

11457443

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

На правах рукописи

Хамин Олег Николаевич

УДК 621.777.4.001.57

ОБОСНОВАННЫЙ ВЫБОР ЭНЕРГОСИЛОВЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПОЛУТОРЯЧЕГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ
ПОЛОСТЕЙ ПРИ НОРМИРОВАНИИ ОСНОВНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА

05.03.05 процессы и машины
обработки давлением

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва - 1987

Работа выполнена в Куйбышевском ордена Трудового Красного
Знамени политехническом институте им. В.В.Куйбышева

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Б.Ф.ТРАХТЕНБЕРГ

Официальные оппоненты- доктор технических наук,
профессор Л.Г.СТЕЩАНСКИЙ
- кандидат технических наук,
с.н.с. А.М.ДМИТРИЕВ

Ведущее предприятие - ПО "ГПЗ-4" г. Куйбышев

Защита диссертации состоится " 13 " апреля 1987 г.
на заседа
ковском
ресу: 10
С дис
имени Н.
Ваш о
печатью,

Автор

Уч
ка
до

М 457 443

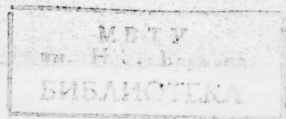
ИН

Типогра
Л - 446

25.02.87

Актуальность темы. Актуальность проблемы широкого внедрения безотходных и малоотходных методов пластического формообразования в машиностроении указана в директивах XXVII съезда КПСС. В указанной проблеме большое значение имеют вопросы качества, работоспособности и экономичности штампов, которые во многом предопределяют целесообразность внедрения конкретного технологического процесса. Среди прогрессивных способов их изготовления в последнее время всё более заметное место занимают методы выдавливания инструментальных полостей. Фундаментальный вклад в решение теоретических и прикладных вопросов штамповки выдавливанием внесли работы отечественных учёных Я.М.Охрименко, О.А.Ганаго, М.В.Сторожева, А.Г.Овчинникова, Л.В.Прозорова, И.П.Ренне, Е.И.Семёнова, А.Д.Томлёнова, Е.П.Унксова и других. Вместе с тем технологические процессы выдавливания инструментальных полостей имеют ряд особенностей (по классу материалов, температурному интервалу деформации, требованиям к качеству рабочей зоны и работоспособности выдавленных полостей, жёстким условиям эксплуатации мастер-штампов), что требует дополнительных исследований.

Важные результаты по выдавливанию инструментальных полостей получены в работах С.А.Довнара, В.Н.Капранова, Д.П.Кузнецова, А.И.Когана, А.И.Хибемяги и других учёных и специалистов. По основным технико-экономическим показателям различных вариантов выдавливания, а также работоспособности выдавленных полостей и стойкости мастер-штампов предпочтительно применяется полугорячее выдавливание (ПГВ). Метод обеспечивает снижение трудоёмкости изготовления матриц в 2-5 раз, увеличение их стойкости до 1,5-4 раз по сравнению с традиционными способами производства штампов и пресс-форм. Важно подчеркнуть: широкое внедрение ПГВ сдерживается его недостаточной изученностью и отсутствием методики обоснованного назначения основных технологических параметров, что заметно снижает основные показатели процесса. Следует отметить, что известные методики не предусматривают увязку основных технологических параметров с регламентирующими показателями ПГВ (стойкость мастер-пуансонов и качество выдавленных полостей). Этот круг задач целесообразно решать в ключе параметрической оптимизации. Однако применительно к особенностям ПГВ подобных решений нет. Таким образом, вопросы обоснованного назначения и оптимизации параметров ПГВ являются актуальными.



Цель работы. Целью работы является разработка метода обоснованного назначения параметров технологического процесса ПТВ инструментальных полостей, обеспечивающих повышение работоспособности мастер-штампов и получение полостей с заданными параметрами качества.

Для реализации поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- разработка математической модели параметрической оптимизации процесса ПТВ инструментальных полостей;
- функциональное описание структурных элементов математической модели на основе разработки метода приближенного моделирования силовых параметров;
- разработка расчётной методики обоснованного назначения основных параметров ПТВ инструментальных полостей;
- апробация и внедрение основных результатов работы.

Научная новизна. К числу новых результатов, которые защищаются в работе, относятся:

1. Разработка математической модели параметрической оптимизации ПТВ, обеспечивающей обоснованный выбор силовых и технологических параметров при экономически целесообразной стойкости мастер-штампов с учётом параметров качества и эксплуатационной работоспособности полученных выдавливанием полостей.

2. Разработка и апробация метода приближенного моделирования силовых параметров горячей деформации с численной оценкой достоверности моделирования. Получение критериального уравнения для определения силовых параметров при штамповке выдавливанием полых заготовок; обоснование условий подобия. Привлечение метода для приближенного моделирования силовых параметров при скоростных (10^{-2} – 10^2 с $^{-1}$) процессах выдавливания на основе использования результатов статических испытаний.

3. Разработка на основе анализа механической схемы деформации при обратном выдавливании способа испытаний (а.с. № 892268) на осадку, позволяющего варьировать в широких пределах уровень сжимающих напряжений и условия контактного трения.

