. 1а) и заключительная (рис. 1б). Зоны 1, 2, 3, 4, 5 - пластические зоны, 6, 7 - жесткие кольцевые зоны, 8 - жесткая проталкиваемая зона, которая на заключительной стадии отсутствует и верхние и нижние очаги деформации разделяются линией раздела течений, местонахождение которой определяется отношением высоты верхнего очага деформации к высоте общей, заключенной между инструментами пластической зоны h_g :

$$K = h_1 / h_g \quad (1)$$

Тогда $h_1 = K h_g$ $h_2 = (1 - K) h_g$

Для обеих стадий участки, характеризующие скорости центральной недеформируемой зоны и линии раздела течений, можно описать скоростью v_a , а скорость верхнего пуансона относительно недеформируемой жесткой зоны или линии раздела течений можно охарактеризовать скоростью v_1 (рис. 3).

Тогда при комбинированном выдавливании должна соблюдаться следующая зависимость:

$$v_0 = v_1 + v_a \quad (2)$$

После ввода формального коэффициента для скорости C_L формулу (2) можно записать в следующем виде:

$$v_0 = v_0 C_L + v_0 (1 - C_L) \quad (3)$$

При решении задач были приняты следующие допущения:

- заготовку рассматривали как жесткопластичное, несжимаемое, изотропное тело;

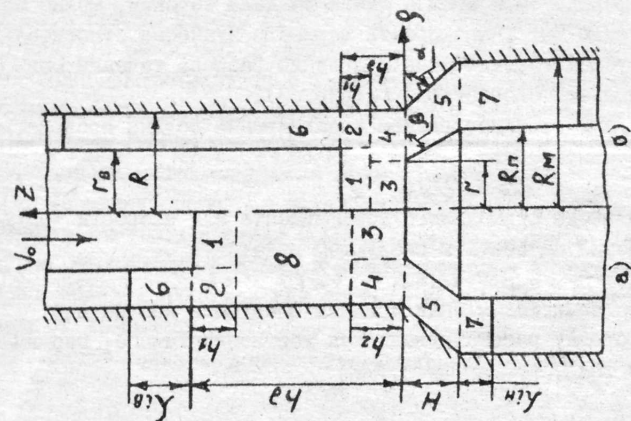


Рис. 1. Расчетная схема протес-
са комбинированного вы-
давливания с раздвиг.

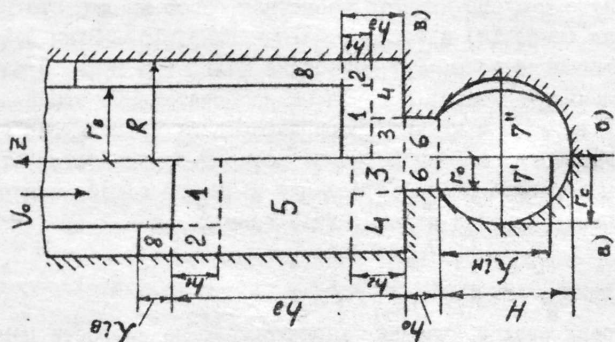


Рис. 2. Расчетная схема протес-
са комбинированного выдавли-
вания деталей типа "поршень".

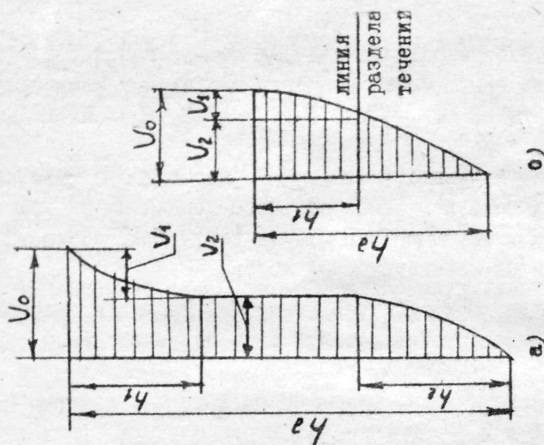


Рис. 3. Типовые участки эири
скоростей течения при
комбинированном выдав-
ливании на стационар-
ной (а) и закличитель-
ной (б) стадиях.

