

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИ ПРЯМОМ ВЫДАВЛИВАНИИ ПОРОШКОВЫХ ПОРИСТЫХ ЗАГОТОВОК

Ryabicheva L., Usatyuk D., Beloshitskij N.
Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, Lugansk, Ukraine (ryabic@gmail.com)

THE STRESS-STRAIN STATE DURING DIRECT EXTRUSION OF POROUS POWDER BILLETS

Представлены результаты моделирования прямого выдавливания порошковых пористых заготовок на основе закономерностей теории пластичности. Получены распределения параметров напряженно-деформированного состояния и плотности при прямом выдавливании полых детали из медной порошковой пористой заготовки. Определена оптимальная величина противодействия, обеспечивающая равномерное напряженно-деформированное состояние при заданной плотности детали. Рекомендованы аналитические зависимости величины противодействия от относительной глубины полости, а также давления выдавливания от противодействия. Разработана технология изготовления полых детали.

Ключевые слова: выдавливание, порошковая пористая заготовка, теория пластичности, противодействие, напряжение, деформация.

Введение

В технологиях изготовления деталей тел вращения с отверстиями и глухими полостями из порошковых материалов методами обработки давлением широко используются различные виды выдавливания. Полые детали с дном обычно получают обратным выдавливанием, которое характеризуется высокими давлениями и сложными условиями работы пуансона [1]. Однако изготовление полых деталей прямым выдавливанием обеспечивает уменьшение давления на пуансон за счет уменьшения реактивных сил трения [2]. При выдавливании полых деталей из пористых заготовок, когда деформированию предшествует стадия уплотнения, целесообразным является применение прямого выдавливания. При этом существуют ограничения на минимальную толщину стенки и на максимальную глубину выдавливаемой полости.

Цель

Целью работы является компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС), распределения плотности порошковой пористой заготовки, выбор наиболее рациональной величины противодействия при прямом выдавливании и разработка технологии изготовления полых детали.

Математическая модель

Математическое моделирование прямого выдавливания выполнено на основе закономерностей теории пластичности пористых тел. Пластический потенциал рассматривается, как функция компонентов тензора напряжений и представляется в виде [3]:

$$F = \frac{\tau^2}{\varphi} + (1+m)^2 \frac{\left(p + \frac{m}{m+1} \Theta \sigma_s \sqrt{\psi}\right)^2}{\psi} - \Theta \sigma_s, \quad (1)$$

где $p = \frac{1}{3} \sigma_{ij} \delta_{ij}$ – среднее давление;

$\tau = \sqrt{(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})(\sigma_{ij} - p \delta_{ij})}$ – интенсивность касательных напряжений;

$\varphi = (1 - \theta)^2$, $\psi = \frac{2(1-\theta)^2}{3\theta}$ – функции пористости θ ;

$\Theta = 1 - \theta$ – относительная плотность;

m – параметр, характеризующий степень несовершенства контактов в порошковой заготовке и определяющий разное сопротивление пористой заготовки при ее испытании на растяжение и сжатие.

Скорость изменения объема в результате пластической деформации:

$$e \sim \frac{2(1+m)^2}{\Psi} p + \frac{2m(1+m)\sigma_0}{\sqrt{\Psi}}, \quad (2)$$

где σ_0 – напряжение течения твердой фазы, которое может быть представлено в виде зависимости $\sigma = \sigma_0 + K\omega^{0.5}$, где K – коэффициент упрочнения.

Скорость накопления деформации в твердой фазе пористого тела определялась на основе постулата В.В. Скорехода [4] об однозначности диссипативной функции:

$$\omega = \sqrt{1-\Theta} \left(\frac{m}{1+m} \sqrt{\Psi} e + \frac{\sqrt{(1+m)^2 \gamma^2 + e^2 \Psi}}{1+m} \right), \quad (3)$$

где γ – скорость изменения формы.