4. Разработка комплексной методики экспериментального решения задач приближенного моделирования, включающей: расчётно-экспериментальный метод определения контактных напряжений при выдавливании осесимметричных полостей, методику и аппаратное оснащение для экспериментального определения силовых параметров,

метод оценки силовых параметров при выдавливании полых заготовок, лабораторную методику прогнозной оценки сравнительной работоспособности инструментальных объектов.

Практическая ценность и реализация основных результатов работы в промышленности:

- получены номограммы для обоснованного назначения температурно-скоростного режима ПТВ в заготовках из инструментальных сталей, обеспечивающего повышение стойкости мастер-штампов с выходом на предельно возможную стойкость мастер-пуансонов;
- для повышения стойкости пуансонов осуществлено совершенствование технологического процесса горячей многопереходной штамповки выдавливанием сдвоенных полых заготовок колец подшипников на автоматических линиях типа Л309.

Основные результаты работы внедрены на предприятиях ВПО "Союзхимпласт" и ППЗ-23 Минавтопрома с экономическим эффектом 273,6 тыс. руб.

Публикация и апробация работы. По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ в периодических изданиях, сборниках и трудах научно-технических конференций, получено авторское свидетельство, сделано 12 докладов на научно-технических конференциях и семинарах.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх тематических глав, основных выводов, списка литературы (190 наименований). Материал диссертации изложен на 145 страницах машинописного текста, содержит 27 таблиц, 44 рисунка. Справочный материал к диссертации (промежуточные расчёты, результаты опытно-промышленных испытаний, акты внедрения и т.п.) приведены в приложениях (10 приложений на 46 страницах машинописного текста, 20 таблиц, 3 рисунков).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к диссертации обоснована актуальность проблемы совершенствования технологических процессов полугорячего выдавливания инструментальных полостей.

В первой главе показано: известные теоретические и экспериментальные исследования являются недостаточными для обоснованного назначения параметров ПТВ инструментальных полостей произвольной геометрии. Традиционные решения не в полной мере отвечают проблеме совершенствования (и тем более оптимизации)

процесса, т.к. они не сориентированы на оценку конечных результатов ПТВ по совокупности основных показателей (по эксплуатационным показателям – энергоёмкость процесса и стойкость мастер-штампов, по выходным показателям – качество и работоспособность выдавленной полости). Соответственно возможности ПТВ используются не в полной мере, а достигнутые технико-экономические показатели далеко не всегда отвечают условиям оптимальности. Сообразно важное значение имеет разработка математической модели ПТВ, нацеленной на решение задачи обоснованного назначения основных параметров процесса с выходом на предельно возможную работоспособность мастер-штампов и получение полостей с заданными параметрами качества. Ключевым вопросом в этом плане является разработка эффективного метода решения математической модели.

Во второй главе разработана математическая модель параметрической оптимизации ПТВ. Намечены пути решения задачи на основе разработки метода приближённого моделирования силовых параметров. В качестве параметров оптимизации модели приняты $T, v_d, \Delta H$ (где T – температура деформации, v_d – скорость деформирования, ΔH – рабочий ход мастер-пуансона), а целевой функции – зависимость удельных усилий $\bar{p}$ от параметров оптимизации. Последнее обосновано тем, что для процессов формоизменения со схемами неравномерного всестороннего сжатия силовые параметры являются в известной мере интегральным показателем процесса (предопределяют деформируемость инструментальных заготовок, возможность получения заданного рельефа и формирования бездефектной полости, стойкость мастер-штампов). Ограничения, накладываемые на параметры оптимизации, определены из анализа обобщённых показателей процесса, введённых в модель в качестве нормируемых. С учётом изложенного модель оптимизации ПТВ при закреплении схемы нагружения, физико-механических свойств заготовки и внешних условий обработки (обобщённо параметр $\mathcal{H}$) получена в виде

$$\bar{p}(T, v_d, \Delta H, \mathcal{H}) \rightarrow \min \quad (1)$$

при ограничениях

$$C(T, v_d, \Delta H, \mathcal{H}) \geq C_3^{onm}; \quad (2)$$

$$T_{max} = (A_I - 20) \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta H = \Delta H_H;$$

$$v_d^{min} \left| \begin{array}{l} R_n \leq 30 \text{ мм} \\ \Delta H \leq R_n \end{array} \right. = 0,25 \text{ мм/с},$$

$$T_{min} = (T_{рекр} + 50) \text{ } ^\circ\text{C};$$

$$v_d^{max} = 10 \text{ мм/с},$$

$$v_d^{min} \left| \begin{array}{l} R_n \leq 30 \text{ мм} \\ R_n < \Delta H \leq 2 R_n \end{array} \right. = 0,5 \text{ мм/с} \quad (3)$$

$$\left. \begin{array}{l} v_d^{min} \left\{ \begin{array}{l} 30 < R_n \leq 60 \text{ мм} \\ \Delta H \leq R_n \end{array} \right. = 1,0 \text{ мм/с}, \\ v_d^{min} \left\{ \begin{array}{l} 60 < R_n \leq 100 \text{ мм} \\ \Delta H \leq R_n \end{array} \right. = 2,0 \text{ мм/с}, \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} v_d^{min} \left\{ \begin{array}{l} 30 < R_n \leq 60 \text{ мм} \\ R_n < \Delta H \leq 2R_n \end{array} \right. = 2,0 \text{ мм/с}, \\ v_d^{min} \left\{ \begin{array}{l} 60 < R_n \leq 100 \text{ мм} \\ R_n < \Delta H \leq 2R_n \end{array} \right. = 4,0 \text{ мм/с}. \end{array} \right\} \quad (3)$$

Здесь C_{onm} - экономически обоснованная стойкость мастер-пуансонов; T_{max} и T_{min} - соответственно верхняя и нижняя границы температурного интервала, назначенные из условия получения полости гарантированного качества; v_d^{max} и v_d^{min} - то же по скорости деформирования с учётом производительности процесса; R_n - характерный размер полости в плане (индекс "н" - нормируемый).