- инерционными силами пренебрегали;
- скорость деформирующего инструмента v_0 принимали постоянной;
- силы трения на поверхности контакта заготовки с инструментом учитывали зависимостью $\tau_k = \mu \sigma_s$;
- упругими деформациями инструмента пренебрегали.

На основании опытных данных и обобщения принятых допущений задаем поле скоростей в каждой зоне, удовлетворяющие граничным условиям и условию несжимаемости, а также зависимости (2).

Получены выражения для определения формоизменения в любой момент деформирования, в частности:

Глубина верхней полости:

$$h_{ib}^{сум} = \delta \cdot \frac{R^2}{R^2 - r_0^2} \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

где δ - элементарный ход пуансона; n - количество этапов, на которое разбит общий ход пуансона.

Глубина нижней полости

$$h_{in}^{сум} = \delta \frac{R_k^2}{R_M^2 - R_n^2} \sum_{i=1}^n (1 - C_i) \quad (5)$$

Силовой режим определяем следующим образом:

Мощность внутренних сил:

$$N_i = \sigma_s \int_V \dot{\epsilon}_i dV \quad (6)$$

где σ_s - напряжение текучести, V - объем i -ой зоны.

Мощность сил среза или мощность максимальных касательных напряжений на поверхностях разрыва скоростей.

$$N_{i-j} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \int_f |\dot{v}_i - \dot{v}_j| df \quad (7)$$

где f - площадь границы между зонами, $\dot{v}_i$ и $\dot{v}_j$ - абсолютные значения скоростей сдвига на границах между зонами.

Мощность сил трения:

$$N_T = \mu \sigma_s \int_F v_k dF \quad (8)$$

где μ - коэффициент трения, v_k - скорость течения частиц металла вдоль поверхности контакта с инструментом, F - площадь поверхности контакта.

Полная мощность деформирования или мощность нагрузки равна:

$$N = \sum N_i + \sum N_{i-j} + \sum N_T \quad (9)$$

Относительное удельное усилие:

$$q/\sigma_s = \frac{N}{\pi r_0^2 \sigma_s v_0} \quad (10)$$

На стационарной стадии глубины верхних и нижних очагов деформации определяем из минимума полной энергии деформирования:

$$\frac{\partial (q/\sigma_s)}{\partial h_1} = 0 \quad \frac{\partial (q/\sigma_s)}{\partial h_2} = 0 \quad (II)$$

Были получены выражения для глубин очагов:

$$h_1 = \sqrt{A/B} \quad \text{и} \quad h_2 = \sqrt{C/D} \quad (I2)$$

где

$$A = \frac{2(2R^3 - 3R^2\tau_b + \tau_b^3)}{3\sqrt{3}(R^2 - \tau_b^2)} + \frac{\tau_b}{4\sqrt{3}} + \frac{R\sqrt{R^2 - \tau_b^2}}{4\sqrt{3} \cdot \tau_b} + \frac{2\mu\tau_b}{3}$$

$$B = \frac{2R^2}{3\sqrt{3} \tau_b (R^2 - \tau_b^2)} + \frac{2\mu M R}{3(R^2 - \tau_b^2)}$$

$$C = \frac{\tau_b^3}{4\sqrt{3} \tau_b^2} + \frac{\tau_b \sqrt{R^2 - \tau_b^2}}{4\sqrt{3} \tau_b^2} + \frac{2\mu\tau_b^3}{3\tau_b^2} + \frac{2\tau_b^2(2R^3 - 3R^2\tau_b + \tau_b^3)}{3\sqrt{3} \tau_b^2 (R^2 - \tau_b^2)}$$

$$D = \frac{2R^2 \tau_b}{3\sqrt{3} \tau_b^2 (R^2 - \tau_b^2)} + \frac{2\mu M R \tau_b^2}{3\tau_b^2 (R^2 - \tau_b^2)}$$

