

5. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. 10-е изд. М.: Наука, 1964. 610 с.
6. Беляев, С.В. Расчет контактных напряжений при совмещенной прокатке-прессовании / С.В. Беляев // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технология. 2009. Т. 2. № 2. С. 167–176.
7. Довженко, Н.Н. Аналитическая и экспериментальная оценка давления при прокатке-прессовании / Н.Н. Довженко, С.Б. Сидельников, С.В. Беляев // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2004. №2. С. 27–29.

Bibliography

1. Belyaev S.V., Improving the efficiency of production of aluminium alloys on the basis of control of thermal conditions of compaction process / Belyaev S.V., Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., etc. Journal of Siberian Federal University. 2009. № 4. p. 418–426.
2. Dovzhenko N.N., Extrusion of aluminium alloys: Modelling and control of

- thermal processes / Dovzhenko N.N., Belyaev S.V., Sidelnikov S.B., etc. Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2009. 208 p.
3. Belyaev S.V., The decision of the optimal choices in fixed gage for the process of combine rolling and extrusion / Belyaev S.V., Dovzhenko I.N., Sidelnikov S.B., etc. // Journal of Siberian Federal University, 2010. № 4. p. 411–421.
4. Russian federation patent № 101390 RF. Device for the continuous rolling and extrusion of the profiles / Belyaev S.V., Sidelnikov S.B., Dovzhenko N.N., etc. Published 10.03.2011. Newsletter № 7.
5. Bronshtein I.N. Mathematics directory for the engineering and students of HTSI. M.: Sience, 1964. 610 p.
6. Belyaev S.V., The design procedure of contact stress of process of combine rolling and extrusion / Belyaev S.V. // Journal of Siberian Federal University. 2009. № 2. p. 167–176.
7. Dovzhenko N.N., Analytical and experimental estimate of the pressure by the rolling-and-pressing / Dovzhenko N.N., Sidelnikov S.B., Belyaev S.V. // Vestnik of MSTU named after G.I. Nosov, 2004. № 2. p. 27–29.

УДК 621.762.4.04:621.78.061

Белокопытов В.И.

ВЛИЯНИЕ СХЕМЫ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРИ ШТАМПОВКЕ ВЫДАВЛИВАНИЕМ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ГРАНУЛ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Рассмотрено напряженное состояние материала в процессе штамповки выдавливанием. Предложено техническое решение, позволяющее создать более благоприятную схему напряженного состояния с преобладанием сжимающих напряжений, препятствующих возникновению микротрещин в верхней части стенок штампуемых изделий.

Ключевые слова: напряженное состояние, выдавливание, штамповка, гранулы.

Tension of material in the process of impact extrusion is examined. Technical decision is recommended to create an effective tension scheme with dominant compression stress strain that prevents micro cracking in the upper part of stampings.

Key words: tension scheme, extrusion, stamping, granular.

Одной из основных проблем, связанных с использованием изделий из гранулированных материалов, является устойчивое формообразование штампованных поковок с высокими эксплуатационными свойствами. Отмечено [1], что для обеспечения максимальной прочности схватывания гранул при их совместной пластической деформации необходимо применять такие процессы обработки давлением, которые реализуют наиболее благоприятную схему напряженного состояния, близкую к всестороннему неравномерному сжатию. Для характеристики наличия в схеме сжимающих или растягивающих напряжений принято использовать показатель напряженного состояния K , равный отношению гидростатического напряжения σ к интенсивности касательных напряжений T [2]. При этом чем меньше (с учетом знака) величина показателя напряженного состояния, тем выше уровень сжимающих напряжений, воздействующих на компактируемый материал.

Получение заготовок для поршней форсированных двигателей внутреннего сгорания из гранул или порошков алюминиевых сплавов с использованием пресс-формы [3], схема которой представлена на рис. 1, в ряде случаев сопровождается появлением микротрещин в стенках изделий, что резко снижает их эксплуатационные характеристики. С целью определения момента возникновения этих несплошностей была предпринята попытка оценки доли сжимающих и растягивающих напряжений в общей схеме напряженного состояния процесса выдавливания. При рассмотрении деформированного состояния в данном процессе геометрический очаг деформации разбили

на пять характерных зон (см. рис. 1), в каждой из которых были найдены компоненты тензора скорости деформации [4]. Этот же принцип использовали и при определении напряженного состояния.