Модель (1)-(3) при закреплённом способе выдавливания и материале заготовки сведена к системе

$$\left. \begin{array}{l} \bar{p}(T, v_d, \Delta H) = a_0 + \sum_{i=1}^3 a_i x_i + \sum_{i < j} a_{ij} x_i x_j + \dots, \\ C(T, v_d, \Delta H) = b_0 + \sum_{i=1}^3 b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i x_j + \dots, \\ C = C(\bar{p}), \quad \Delta H = \Delta H_n, \quad x_1 = [T], \quad x_2 = [v_d], \quad x_3 = [\Delta H], \end{array} \right\} \quad (4)$$

имеющей однозначное решение по параметрам оптимизации T и v_d . В (4) $a_0, a_i, a_{ij}, \dots, b_0, b_i, b_{ij}, \dots$ - коэффициенты, численные значения которых определяются особенностями объекта.

Решение системы (4) упирается в описание её структурных составляющих. Эта задача решена на основе разработки метода приближённого моделирования силовых параметров при выдавливании. В основу метода положен принцип Δt -шага, предопределяющий разбиение процесса на квазистационарные микростадии, для которых в силу неоднозначности полей скоростей, деформаций и напряжений, условия подобия различны. Соответственно испытание для каждой микростадии необходимо проводить при схемах нагружения, подобранных из условия соответствия (или близости) напряжённо-деформированного состояния модели и натурального объекта. Каждая схема испытаний при степени деформации ε_i является точечным аналогом T_i исследуемого процесса по $\bar{p}$ (рис.1) Для выхода на характеристические точки T_i в пределах кривой $\bar{p}(\varepsilon_i)$ необходимо выполнить соответствующее количество аналоговых испытаний (см. кривые 2-5). Сообразно, при наперёд известном ходе кривой $\bar{p}(\varepsilon)$ для натурального объекта, каждая точка T_i отвечает той степени деформации ε (или,

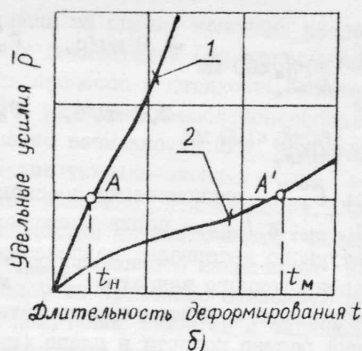


Рис.1. Моделирование силовых параметров процессов ОМД: а - моделирование объекта (кривая 1) с использованием нескольких схем испытаний (2-5); б - аналогия по $\bar{p}$ между скоростными (кривая 1) и статическими (2) процессами

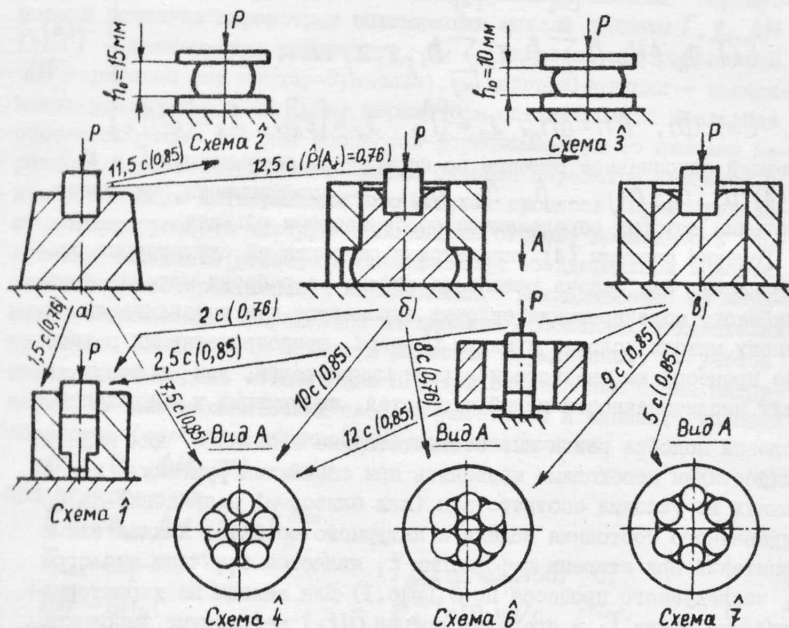


Рис.2. Действительные схемы (1-7) модельных испытаний (указаны стрелками) для моделирования силовых параметров ПВБ базовой полости (а-в)

что то же моменту деформации t_k), при которой все критерии подобия критериального уравнения, описывающего силовой режим при выдавливании, имеют одинаковые значения для аналоговой схемы испытаний и натурального объекта. Соответственно справедливо и обратное: при выполнении всех условий подобия, согласно критериального уравнения, выбор характеристических точек T_i однозначен, а по их совокупности может быть построена (или аналитически выражена) кривая $\bar{p}(\varepsilon)$ (в данном случае искомая) для натурального объекта. Таким образом, моделирование сведено к точечной оценке $\bar{p}$ в соответственные (по выполнению требований критериального уравнения для натурального объекта и модели) моменты деформации.