Местонахождение линии раздела течения на заключительной стадии должно соответствовать минимуму полной энергии и определено следующим образом:

$$\partial (q/\sigma_s) / \partial \kappa = 0 \quad (I3)$$

Коэффициент скорости для обеих стадий определяем минимизацией всех сил по C_i :

$$\partial (q/\sigma_s) / \partial C_i = 0 \quad (I4)$$

Были разработаны алгоритмы и программы расчета комбинированного выдавливания с раздачей. Получены графические зависимости влияния геометрических размеров инструмента, в частности верхнего и головки нижнего пуансонов, и исходной высоты заготовки на размеры верхнего и нижнего очагов деформации, на величину относительного удельного усилия как для стационарной, так и для заключительной стадий.

Было установлено, что минимум относительного удельного усилия достигается при соотношениях размеров $\tau_b / R = 0,855$ и $\tau / R = 0,375$, при которых глубины очагов деформаций достигают максимальных размеров.

Показаны также характер изменения коэффициента скорости в зависимости от геометрических размеров инструмента и высоты исходной заготовки. Доказано, что при соотношениях $R_M / R_n = 1$, коэффици-

ент скорости равен единице и процесс идет по обратной схеме. При соотношении $\tau_0/R = 1$ процесс протекает по прямой схеме и $C_i = 0$.

Программы расчета позволяют рассмотреть разные варианты выдавливания, в частности обратное выдавливание, прямое с раздачей выдавливание и их комбинации, которые сопоставляются с экспериментальной кривой.

В случае теоретического анализа процесса комбинированного выдавливания детали типа "поршень" расчетная схема подразделена на три схемы в соответствии с тремя стадиями:

- первая стационарная стадия (рис. 2а), когда происходит комбинированное обратное выдавливание стакана и прямое выдавливание стержня до его подхода до дна сфер;

- вторая стационарная стадия, сочетающая обратное выдавливание и прямое выдавливание стержня с началом его превращения в сферу радиальным выдавливанием и образованием зоны 7 (рис. 2б);

- заключительная стадия (рис. 2в), аналогичная, как при комбинированном выдавливании с раздачей.

Выделяем следующие зоны: 1, 2, 3, 4, 7 - пластические зоны, 6, 7', 8 - жесткие стержневые и кольцевая зоны, 5 - жесткая проталкиваемая центральная зона. Принимаем допущения, аналогичные для детали "двухполостной стакан" и в силе остаются выражения (I) - (3). Заданное поле скоростей удовлетворяет граничным условиям, условию несжимаемости и зависимостям (I) - (3).

Формоизменение в верхней полости определяем по формуле (4). Длина выдавленного стержня в нижней полости равна:

$$h_{ин}^{сум} = \delta \frac{R^2}{r_0^2} \sum_{i=1}^n (1 - C_i) \quad (15)$$

Силовой режим определяем по выражениям (6) - (10). Полученные по формуле (II) величины высот очагов деформаций равны:

$$h_1 = \sqrt{A_1/B_1}, \quad h_2 = \sqrt{C_1/D_1} \quad (16)$$

где $A_1 = \frac{2}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{2R^3 - 3R^2\tau_0 + \tau_0^3}{R^2 - \tau_0^2} + \frac{\tau_0}{3\sqrt{3}} + \frac{\mu\pi\tau_0}{3}$

$$B_1 = \frac{\mu\pi R}{R^2 - \tau_0^2} + \frac{R}{\sqrt{3}\tau_0^2}$$

$$C_1 = \left(\frac{\mu\pi}{3\tau_0^2} + \frac{1}{3\sqrt{3}\tau_0^2} \right) (2R^3 - 3R^2\tau_0 + \tau_0^3) + \frac{2(R^2 - \tau_0^2)\tau_0}{3\sqrt{3}\tau_0^2}$$

$$D_1 = \frac{R^2}{\sqrt{3}\tau_0^2\tau_0}$$

Для этого процесса справедливы выражения (I3) и (I4) по которым определяем положение линии раздела течения и коэффициент скорости.