Величина накопленной деформации ω определяется путем решения дифференциального уравнения:

$$\frac{d\omega}{dt} = W, \quad (4)$$

где W – эквивалентная скорость деформации:

$$W = \frac{1}{\sqrt{1-\Theta}} \sqrt{\Psi e^2 + \Phi \gamma^2}. \quad (5)$$

Для определения распределения интенсивности напряжений и деформаций, а также относительной плотности использовано требование экстремальности функционала [5]:

$$J(v_i(x)) = \int_{\Omega} D(e_{ij}(V_i)) d\Omega + \int_{\partial\Omega_p} p_i v_i d(\partial\Omega), \quad (6)$$

где $D(e_{ij}(V_i))$ – диссипативная функция;

p_i – вектор напряжений на поверхности исследуемой заготовки;

v_i – вектор скорости на поверхности исследуемой заготовки.

Первый интеграл в формуле (6) представляет собой полную скорость диссипации энергии, второй интеграл – мощность внешних напряжений.

Для пористой заготовки диссипативная функция $D(e_{ij}(V_i))$ имеет вид:

$$D(e_{ij}(V_i)) = \frac{\sqrt{\gamma^2 \Phi + e^2 \Psi}}{\sqrt{1-\Theta}} \tau_s + \frac{p_0 e}{\sqrt{1-\Theta}}, \quad (7)$$

где $V_i = v(x)$, $e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$, $p_0 = -\sqrt{\frac{2}{3}} \tau_s \sqrt{\Psi} \frac{m}{1+m}$,

τ_s – предел текучести твердой фазы на сдвиг.

Для оценки неравномерности НДС в объеме заготовки использованы выражения:

$$\sigma_{inh} = \frac{\sum_{j=1}^N \sqrt{(\sigma_i^{ave} - \sigma_i^j)^2}}{\sigma_i^{ave} N}, \quad \epsilon_{inh} = \frac{\sum_{j=1}^N \sqrt{(e_i^{ave} - e_i^j)^2}}{e_i^{ave} N}, \quad (8)$$

где σ_i^{ave} – среднее арифметическое интенсивностей напряжений в объеме заготовки;

ϵ_i^{ave} – среднее арифметическое интенсивностей деформаций в объеме заготовки;

σ_i^j – интенсивность напряжений в j -м конечном элементе;

ϵ_i^j – интенсивность деформаций в j -м конечном элементе.

В расчетах на основании экспериментальных данных приняты зависимости противодавления p_{np} от давления выдавливания p и от соотношения размеров детали h/b (где h – глубина полости в детали, b – толщина стенки) в виде экспоненциальных функций:

$$p_{np}(p) = A \exp(K_1 p), \quad p_{np}\left(\frac{h}{b}\right) = A \exp\left(K_2 \frac{h}{b}\right), \quad (9)$$

где $K_1 = (0,01 - 0,1)\eta$ – коэффициент жесткости напряженного состояния;

$$\eta = \frac{\sqrt[3]{\sigma_1 \sigma_2 \sigma_3}}{\sigma_i} \text{ – показатель жесткости напряженного состояния;}$$

$$K_2 = \frac{\epsilon_i^{\max}}{\epsilon_i^{\min}} \text{ – коэффициент неравномерности деформации.}$$

Моделирование прямого выдавливания

Решение задачи рассмотрено на примере прямого выдавливания полой детали из медной порошковой заготовки методом конечных элементов, расчетная схема представлена на рис. 1. Исходная плотность заготовки $\rho = 7,6 \text{ г/см}^3$, пористость 15%, диаметр $D = 28 \text{ мм}$, высота $H = 26 \text{ мм}$, диаметр полости детали $d = 14 \text{ мм}$, ее высота $h = 14,8 \text{ мм}$, толщина стенки $b = 7 \text{ мм}$, коэффициент трения $\mu = 0,25$. Напряженно-деформированное состояние анализировали в осевом сечении донной части, угловом сечении и по ширине стенки детали.