Для априорной численной оценки достоверности выбранных модельных аналогов осуществлена статистическая интерпретация метода аналогии для процессов ОМД. На её основе получена вероятностная оценка точности (достоверности) моделирования

$$\hat{P}(A_j) = \hat{R} + (I - \hat{R}) [I - (q_j - d_{jk}) / q_k], \quad (5)$$

где q_j и q_k — количество признаков (параметров) сравниваемых процессов j -го и k -го; d_{jk} — количество совпавших (эквивалентных) параметров

$$\hat{R} = \hat{P}(H_0) = I - \tilde{p}_0^2; \quad \tilde{p}_0 = I - C_{d_{jk}}^{d_{jk}} \cdot C_{q_j - d_{jk}}^{q_{jp} - d_{jk}} : C_{q_j}^{q_{jp}}; \quad q_j = \bigcup_1^p q_{jp}.$$

Из физического смысла следует: если оценка по (5) при увеличении числа сравниваемых признаков стремится к некоторому пределу, то она является состоятельной оценкой аналогии (подобия). Для определения $\hat{P}(A_j)$ необходимо иметь информацию о значениях q_j , q_k и d_{jk} в момент t_k , характеризующий определённую микростадия пластической деформации. Эта задача конкретно решена на основе анализа критериального уравнения для ПТВ, которое получено методом анализа размерности в виде

$$\frac{\bar{p}}{b_s} = F \left(\frac{D}{H}, \frac{R_n}{D}, \frac{\Delta H}{H_{пл}}, \frac{S_k}{V^{2/3}}, \frac{\sigma_i}{\sigma_s}, \frac{\tau_k}{b_s}, \frac{T_n}{T_z}, \frac{v_{dt}}{H_{пл}}, \frac{v_d l}{H_{пл} \sigma_s}, \frac{t \sigma_s}{l}, \nu_6, \mu \right). \quad (6)$$

В (6): D и H — диаметр и высота заготовки, R_n — характерный размер поперечного сечения полости, ΔH — рабочий ход мастер-пуансона, $H_{пл}$ — характерный размер очага деформации, S_k — поверхность контакта заготовки с рабочими элементами штампа, V — объём заготовки, σ_s — напряжение текучести, σ_i — интенсивность напряжений, ν_6 — показатель вида напряжённого состояния, τ_k — контактные касательные напряжения по поверхности S_k , T_n и T_z — среднемассовая температура в рабочей зоне пуансона и заготовки,

v_d – скорость деформирования, η – коэффициент вязкости, μ – коэффициент трения, t – длительность процесса (микростадии). Полнота уравнения (6) подтверждается наличием критериев, входящих в известные решения М.В.Сторожева, О.А.Ганаго, Л.Т.Степанского, а также ряда дополнительных критериев ($\Delta H/H_{пл}$, $S_K/V^{2/3}$, T_K/G_s), отражающих кинематику течения и граничные условия.

Известно, что одновременное выполнение всех условий подобия, согласно (6), невозможно. Это ограничение в работе устранено за счёт моделирования по методу аналогии, базирующегося на принципе равнозначности вклада каждого критерия подобия по его влиянию на оценку $\hat{P}(A_j)$. Обоснована допустимость исключения ряда критериев при условии достижения априорно заданной (и удовлетворительной для инженерных расчётов) точности в определении силовых параметров. Показано, что моделирование процессов объёмной штамповки с $\hat{P}(A_j) \geq 0,65$ гарантирует воспроизведение силовых параметров с погрешностью не более 15% (достигается при равенстве не менее восьми из двенадцати критериев, в число которых должны входить критерии, обеспечивающие идентичность объекта и модели по виду напряжённого состояния, граничным условиям и закономерностям упрочнения-разупрочнения). Отмеченное позволяет отказаться от выполнения напрямую тех условий подобия, реализация которых принципиально невозможна (например, тепловое подобие) или практически сложна (условия геометрического подобия на простых образцах; воспроизведение закона изменения скорости деформации для штамповки на КШП, ГKM и т.п.).

С учётом изложенного для статических процессов выдавливания в работе показано: для натурального объекта и модели, изготовленных из одинакового материала, выполнение скоростного критерия $v_d \eta / H_{пл} G_s$ и подобия по $H_{пл}$ одновременно приводит к равенству $\Delta H/H_{пл}$, $v_d t / H_{пл}$, $t G_s / \eta$ для закреплённых моментов t_K . Реализация подобия дополнительно по V_G и граничным условиям при равенстве мгновенных среднemasовых температур объекта и модели приводит к численному равенству десяти из двенадцати критериев подобия. Это обеспечивает $\hat{P}(A_j) = 0,85$. При моделировании скоростных* процессов выдавливания дополнительно исключается прямое выполнение условий подобия по скорости деформации $\dot{\epsilon}$. Это снижа-

*Выделение процессов в диапазоне $10^{-2} - 10^2$ с⁻¹ в группу скоростных является условным и обосновано характерным протеканием процессов упрочнения-разупрочнения во времени