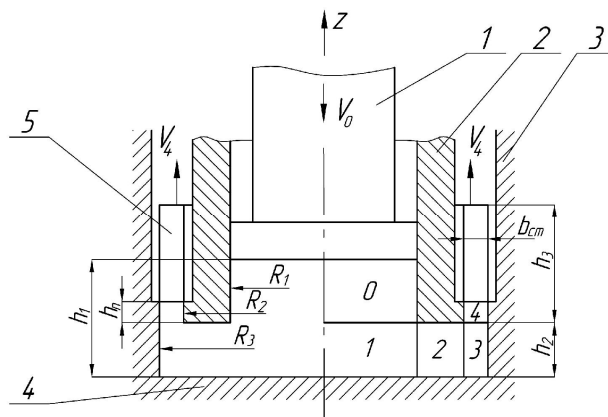


Рис. 1. Схема выдавливания полых изделий из гранулированных материалов: 1 – пуансон; 2 – дополнительная матрица; 3 – основная матрица; 4 – нижний пуансон; 5 – изделие

В основу расчета энергосиловых параметров процесса положен метод баланса мощностей [5]:

$$\begin{aligned}
 N &= N_g + N_c + N_T = \\
 &= \int_V T \cdot HdV + \int_S T \cdot |\Delta v_\tau| dS + \int_{S_s} \tau \cdot |v_\tau| dS_s, \quad (1)
 \end{aligned}$$

где N – мощность, подводимая к пуансону; N_g – мощ-

ность внутренних сил; N_c – мощность среза по границам зон; N_T – мощность трения; V – объем деформируемого металла; T – интенсивность касательных напряжений; H – интенсивность скоростей деформации сдвига; S – поверхность среза; Δv_τ – разность скоростей, касательных к границе раздела i и $i+1$ зоны; S_S – площадь контакта деформируемого металла с инструментом; τ – напряжение трения; v_τ – касательная составляющая вектора скорости истечения.

С учетом мощности, подводимой к инструменту, было получено уравнение для определения удельного усилия штамповки:

$$P_{шт} = P_{\text{бп}} + \frac{N}{\pi \cdot R_1^2 \cdot v_0}, \quad (2)$$

где v_0 – скорость перемещения пуансона; $P_{\text{бп}}$ – удельное усилие брикетирования, определяемое из выражения:

$$P_{\text{бп}} = v^2 \frac{v - v_0}{1 - v_0} \tau_s \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} + \frac{v + \ln[1/(1-v)]}{v} + \sqrt{3} \mu \frac{h_1}{R_1} \right\}, \quad (3)$$

где v_0 – исходная относительная плотность свободно насыпанных гранул; v – плотность скомпактированного брикета; τ_s – сопротивление сдвигу скомпактированного материала; μ – коэффициент трения.

Энергозатраты на преодоление мощностей, содержащихся в уравнении (1) для каждой из зон, складываются из следующих составляющих:

в нулевой зоне

$$N^{(0)} = N_T^{(0)}, \quad (4)$$

где $N_T^{(0)}$ – мощность трения на внутренней поверхности дополнительной матрицы.

При этом считали, что напряжение трения изменяется по закону Зибеля:

$$\tau = \sqrt{3} \mu \cdot \tau_s. \quad (5)$$

В зоне 1:

$$N^{(1)} = N_B^{(1)} + N_C^{(01)} + N_C^{(12)} + N_T^{(1)}, \quad (6)$$

где $N_B^{(1)}$ – мощность внутренних сил в зоне 1; $N_C^{(01)}$ – мощность среза на зоны 0 и 1; $N_C^{(12)}$ – мощность среза на границе зон 1 и 2; $N_T^{(1)}$ – мощность трения на нижнем пуансоне.