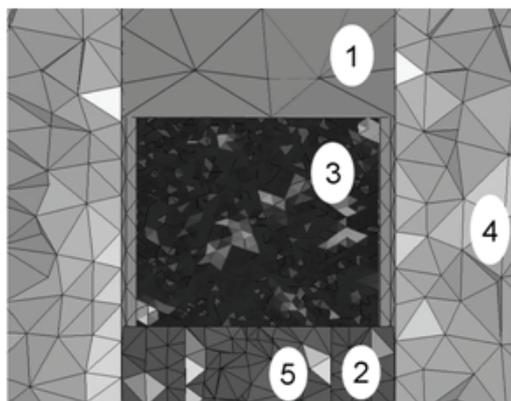


Рис. 1. Конечно-элементная модель прямого выдавливания: 1 – пуансон верхний; 2 – противоदाвление; 3 – порошковая пористая заготовка; 4 – матрица с бандажом; 5 – контрпуансон

На первом этапе деформирования происходит осадка, радиальное течение металла и заполнение полости матрицы. При этом плотность быстро растет. На втором этапе осуществляется процесс выдавливания полости. Моделирование НДС выполнено при противодавлении 95 МПа, 120 МПа и 140 МПа. Наибольшая неравномерность напряженного состояния при величине противодавления 95 МПа наблюдается в угловом сечении и по ширине стенки и достигает 0,11-0,18. Происходит интенсивное течение металла по границам полости, возрастает концентрация напряжений, что способствует формированию брака в виде утяжины у нижнего торца заготовки. На рис. 2 показано

распределение интенсивности напряжений и деформаций в трех сечениях заготовки при противодавлении 120 МПа. Наибольшая величина интенсивности напряжений и деформаций достигнута в донной части, что соответствует экспериментальным исследованиям (рис. 3). В угловом сечении и по ширине стенки напряжения уменьшаются к центральной оси заготовки. Увеличение противодавления до 120 МПа обеспечило понижение неравномерности деформаций и получение качественного изделия. Коэффициент неравномерности деформации уменьшается с 0,59 при 95 МПа до 0,43 при 120 МПа.

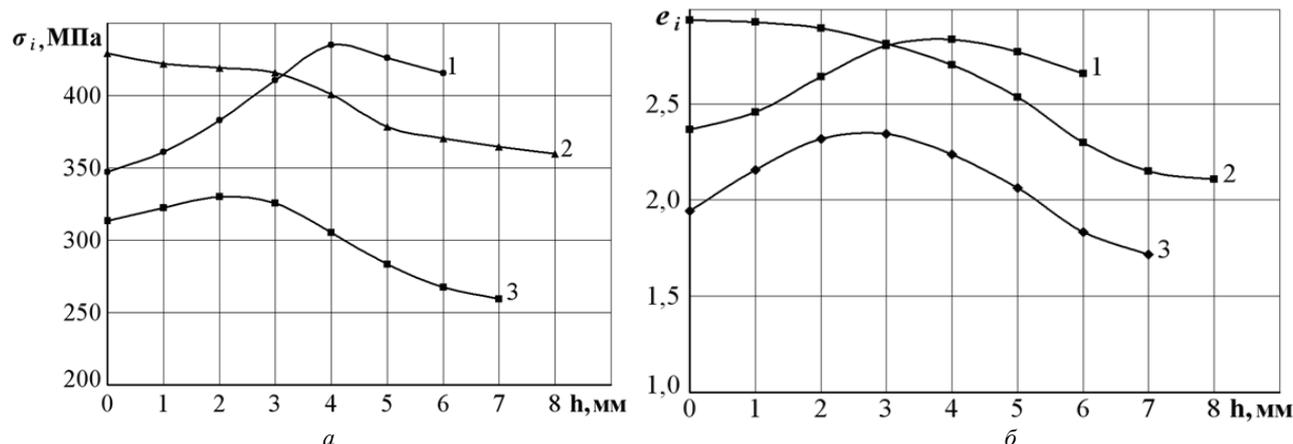


Рис. 2. Интенсивность напряжений – а, интенсивность деформации – б при противодавлении 120 МПа: 1 - осевое сечение донной части, 2 - угловое сечение, 3 - сечение по ширине стенки заготовки

Результаты экспериментальных исследований деформированного состояния подтверждают данные математического моделирования (рис. 3). Эксперименты показали, что при противодавлении 120 МПа интенсивность деформации в очаге под пуансоном несколько снизилась, а на торцах и в кольцевой части заготовки увеличилась. При противодавлении 140 МПа получена качественная заготовка высокой плотности. Однако увеличение противодавления приводит к росту давления выдавливания. При выдавливании с противодавлением 95 МПа и глубине полости 14,7 мм, давление составило 820 МПа, а с противодавлением 120 МПа его величина равнялась 950 МПа.