ет достоверность моделирования до $\hat{P}(A_j)=0,67$. Вместе с тем отказ от выполнения подобия по $\dot{\epsilon}$ сохраняет возможность косвенного учёта её вклада при оценке $\bar{p}/\bar{\sigma}_s$. Это осуществляется за счёт сохранения критериев $\Delta H/H_{пл}$ и $\dot{v}_d t/H_{пл}$, включающих $\dot{\epsilon}$, а также критериев, оценивающих отклик на температурно-скоростное воздействие ($\dot{v}_d t/H_{пл} \bar{\sigma}_s, T_n/T_3$). Показано, что для реализации моделирования $\bar{p}/\bar{\sigma}_s$ для скоростных процессов выдавливания сопоставление критериев из уравнения (6) необходимо осуществлять в соответственные моменты деформации t_n для натурального объекта и t_m для модели (рис.16). Для нахождения t_n и t_m использован критерий $\dot{v}_d t/H_{пл}$. Сообразно отказ от прямого выполнения скоростных критериев позволяет решить задачу моделирования на базе статических испытаний. На этой основе разработана соответствующая методика приближённого моделирования за счёт реализации сравнительно простых схем испытаний. Совокупность оценок представляется в виде многофакторных зависимостей для любой стадии процесса с наперёд заданной и вполне приемлемой для инженерных целей точностью (погрешность не более 15%). Метод позволяет оценить применимость экспериментальных данных, полученных в других работах, для оценки силовых параметров при выдавливании.

В третьей главе выполнено описание уравнений, входящих в (4). Задача для полостей произвольной геометрии решена в три этапа: для базовой цилиндрической полости, цилиндрических полостей произвольного масштаба, рельефных полостей, каждый из которых решается, в известной мере, независимо, но при выполнении требований сочетания и универсальности полученных результатов.

В качестве базового объекта принята заготовка $D \times H=20 \times 30$ мм, в которой формируется полость диаметром 10 мм. Обоснование возможных модельных аналогов базовой полости выполнено на основе анализа механической схемы деформации для пластически деформированного объёма (ПДО). Деформированное состояние изучено методом делительной сетки для обратного выдавливания для интервала $0,25 \leq d_n/D \leq 0,75$. За количественную меру ПДО принята величина контактной поверхности $S_{кп}$ деформируемой заготовки с рабочими элементами в пределах ПДО. Для оценки $S_{кп}$ уточнены характерные стадии процесса по граничным условиям. Показано: напряжённое состояние в различных объёмах заготовки изменяется от плоского разноимённого до всестороннего сжатия ($-I < \sqrt{\epsilon} \leq +I$), деформированное — от простого растяжения до сжатия ($-I \leq \sqrt{\epsilon} \leq +I$). Выбор воз-

возможных модельных схем испытаний, как известных (схемы I-3, рис.2), так и новых, осуществлён по целочисленному совпадению V_0 и V_ε (при невозможности – по интервальному совпадению). Для этого разработан способ испытаний на осадку (а.с. № 892268), позволяющий варьировать V_0 и граничные условия (схемы 4-7).

Для обоснования из числа возможных аналогов действительных модельных схем испытаний необходима информация о значениях критериев из (6) на выделенных микростадиях. Она заимствована из известных работ, а недостающая – получена экспериментально. Собственно выбор действительных модельных схем выполнен по их достоверности (рис.2; в скобках указаны значения оценок $\bar{P}(A_i)$).

Экспериментальное исследование $\bar{p}$ при ПТВ базовой полости выполнено по методике планирования эксперимента типа 2^3 (реализовано на испытательной машине УМЗ-ЮТМ с записью диаграмм "усилие – перемещение"). Контроль и запись температуры образцов при деформировании производили термopарами ХА на потенциометр КСП-4 с погрешностью $\pm 5^\circ\text{C}$; нагрев образцов – совместно с оснасткой в рабочей зоне испытательной машины. Для исследованных в работе схем ПТВ и сталей (40ХГЗ, 12ХНЗА, 4ХВ2С, 5ХНМ, 4Х5МФС, 3Х2В8Ф, 8Х4В2С2М2, Х12М) получены регрессионные зависимости для определения $\bar{p}$. Например, для закрытого выдавливания они имеют вид:

$$\bar{p} = 2270 - 2,4T + 53,3v_d + 140\Delta H + 2,75v_d\Delta H - 0,185T\Delta H, \quad (12\text{ХНЗА}) \quad (7)$$

$$\bar{p} = 2800 - 2,9T + 247v_d + 9,2\Delta H - 0,26Tv_d \quad \text{и т.д.} \quad (4\text{Х5МФС})$$

В (7) $\bar{p}$, T , v_d , ΔH имеют размерность $[\text{МПа}]$, $[^\circ\text{C}]$, $[\text{мм/с}]$, $[\text{мм}]$.

Зависимость $C(\bar{p})$ для мастер-пуансонов в модели оптимизации установлена экспериментально при выдавливании базовых полостей в заготовках из исследованных в работе сталей в виде

$$C = 55 - 0,025\bar{p}, \quad \text{где } [\bar{p}] = \text{МПа}. \quad (8)$$

Расчёты по (8) совместно с (7) позволили получить искомые зависимости $C(T, v_d, \Delta H)$ при ПТВ базовой полости.

Допустимый температурно-скоростной интервал ПТВ определён из условия обеспечения предельно достижимой работоспособности выдавленных полостей. Для этой цели разработан метод прогнозной оценки стойкости инструмента по сопротивляемости циклическому вдавливанию алмазного конусного индентора в образцы, подвергнутые обработке согласно технологии изготовления инструмента.