В зоне 2:

$$N^{(2)} = N_B^{(2)} + N_C^{(23)} + N_T^{(2)}, \quad (7)$$

где $N_B^{(2)}$ – мощность внутренних сил в зоне 2; $N_C^{(23)}$ – мощность среза на границе зон 2 и 3; $N_T^{(2)}$ – мощность трения на нижнем пуансоне и торцевой поверхности дополнительной матрицы.

В зоне 3:

$$N^{(3)} = N_B^{(3)} + N_C^{(34)} + N_T^{(31)} + N_T^{(32)}, \quad (8)$$

где $N_B^{(3)}$ – мощность внутренних сил в зоне 3; $N_C^{(34)}$ – мощность среза на границе зон 3 и 4; $N_T^{(31)}$ –

мощность трения на нижнем пуансоне; $N_T^{(32)}$ – мощность трения на боковой поверхности матрицы.

В зоне 4:

$$N^{(4)} = N_T^{(4)}, \quad (9)$$

где $N_T^{(4)}$ – мощность трения на калибрующем пояске основной и дополнительной матрицы.

Выражения для нахождения соответствующих мощностей представлены в таблице.

Формулы для нахождения потерь мощностей в каждой из зон

Номер зоны	Мощности внутренних сил	Мощности среза	Мощности трения
Зона 0	-	-	$N_T^{(0)} = 2\sqrt{3}\pi \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1 \cdot (h_k - h_2)$
Зона 1	$N_B^{(1)} = \sqrt{3}\pi \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^2$	$N_C^{(01)} = \pi \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^3 / 3 \cdot h_2$ $N_C^{(12)} = \pi \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1 \cdot h_2$	$N_T^{(1)} = \pi \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^3 / \sqrt{3} \cdot h_2$
Зона 2	$N_B^{(2)} = 2\pi \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^2 \cdot \ln(R_2 / R_1)$	$N_C^{(23)} = \pi \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_2 \cdot h_2 \cdot R_1^2 / (R_3^2 - R_2^2)$	$N_T^{(2)} = 2\sqrt{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^2 \cdot (R_2 - R_1) / h_2$
Зона 3	$N_B^{(3)} = \pi \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot \frac{R_1^2 - R_3^2}{R_3 - R_2^2} \cdot \left(2 - \frac{\sqrt{3} \cdot R_2^2 + R_3^4}{R_3^2} + \ln \frac{R_3^2 + \sqrt{3}R_2^4 + R_3^4}{3R_2^2} \right)$	$N_C^{(34)} = \pi \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^2 \cdot (2R_3^3 - 3R_3^2 R_2 - R_2^3) / 3h_2(R_3^2 - R_2^2)$	$N_T^{(31)} = \sqrt{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^2 \cdot (2R_3^3 - 3R_3^2) \cdot (R_2 - R_2^3) / 3h_2(R_3^2 - R_2^2)$ $N_T^{(32)} = \sqrt{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^2 \cdot R_3 \cdot h_2 / (R_3 - R_2^2)$
Зона 4	-	-	$N_T^{(4)} = 2\sqrt{3}\pi \cdot \mu \cdot \tau_s \cdot v_0 \cdot R_1^2 \cdot h_n / (R_3 - R_2)$

Зная потери мощности в каждой из зон, можно определить полную мощность, необходимую для осуществления процесса выдавливания:

$$N = N^{(0)} + N^{(1)} + N^{(2)} + N^{(3)} + N^{(4)}. \quad (10)$$

Подставив значение полной мощности из уравнения (10) в выражение (2), можно рассчитать удельное усилие штамповки в любой момент времени протекания процесса.

Полученные уравнения были использованы при создании алгоритма решения задачи по оценке удельного усилия выдавливания полых изделий из гранулированных материалов. Для определения сопротивления материала сдвигу использовали аппроксимационные зависимости [10]. Удельное усилие выдавливания определяли при малых перемещениях пуансона по мере заполнения металлом полости пресс-формы.

На основе разработанной математической модели создана программа расчета энергосиловых параметров процесса штамповки выдавливанием.