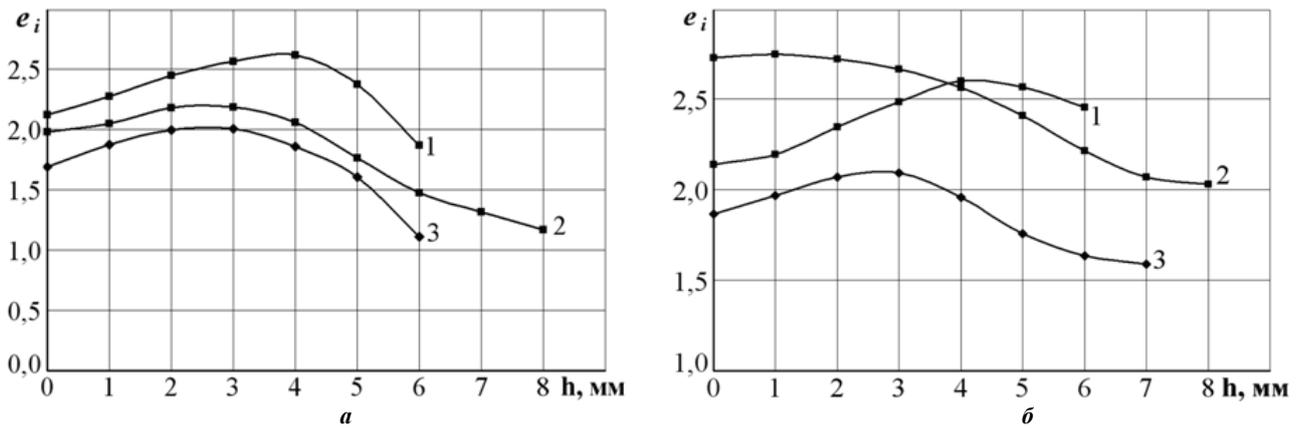


Рис. 3. Интенсивность деформации при противодавлении 95 МПа – а, при противодавлении 120 МПа – б: 1 - осевое сечение донной части, 2 - угловое сечение, 3 - сечение по ширине стенки заготовки

Увеличение равномерности деформации с ростом противодавления обеспечивает устранение дефекта в виде утяжины и повышение равноплотности заготовки.

На рис. 4 показано изменение относительной плотности при различном противодавлении, приведена общая относительная плотность заготовки, а также плотность ее донной и кольцевой частей.