Задача перехода к цилиндрическим полостям произвольного масштаба решена экспериментально с привлечением третьей теоремы подобия. Программа включала выдавливание геометрически подобных

полостей в температурно-скоростном диапазоне, характерном для ПТВ при изменении масштаба полостей от 2 до 10. Выдавливание производили в лабораторных (УМЗ-10ТМ) и промышленных (гидропресс ПО443) условиях. Установлено: при выполнении деформационного и скоростного подобия для $T_n/T_3 = idem$ влияние масштаба полости на величину $\bar{p}$ может быть учтено путём введения в исходные решения для базовой полости масштабного коэффициента $1/m = d_{10}/d_n$, а на C - условий $v_a^\delta = m v_a^m$ и $\Delta H_m = m \Delta H_\delta$.

Математическое описание модели ПТВ для осесимметричных полостей произвольной геометрии выполнено в работе с учётом схематизации процесса по параметру $S_{\kappa n}$ и экспериментально установленной зависимости $\bar{p}(S_{\kappa n})$. Сообразно с использованием метода делительной сетки установлен ЦДО для объектов прикладных исследований. Для установления зависимости $\bar{p}(S_{\kappa n})$ в лабораторных и промышленных условиях определяли полные и удельные усилия при выдавливании гаммы полостей в заготовках из Д1, АК-6, свинца и сталей 12ХН3А, 40Х13, 3Х2В8Ф, Х12М (в вариантах ХВ и ПТВ). Показано: при соответствии деформируемых объектов (рельефная и цилиндрическая полости) по схеме напряжённого состояния, ЦДО, а также выполнении скоростного и деформационного подобия из (6) для $T_n/T_3 = idem$ имеем

$$P_{\kappa} : P_p = S_{\kappa n_{\kappa}} : S_{\kappa n_p} ; \quad \bar{p}_{\kappa} : \bar{p}_p = (S_{\kappa n}/F_T)_{\kappa} : (S_{\kappa n}/F_T)_p, \quad (9)$$

где индексы "κ" и "p" относятся соответственно к цилиндрической и рельефной полостям; F_T - площадь полости в плане. Погрешность оценок, согласно (9), не превышает 15-20%. Для инженерного решения задачи по количественной оценке стойкости мастер-пуансонов при ПТВ рельефных полостей использована зависимость (8).

В целях обобщения результаты моделирования представлены в виде соответствующих регрессионных зависимостей типа (7) для каждой модельной схемы испытаний. Показано: полученная информация может быть использована для определения $\bar{p}$ при объёмной штамповке, а также в качестве банка экспериментальных данных соответствующего пакета прикладных программ.

В четвёртой главе разработана расчётная методика обоснованного назначения параметров ПТВ, а также изложены данные по апробации и внедрению основных результатов работы.

Согласно расчётной методики модель параметрической оптимизации ПТВ (1)-(3) для осесимметричных полостей произвольной геометрии решена в следующей последовательности:

- для обоснования численного значения C_3^{opt} выполняется анализ соответствующей расчётной модели оптимизации для конкретного случая из условия выхода на предельно возможную стойкость мастер-пуансонов с учётом технологических возможностей по регулированию основных параметров выдавливания ($T, v_d, \Delta H$);
- для цилиндрической полости, эквивалентной по ПДО заданной рельефной полости из (4) при C_3^{opt} определяются T и v_d^4 ;
- полученные значения T и v_d^4 корректируются решением системы (4) с привлечением условия (9), конкретизирующего особенности рельефной полости. Если полученное значение по стойкости мастер-пуансонов ниже C_3^{opt} , то следует задать (исходя из технико-экономических соображений) величину T (или v_d), а значение v_d (или T) получить повторным решением (4) при заданных T и C_3^{opt} .

Численное решение моделей типа (4) для различных способов выдавливания и сталей получено на ЭВМ ЕС-1022. Для обобщения и инженерного приложения построены базовые номограммы для назначения оптимальных параметров T и v_d при ПТВ цилиндрических полостей (например, на рис.3 для $C_3^{opt}=30$).

Для апробации полученных решений по оптимальным параметрам ПТВ осуществлено опытно-промышленное выдавливание на модернизированном гидропрессе ПО443 цилиндрических полостей $d_n=20-60$ мм в заготовках из сталей 12ХН3А, 40Х13, Х12М с использованием специализированной контрольно-измерительной оснастки. Определяли $P(h_n/d_n)$, стойкость мастер-пуансонов, а также качество выдавленных полостей. По результатам испытаний установлено: расхождение между расчётными (по методике моделирования) и экспериментальными данными по P не превышает 10-13%, а по C - не более 20%. Таким образом, результаты опытно-промышленных испытаний подтвердили корректность функциональных зависимостей расчётных моделей параметрической оптимизации ПТВ, полученных на основе разработанного метода приближённого моделирования.