Были составлены алгоритмы и программы расчета данного процесса, в результате реализации которых были построены зависимости высот очагов деформации и величины относительного удельного усилия, а также значения коэффициента скорости от соотношений геометрических размеров инструмента, в частности диаметров верхнего пуансона и очага матрицы, и высоты исходной заготовки. Сопоставлены разные схемы выдавливания: обратное, прямое в стержень, прямое в стержень с одновременным радиальным выдавливанием и комбинированное выдавливание.

Все полученные графические зависимости как в случае комбинированного выдавливания с раздачей, так и во втором случае были построены для широкого диапазона изменения значений коэффициентов трения деформируемого материала по пуансону и по матрице.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных по методике, разработанной в главе 2.

Было проведено поэтапное исследование кинематики течения при комбинированном выдавливании деталей типа "двухполостной стакан" и "поршень". Установлено наличие зон с ярко выраженной пластической деформацией и без нее на определенной стадии деформирования, что доказывает правильность теоретического допущения о наличии разрыва скоростей на границах между зонами и справедливость принятых в теоретических исследованиях расчетных схем. Проведен анализ качественной картины течения и были построены эпюры скоростей течения как для стационарной так и для заключительной стадий. Проанализирован характер изменения скоростей во всем объеме очага деформации. Установлены закономерности поведения центральной, жесткой недеформируемой зоны в течение всего процесса деформирования. Установлена идентичность кинематики течения жесткой недеформируемой зоны и линии раздела течений, что позволило описать их перемещение одинаковыми уравнениями.

Анализ качественной картины течения при комбинированном выдавливании поршня подтвердил правильность разделения принятой расчетной схемы на три стадии и позволил уточнить форму и размеры очага пластической деформации в сферической зоне.

Было проведено экспериментальное исследование геометрических размеров инструмента, в частности R/τ_s , R_M/R_0 , R/τ и высоты исходной заготовки $h_{20}/2R$ на характер формоизменения h_c^s и h_c^H и

силовой режим P/δ_s в течение всего процесса деформирования по ходу пунсона $\Delta H/2R$.

Планирование эксперимента и статистическая обработка данных позволили получить уравнения регрессии:

$$h_i^e/R = 1,352 + 0,371x_1 + 0,042x_2 - 0,021x_3 + 0,046x_4 + 0,733x_5 - 0,034x_5 - 0,212q_5 \quad (16)$$

$$h_i^H/R = 0,816 - 0,319x_1 + 0,089x_2 + 0,131x_3 + 0,123x_4 + 0,638x_5 + 0,176x_5 + 0,012q_5 \quad (17)$$

$$P/\delta_s = 0,738 - 0,147x_1 + 0,01x_2 + 0,025x_3 + 0,045x_4 - 0,036x_5 + 0,087x_5 - 0,063q_5 \quad (18)$$

где $x_1 = 7,782(\frac{R}{r_0} - 1,257)$; $x_2 = 24,69(R_H/R_H - 1,463)$;

$x_3 = 5,49(R/r - 2,36)$; $x_4 = 0,066(\frac{r_0}{2R} - 60)$;

$x_5 = 0,074(\frac{H}{2R} - 22,5)$; $x_5 = 1,001(x_5^2 - 0,554)$;

$q_5 = 2,25(x_5^2 - 0,909x_5)$.

Все расчеты по определению коэффициентов модели, их дисперсий, критерий Стюдента и критерий Фишера выполнены на ЭВМ.

Полученные уравнения регрессии позволяют в рассматриваемом диапазоне соотношений определить формоизменение и силовой режим в течение всего процесса деформирования. По ним можно определить окончательное формоизменение, что важно для прогнозирования качества получаемой детали.