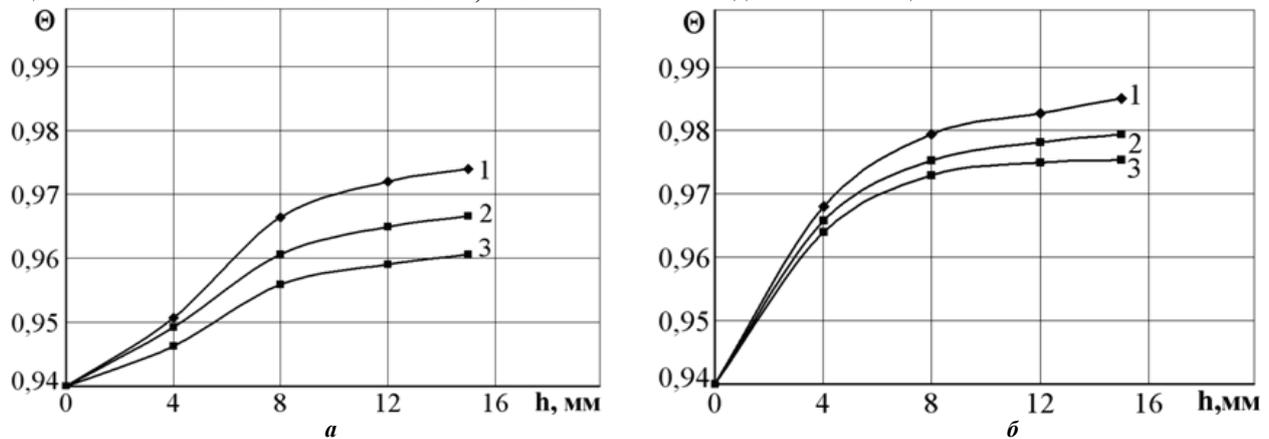


Рис. 4. Изменение относительной плотности в зависимости от глубины полости заготовки при различном противодавлении: а – 95 МПа; б – 120 МПа: 1 – общая относительная плотность заготовки; 2 – донной части; 3 – кольцевой части

Результаты расчета зависимостей противодавления от относительной глубины полости, а также от давления выдавливания (рис. 5) рекомендуются для использования при выборе противодавления.

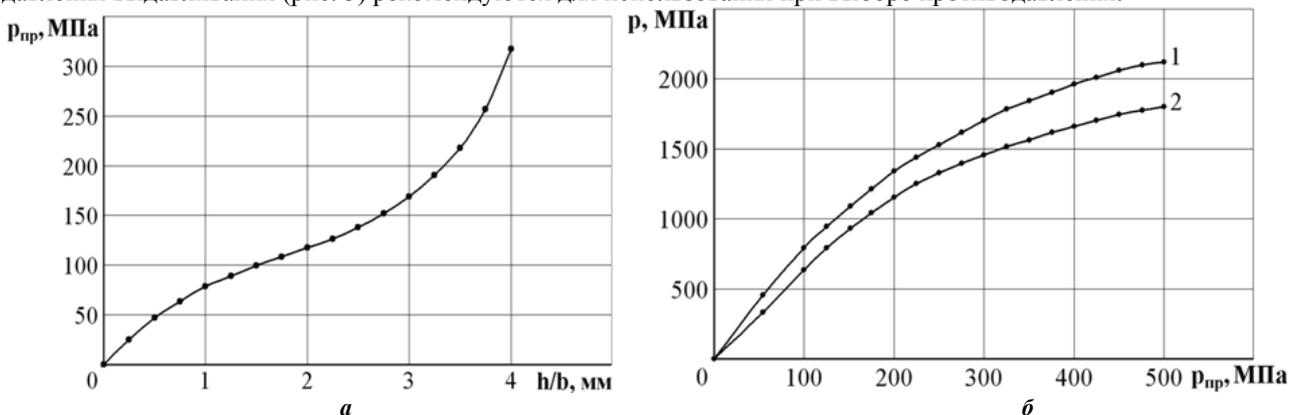


Рис. 5. Зависимость противодавления от относительной глубины полости в детали – а, от давления выдавливания – б: 1 – теоретическая; 2 – экспериментальная

Дальнейшее увеличение противодавления до 140 МПа способствует уменьшению разноплотности, однако интенсивность напряжений на пуансонах приближается к условному пределу текучести штамповой стали после термической обработки, что приводит к быстрому их износу.

Результаты исследований использованы при разработке технологии изготовления детали «заглушка» (рис. 6, а) [5]. По условиям работы деталь "заглушка" должна иметь высокую пластичность, а ее пористость не должна превышать 2%.

Технологический процесс изготовления детали состоит из следующих операций: подготовка шихты; прессование заготовки диаметром 25 мм и высотой 29 мм пористостью 20%; спекание 1 ч при температуре 920°C; штамповка выдавливанием на гидравлическом прессе силой 1600 кН.

Штамповка осуществляется следующим образом (рис. 6, б). В начальный момент верхняя плита 1 и матрица 2 удерживаются в крайнем верхнем положении пружинами 4 и 12. Заготовку цилиндрической формы 8 диаметром меньше диаметра матрицы на величину, обеспечивающую степень радиальной деформации 25-55%, загружают в полость матрицы 2. Положение матрицы регулируют так, чтобы заготовка помещалась на 2-3 мм ниже ее верхнего торца. При ходе ползуна пресса вниз плита 1 давит на матрицу 2, принудительно перемещает ее и сжимает пружины 4. При этом пуансон 5 не перемещается за счет упора в скобу 6. При перемещении матрицы 2 в процессе осадки происходит свободное радиальное деформирование заготовки за счет разности диаметров матрицы и заготовки, ее уплотнение, обеспечивается равномерность и снижается давление штамповки на этом этапе.