Основные результаты, полученные в работе, использованы при разработке процессов ПТВ формообразующих деталей штампов (ФДШ) и пресс-форм в заготовках из легированных сталей. Инструмент предназначен для объёмной штамповки и литья под давлением деталей электротехнической промышленности (ступенчатые цилиндрические, рельефные и т.п. конфигурации) и внедрены с положительным эффектом на предприятиях ВПО "Союзхимпласт". Стойкость мастер-пуансонов повышена в 2-3 раза. Дополнительно разработана

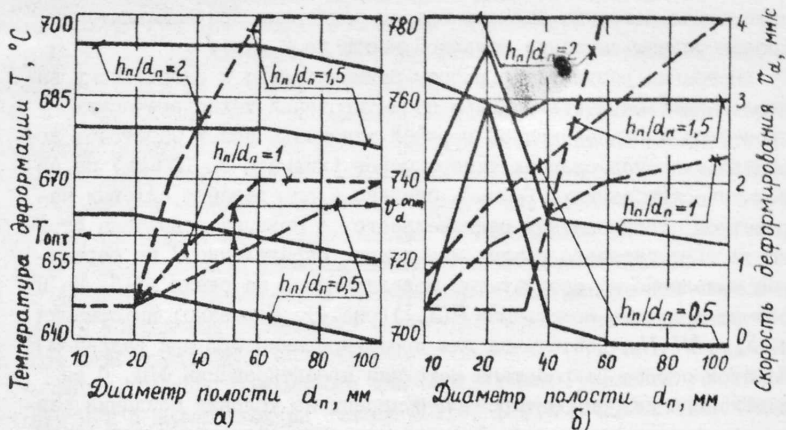


Рис.3. Пример номограмм для определения оптимальных параметров по температуре (сплошные кривые) и скорости деформирования (пунктирные) при выдавливании полостей в заготовках из сталей 4X5M2C (а) и 3X2B82 (б)

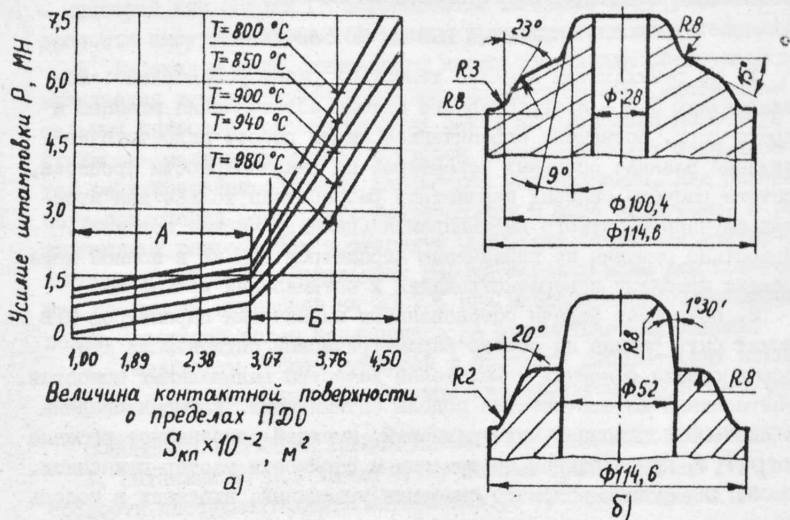


Рис.4. Обобщённая номограмма для определения силовых параметров при горячей штамповке полых заготовок (а) и пуансоны для штамповки заготовок колец подшипников, разработанные на её основе

инженерная методика расчёта матриц поддержки при выдавливании (обеспечивает снижение металлоёмкости до 2 раз).

Апробация результатов работы применительно к скоростному выдавливанию* осуществлена при проектировании технологических процессов многопереходной горячей штамповки полых заготовок колец подшипников средних типоразмеров (диаметр 80–120 мм) на автоматических линиях. Решение сведено к определению силовых параметров, установлению рационального, с позиций повышения стойкости ФДШ, силового режима штамповки. Определение P по переходам выполнено по результатам моделирования на стали ШХ15. На их основе получена номограмма $P(S_{\kappa\eta})$ (рис. 4). Показано: информация по $S_{\kappa\eta}$, ΔH , $H_{\text{нв}}$ достаточна для проектирования ФДШ при заданном P . На этой основе разработана методика проектирования ФДШ. С её использованием спроектированы пуансоны из условия создания равнонагруженных переходов. Результаты производственных испытаний (усилия P определяли методом отпечатков на закладных деталях; T_j по переходам – калориметрированием) подтвердили корректность расчётов по P , а также методики проектирования ФДШ. Бन्दрение новой конструкции пуансонов (рис. 4) на автолинии Л309 (ПЗ-23) обеспечило повышение их стойкости на 30–50%.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. По результатам анализа известных работ установлено: исследованию ПТВ – прогрессивного метода изготовления штампов и пресс-форм, посвящено ограниченное число работ. Недостаточно изучено влияние основных параметров на закономерности процесса, методы расчёта силовых параметров разработаны только для простых случаев обратного выдавливания (цилиндрические полости). Известные решения по назначению параметров ПТВ не в полной мере решают проблему совершенствования и оптимизации процесса.

2. Показано: задача обоснованного назначения параметров ПТВ может быть решена на основе параметрической оптимизации при нормировании основных показателей качества выдавленных полостей. Разработана математическая модель оптимизации, которая сведена к системе полиномиальных уравнений, имеющей однозначное решение по $\bar{p}$, T , v_d при заданной деформации и стойкости мастер-пуансонов.