Для экспериментальной проверки точности полученной математической модели были проведены опыты по штамповке полых изделий из гранулированного сплава САС-1 на гидравлическом прессе в лаборатор-

ных условиях. Сходимость экспериментальных и расчетных данных оценивалась с помощью статистических характеристик и показала адекватность полученной модели реальному технологическому процессу. Полученные результаты рекомендованы к практическому применению при выборе технологического оборудования для штамповки гранулированных алюминиевых сплавов.

При определении нормальных напряжений в характерных зонах пресс-формы (см. **рис. 1**) принимали, что в зонах 1 и 3 имеет место осесимметричное деформированное состояние [6], а в зоне 2 – плоское. При этом для зоны 1 использовали уравнение равновесия и приближенное условие пластичности [7] в виде:

$$\frac{dq_{rr}^{(1)}}{dr} + \frac{(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s}{h_2} = 0; \quad (11)$$

$$(p^{(1)} - \Delta p) - q_{rr}^{(1)} = \sigma_s, \quad (12)$$

где $p^{(1)}$ – нормальное напряжение на верхней границе зоны 1; σ_s – сопротивление деформации скомпактированного материала; Δp – удельное усилие, необходимое для преодоления напряжения среза на стыке зоны 1 и 2, зоны 2 и 3, а также напряжения трения на боковой поверхности матрицы:

$$\Delta p = \frac{(N_c^{(12)} + N_c^{(23)} + N_T^{(32)})}{\pi R_1^2 \nu_0}. \quad (13)$$

Из условия пластичности (12) следует, что:

$$\frac{dp^{(1)}}{dr} = \frac{dq_{rr}^{(1)}}{dr}. \quad (14)$$

Решая совместно уравнения (11) и (12), получили выражение для нормального осевого напряжения на границе зоны 1:

$$p^{(1)} = -\frac{(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s}{h_2} r + c. \quad (15)$$

Постоянную интегрирования определяли из условия, что на верхней границе зоны 1:

$$p_{cp}^{(1)} = p, \quad (16)$$

где p – удельное усилие выдавливания.

При неустановившемся процессе [8] (истечение металла в зону 2 только начинается):

$$p_n^{(1)} = \frac{N_c^{(01)} + N_g^{(1)} + N_T^{(1)}}{\pi R_1^2 \cdot \nu_0}. \quad (17)$$

При установившемся процессе (зоны 2, 3 и 4 полностью заполнены металлом)

$$p = (N_c^{(01)} + N_g^{(1)} + N_m^{(1)} + N_c^{(12)} + N_g^{(2)} + N_m^{(2)} + N_c^{(23)} + N_g^{(3)} + N_T^{(31)} + N_m^{(32)} + N_c^{(34)} + N_m^{(4)}) / \pi R_1^2 \nu_0. \quad (18)$$

Среднее напряжение, действующее по поверхности перпендикулярной оси z:

$$p_{cp}^{(1)} = \frac{1}{\pi R_1^2} \int_0^{2\pi} \int_0^{R_1} p r dr d\phi = -\frac{2(1 + \sqrt{3}\mu)R_1\tau_s}{3h_2} + c. \quad (19)$$

С учетом уравнения (16)

$$c = p + \frac{2(1 + \sqrt{3}\mu) \cdot R_1\tau_s}{3h_2}. \quad (20)$$

Подставив значение постоянной интегрирования из выражения (20) в уравнение (19), с учетом условия пластичности (12), получили выражения для расчета нормальных напряжений в зоне 1:

$$p^{(1)} = \frac{(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s}{h_2} \left(\frac{2}{3}R_1 - r\right) + p; \quad (21)$$

$$q_{rr}^{(1)} = q_{\phi\phi}^{(1)} = \frac{(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s}{h_2} \left(\frac{2}{3}R_1 - r\right) - \sqrt{3}\tau_s + p - \Delta p. \quad (22)$$

В рассматриваемом случае главные напряжения в зоне 1 могут быть представлены в виде

$$\sigma_{rr}^{(1)} = -q_{rr}^{(1)}; \quad \sigma_{\phi\phi}^{(1)} = -q_{\phi\phi}^{(1)}; \quad \sigma_{zz}^{(1)} = -p^{(1)}. \quad (23)$$

Приняв во внимание уравнение (16) и условие пластичности (12), нашли выражение для определения среднего гидростатического напряжения в зоне 1.