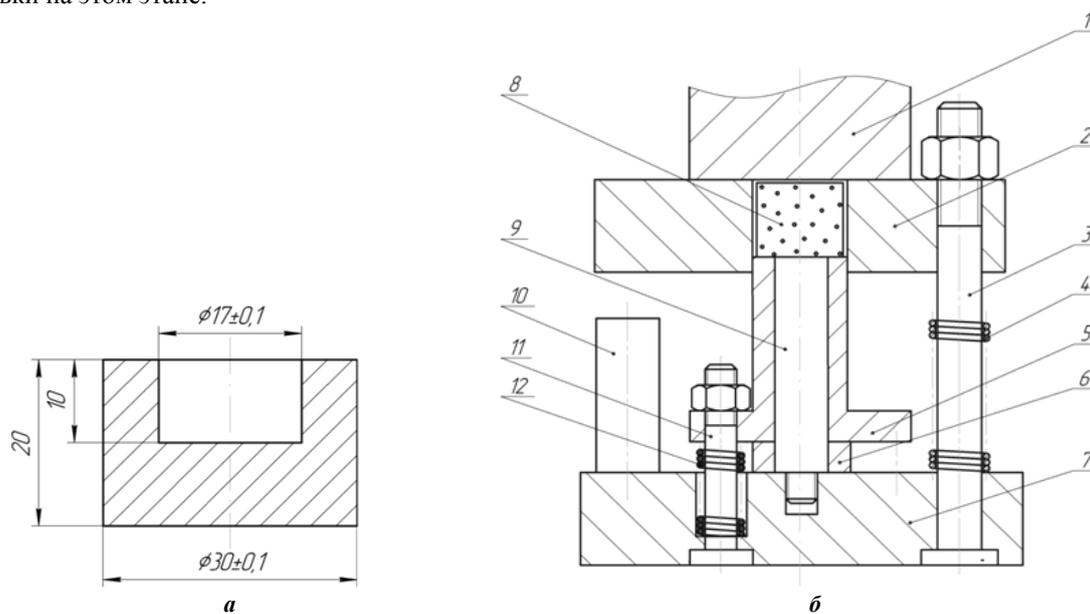


Рис. 6. Чертеж детали «заглушка» – а и схема штампа – б

Уплотнение происходит до относительной плотности 0,9. На втором этапе удаляют скобу 6 и продолжают процесс штамповки. Заготовка под действием плиты 1 давит на пуансон 5, который сжимает пружину 12 и перемещается одновременно с матрицей 2, происходит процесс выдавливания стенки детали. Высокая плотность, достигнутая на первом этапе, наличие противодействия, перемещение матрицы в направлении движения формующего пуансона способствует процессу дальнейшего уплотнения пористой заготовки и формообразованию детали. Процесс продолжается до тех пор, пока матрица 2 не доходит до регулируемого ограничителя 10, пуансон 5 до плиты 7. Выталкивание детали из штампа осуществляется стягиванием матрицы, с пуансона деталь снимается за счет силы пружин 4 и 12. Деформирование заготовки происходит в условиях всестороннего неравномерного сжатия, что обеспечивает изготовление детали без дефектов с плотностью, близкой к теоретической (рис. 7).



Рис. 7. Фото детали «заглушка», полученной из пористой медной заготовки

Получены детали с относительной плотностью 0,98, соответствующие техническим требованиям чертежа.

Выводы

Выполнена оценка неравномерности напряженно-деформированного состояния при прямом выдавливании детали с глубокой полостью из порошковой пористой заготовки. При малой величине противодействия в детали наблюдается неравномерность НДС и выраженная разноплотность материала, в результате чего образуются дефекты в виде утяжины. При величине противодействия 120 МПа из заготовки пористостью 15% получена высококачественная деталь с необходимой

плотностью. Рекомендованы зависимости величины противодавления от относительной глубины полости, а также давления выдавливания от противодавления. Разработана технологии изготовления детали «заглушка» из медного порошка.