3. Для функционального описания уравнений, входящих в модель

*ПТВ инструментальных полостей на КИШП и оборудовании подобного типа не находит широкого практического применения из-за ряда технологических особенностей штамповки на этом классе машин

оптимизации, разработан метод приближённого моделирования (в том числе для скоростных процессов на базе статических испытаний) с наперёд заданной точностью определения силовых параметров, являющихся целевой функцией модели.

4. На основе анализа механической схемы деформации при обратном выдавливании разработан способ испытаний на осадку, позволяющий в широких пределах варьировать схему напряжённого состояния и условия контактного трения (а. с. № 892268).

5. На основе экспериментальных исследований по моделированию и исследования деформированного состояния получены:

- расчётные зависимости и экспериментальные данные для определения контактных напряжений (заготовка - матрица поддержки) для осесимметричных полостей;
- регрессионные зависимости для определения удельных усилий при ПТВ в заготовках из сталей 40Х13, 12ХН3А, 4ХВ2С, 8Х4В2С2М, 5ХНМ, 4Х5М2С, 3Х2В8Ф, Х12М. Банк экспериментальных данных для расчёта $\bar{p}$ штамповки заготовок с полостью произвольной формы;
- оценочный параметр, количественно учитывающий влияние контактного трения на силовые показатели обратного выдавливания осесимметричных полостей произвольной геометрии ($0,25 \leq d_p/D \leq 0,75$);
- критерий для оценки (с погрешностью не более 20%) работоспособности инструментальных объектов в эксплуатационных условиях.

6. Решения модели оптимизации использованы для обоснованного назначения температурно-скоростных параметров ПТВ инструментальных полостей, обеспечивающих выход на предельно возможную стойкость мастер-пуансонов с учётом технологических возможностей регулирования основных параметров выдавливания. Для инженерного приложения результаты представлены в виде номограмм. В реализованных разработках достигнуто повышение стойкости мастер-пуансонов в 2-3 раза. Результаты работы использованы для повышения стойкости пуансонов на 30-50% при многопереходной штамповке полых заготовок колец подшипников на автоматических линиях.

7. Результаты работы внедрены в практику лабораторных исследований и производство с экономическим эффектом 273,6 тыс. руб.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНО В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

1. Натанзон М. Я., Хамин О. Н. Оценка сравнительной работоспособности инструментальных материалов... // Контактные и прикладные задачи теплопроводности... / Куйбышевск. политех. ин-т. - Куйбышев, 1979. - С. 115-120.

2. Векслин И. И., Хамин О. Н., Шостак Б. Ю. Методика экспериментального определения контактных давлений на матрицу поддержки при выдавливании // Теория расчёта и конструирования деформирующего и формообразующего инструмента: Межвуз. сб. научн. тр. / Куйбышевск. политех. ин-т. - Куйбышев, 1979. - С. 26-29.

3. А. с. 892268 СССР, МКП³ & ОI N 3/08. Способ испытаний материалов на осадку / Ю. А. Глухов, Б. Ф. Трахтенберг, О. Н. Хамин (СССР). - Опубл. 12.12.81, Бюл. № 47.

4. Глухов Ю. А., Хамин О. Н., Трахтенберг Б. Ф. Статистическая интерпретация метода аналогии для процессов ОМД // Теория расчёта и конструирования деформирующего инструмента / Куйбышевск. политех. ин-т. - Куйбышев, 1981. - С. 17-20.

5. Векслин И. И., Хамин О. Н. Напряжённое состояние толсто-стенных цилиндров при произвольном нагружении осесимметричной полости / Куйбышевск. политех. ин-т. - Куйбышев, 1980. - С. 25-30. - Деп. в ВНИТИ 03.03.82, № 895-82Деп.

6. Глухов Ю. А., Хамин О. Н. Вероятностный подход к моделированию процессов ОМД // Труды 5-й научн.-техн. конф. ФМЗ / Куйбышевск. политех. ин-т. - Куйбышев, 1980. - С. 17-24. - Деп. в ВНИТИ 03.03.82, № 895-82Деп.

7. Хамин О. Н., Глухов Ю. А., Трахтенберг Б. Ф. Выбор основных параметров полугорячего выдавливания штампового инструмента методом приближённого моделирования // Кузнечно-штамповочное производство. - 1982. - № 4. - С. 23-25.

8. Яковлев В. М., Хамин О. Н., Трахтенберг Б. Ф. К оценке влияния органических СОЖ на работоспособность закалённой стали ШХ15 // Вестник машиностроения. - 1982. - № 5. - С. 59-60.

9. Хамин О. Н., Векслин И. И., Трахтенберг Б. Ф. Экспериментальное исследование контактных давлений при выдавливании осесимметричных полостей // Кузнечно-штамповочное производство. - 1984. - № 2. - С. 14-16.

10. Хамин О. Н., Глухов Ю. А., Трахтенберг Б. Ф. Оптимизация процесса полугорячего выдавливания инструментальных полостей / Куйбышевск. план. ин-т. - Куйбышев, 1984. - 24 с.: ил. - Библиогр.: 7 назв. - Деп. в ВНИИТЭМР 01.12.84, № 240МШ-84Деп.

11. Хамин О. Н., Трахтенберг Б. Ф. Расчётно-экспериментальная оценка силовых параметров штамповки выдавливанием... / Куйбышевск. план. ин-т. - Куйбышев, 1984. - 17 с.: ил. - Библиогр.: 5 назв. - Деп. в ВНИИТЭМР 01.12.84, № 24/МШ-84Деп.

Хамин