На имеющемся сменном инструменте были проведены экспериментальные исследования силового режима и оценено качество заполнения сферической полости при штамповке деталей "поршень". Установлено, что оптимальный силовой режим достигается при соотношениях размеров инструмента $r_0/R = 0,85$ и $r_0/R = 0,666$, что с высокой точностью (до 16%) совпадает с результатами теоретических исследований. Составлены таблицы, позволяющие в рассмотренном интервале геометрических соотношений прогнозировать заполнение сферической полости и тем самым определить возможность брака.

Согласно разработанной методике были проведены испытания образцов из сталей 10, 45 и 40Х в изотермических условиях в температурном интервале 400–800°C при разных скоростях деформирования. В результате обработки экспериментальных данных было получено уравнение регрессии, позволяющее оценить напряжение текучести при одновременном влиянии материала заготовки (1В), температуры деформации ($T^\circ\text{C}$), скорости деформации ($\dot{\epsilon}$, с⁻¹) и степени деформации: $\sigma_s = 373,662 + 24,032x_1 - 189,666x_2 + 18,924x_3 + 104x_4 + 207,472x_1 - 6,999x_2 - 243,381x_3 - 6x_4$, (19)

где $x_1 = 3,846(\overline{PB} - 1,323)$; $x_2 = 2/300(T-600)$;
 $x_3 = 10,152(\overline{\epsilon_i} - 0,0776)$; $x_4 = 5(\overline{\epsilon_i} - 0,3)$;
 $\overline{x}_1 = x_1^2 + 0,58x_1 - 0,784$; $\overline{x}_2 = x_2^2 - 0,666$;
 $\overline{x}_3 = x_3^2 + 0,58x_3 - 0,784$; $\overline{x}_4 = x_4^2 - 0,666$.

Для конкретного случая выдавливания поршня с соотношениями геометрических размеров $r_0/R = 0,85$ и $r_0/R = 0,666$, при которых достигается минимальное усилие деформирования определяем величину максимального значения относительного удельного усилия $\overline{\eta}/\overline{\sigma_s}$ (в эксперименте для сплава АД1 с $\overline{\sigma_s} = 140$ МПа максимальное значение удельного усилия $\overline{\eta}$ равно 950 МПа, соответственно $\overline{\eta}/\overline{\sigma_s} = 6,8$, что и получали в теоретическом анализе). Тогда для требуемого значения допустимого удельного усилия (в частности выбрали $[\overline{\eta}]_{доп} = 1700$ МПа), допустимое значение напряжения текучести равно $[\overline{\sigma_s}]_{доп} = 250$ МПа, то есть, при таких значениях напряжения текучести деформируемого материала инструмент будет работать без потери стойкости. Тогда, для допустимого значения напряжения текучести при фиксированных величинах скорости и степени деформации, были получены уравнения для определения оптимальной температуры штамповки:

$$\begin{aligned} & \text{— для стали 45 } T = \sqrt{210540I + 3246,75(1050 - [\overline{\sigma_s}]_{доп})} - 1450 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (20) \\ & \text{— для стали 40X } T = \sqrt{210540I + 3246,75(1150 - [\overline{\sigma_s}]_{доп})} - 1450 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (21) \end{aligned}$$

По уравнениям (20) и (21) были выбраны температурные режимы штамповки, которые составили интервал $710-735^\circ\text{C}$, и отштампованы опытные партии обеих видов деталей. Были получены поковки высокого качества без разрушения, что подтвердил анализ их макрошлифов, а нагрузка на инструменте, которая фиксировалась с помощью записывающего устройства, не превышала допустимых значений.

В пятой главе изложена разработанная методика проектирования технологических процессов комбинированного выдавливания в условиях холодной и неполной горячей деформации, все составные пункты которой являются результатами проведенных теоретических и экспериментальных исследований. Дана схема алгоритма методики проектирования.