Анотація. Представлені результати моделювання прямого видавлювання порошкових пористих заготовок на основі закономірностей теорії пластичності. Отримані розподіли параметрів напружено-деформованого стану та густини при видавлюванні порожнистої деталі з мідної порошкової пористої заготовки. Визначена оптимальна величина протитиску, що забезпечує рівномірний напружено-деформований стан при заданій густині деталі. Рекомендовані аналітичні залежності величини протитиску від відносної глибини порожнини та тиску видавлювання від протитиску. Розроблено технологію виготовлення порожнистої деталі.

Ключові слова: видавлювання, порошкова пориста заготовка, теорія пластичності, протитиск, напруження, деформація.

Abstract. Purpose. Computer modelling of stress-strain state, distribution of density in porous powder billet, selection the most appropriate backpressure value for direct extrusion and development of production technology for manufacturing of hollow detail.

Design/methodology/approach. The modelling results for direct extrusion of porous powder billets on the basis of plasticity theory are presented. Distributions of stress-strain state parameters and density during direct extrusion of hollow detail from copper porous powder billet were obtained. Enhancement of uniformity of deformation by increasing of backpressure ensures prevention of flow-through flaw and improvement of equidensity of billet. The modelling results are well concordant with the results of laboratory experiments.

Findings. The analytical dependences of backpressure from relative depth of cavity and extrusion pressure from backpressure were recommended. The optimal value of backpressure was found for ensuring the uniform stress-strain state and given density of detail.

Originality/value. The production technology for manufacturing of hollow detail by direct extrusion with backpressure has been developed.

Keywords: extrusion, porous powder billet, plasticity theory, backpressure, stress, deformation.

1. Головин В.А. Технология холодной штамповки выдавливанием / В.А. Головин, А.М. Митькин, А.Г. Резников. – М.: Машиностроение, 1970. – 152 с.
2. Роман О.В. Исследование процесса холодной штамповки выдавливанием спеченных пористых заготовок / О.В. Роман, Е.А. Дорошкевич, Е.В. Звонарев [и др.] // Порошковая металлургия. – 1980. – №11. – С. 28-34.
3. Штерн М.Б. Феноменологические теории прессования порошков / Штерн М.Б. [и др.] - К.: Наукова думка, 1982. – 140 с.
4. Скороход В.В. Реологические основы теории спекания / В.В. Скороход. – К.: Наукова думка, 1972. – 152 с.
5. Рябичева Л.А. Технологии изготовления порошковых деталей методами пластического деформирования / Л.А. Рябичева, А.Т. Цыркин – Луганск, Изд-во ВНУ им. В.Далы, 2009. – 176 с.

REFERENCES

1. Golovin V.A., Golovin V.A., Mit'kin A.M., Reznikov A.G., Tehnologija holodnoj shtampovki vydavlivaniem (The technology of cold extrusion). Moscow: Mashinostroenie, 1970. 152 p.
2. Roman O.V., Roman O.V., Doroshkevich E.A., Zvonarev E.V., Issledovanie processa holodnoj shtampovki vydavlivaniem spechennyh poristykh zagotovok (Investigation of the process of cold extrusion of sintered porous billets). Powder metallurgy, 1980, no 11, pp. 28-34.
3. Shtern M.B. Fenomenologicheskie teorii pressovaniya poroshkov (The phenomenological theory of compression of powders). Kiev: Naukova dumka, 1982. 140 p.
4. Skorohod V.V. Reologicheskie osnovy teorii spekanija (Rheological Fundamentals of the theory of sintering). Kiev: Naukova dumka, 1972. 152 p.
5. Ryabicheva L.A., Tsirkin A.T. Tehnologii izgotovlenija poroshkovykh detalej metodami plasticheskogo deformirovaniya (Technology of powder parts by plastic deformation). Lugansk, Izd-vo VNU im. V.Dalja, 2009. 176 p.