На основе предложенной методики были разработаны технологические процессы штамповки поковок двухполостного стакана и поршня комбинированным выдавливанием. В результате были отштампованы опытные партии поковок данных деталей.

В целях определения возможности штамповки титановых сплавов ВТ1 были проведены испытания образцов из них, которые показали

недопустимость штамповки данных материалов в условиях холодной штамповки из-за возникающих больших удельных усилий и малопластичных свойств данных сплавов, приводящих даже при малых степенях деформации к полному разрушению.

Штамповка в условиях неполной горячей деформации 850°C дала возможность продиформировать данные сплавы с высоким качеством поверхности без разрушения. Даны рекомендации по применению технологических смазок на стеклышной основе.

Партии деталей, рекомендации по технологическим процессам и методика их проектирования переданы для организации промышленного внедрения на ПО Союзнефтемаш и на предприятиях Минтяжмаша.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Разработана научно обоснованная методика проектирования технологических процессов комбинированного выдавливания с раздачей двухполостных стаканов и принципиально нового процесса комбинированного выдавливания, совмещающего в себе обратное выдавливание полый втулки и прямое выдавливание стержня с последующим его превращением в сферу радиальным выдавливанием в условиях неполной горячей объемной деформации.

2. Разработаны математические модели, позволяющие определить кинематическое состояние заготовки, формоизменение и силовой режим в любой момент деформирования и реализованы на ЭВМ. Разработанные математические модели позволяют определить формоизменение, кинематическое состояние и силовой режим для входящих в рассматриваемых процессах комбинированного выдавливания простых видов выдавливания: обратное выдавливание, прямое выдавливание с раздачей, прямое выдавливание стержня гладким пуансоном, прямое выдавливание стержня с последующим радиальным выдавливанием.

3. Экспериментальное исследование кинематики течения при комбинированном выдавливании наряду с зонами ярко выраженной интенсивной пластической деформации показало наличие зон без пластических деформаций, изучение характера изменения формы и размеров, кинематического состояния которых позволило нам установить границы перехода деформируемой среды из одного состояния в другое, тем самым установить стадии деформирования и принять расчетные схемы для процессов комбинированного выдавливания деталей типов "двухполостной стакан" и "поршень", а также установить общие закономерности выбора расчетных схем для других процессов комбинированного выдавливания.

4. Получены уравнения регрессии, определяющие значения напряжения текучести в зависимости от одновременного влияния материала заготовки, температуры деформации, степени и скорости деформации.

5. Получены аналитические выражения для определения температуры штамповки в зависимости от материала, скорости и степени деформации при заданных пластических свойствах заготовки.

6. Достоверность полученных теоретических результатов подтверждена результатами экспериментальных исследований, расхождение которых с теоретическими результатами не превышает 16 %.

7. Штамповка опытной партии деталей показала высокое качество получаемых изделий, что еще раз подтвердила практическую значимость результатов проведенных исследований. Высокое качество полученных поковок из титановых сплавов дает повод для поисков в целях расширения номенклатуры материалов, штампуемых в условиях неполного горячего объемного деформирования.

8. Результаты исследований получены с применением ЭВМ, что дает возможность их использования, как элементов САПР, а дальнейшие работы вести с целью создания комплексных САПР технологических процессов комбинированного выдавливания в условиях неполной горячей объемной деформации.

9. Ожидаемый экономический эффект от внедрения переданных разработок на предприятиях СоюзНефтеМаша составит 77 тыс.руб. в год. Разработанные технологические процессы рекомендованы на предприятиях МинТяжМаша НПО ВТИТяжМашем.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах:

1. Семенов Е.И., Хидешели К.В. Экспериментальное исследование кинематики течения при комбинированном выдавливании // Вестник машиностроения. - 1989. - № 4. - С. 52-54.

2. Семенов Е.И., Хидешели К.В. Определение технологических усилий и скоростей деформирования при комбинированном выдавливании с раздачей // Вестник машиностроения. - 1989. - № 11. - С. 50-53.