При установившемся процессе

$$\sigma = \frac{2(\sqrt{3}\tau_s + \Delta p)}{3} - p. \quad (24)$$

При неустановившемся процессе $\Delta p = 0$, $p = p_n^{(1)}$, тогда

$$\sigma = \frac{2\tau_s}{\sqrt{3}} - p_n^{(1)}. \quad (25)$$

Приняв $T = \tau_s$, оценили показатель напряженного состояния в зоне 1.

При установившемся процессе

$$K_y^{(1)} = \sigma / T = 2 / \sqrt{3} + (2\Delta p / 3 - p) / \tau_s. \quad (26)$$

При неустановившемся процессе

$$K_n^{(1)} = \sigma / T = 2 / \sqrt{3} - p_n^{(1)} / \tau_s. \quad (27)$$

В зоне 2 осевая деформация отсутствует, то есть имеет место плоское деформированное состояние. Для определения нормальных напряжений в этой зоне использовали уравнение равновесия и условие пластичности в виде

$$\frac{dq_{rr}^{(2)}}{dr} + \frac{2\sqrt{3}\mu\tau_s}{h_2} + \frac{q_{rr}^{(2)} - q_{\phi\phi}^{(2)}}{r} = 0., \quad (28)$$

$$q_{rr}^{(2)} - q_{\phi\phi}^{(2)} = 2\tau_s. \quad (29)$$

Решая совместно уравнения (28) и (29), получили:

$$q_{rr}^{(2)} = -2\sqrt{3}\mu\tau_s r / h_2 - 2\tau_s \ln r + c. \quad (30)$$

Постоянную интегрирования определяли из граничных условий:

$$\begin{aligned} q_{rr}^{(2)} \Big|_{r=R_1} &= q_{rr}^{(1)} \Big|_{r=R_1}, \\ c &= 2\sqrt{3}\mu\tau_s R_1 / h_2 + 2\tau_s \ln R_1 - \\ &-(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s R_1 / 3h_2 - \sqrt{3}\tau_s + p - \Delta p. \end{aligned} \quad (31)$$

Подставив значение постоянной интегрирования из уравнения (31) в выражение (30), получили уравнение для определения радиального напряжения в зоне 2:

$$\begin{aligned} q_{rr}^{(2)} &= -2\sqrt{3}\mu\tau_s (r - R_1) / h_2 - 2\tau_s \ln(r / R_1) - \\ &-(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s R_1 / 3h_2 - \sqrt{3}\tau_s + p - \Delta p. \end{aligned} \quad (32)$$

Из условия пластичности (29), с учетом выражения (32), определили тангенциальное напряжение в зоне 2:

$$\begin{aligned} q_{\phi\phi}^{(2)} &= -2\sqrt{3}\mu\tau_s (r - R_1) / h_2 - 2\tau_s \ln(r / R_1) - \\ &-(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s R_1 / 3h_2 - (2 + \sqrt{3})\tau_s + p - \Delta p. \end{aligned} \quad (33)$$

Главные напряжения в зоне 2 могут быть представлены в виде

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}^{(2)} &= -q_{rr}^{(2)}; \quad \sigma_{\phi\phi}^{(2)} = \\ &= -q_{\phi\phi}^{(2)}; \quad \sigma_{zz}^{(2)} = -\frac{q_{rr}^{(2)} + q_{\phi\phi}^{(2)}}{2} \end{aligned} \quad (34)$$

Гидростатическое напряжение в зоне 2, с учетом условия пластичности (29) и соотношений (34), может быть представлено в виде

$$\sigma = \frac{\sigma_{rr}^{(2)} + \sigma_{\phi\phi}^{(2)}}{2} = \tau_s - q_{rr}^{(2)}. \quad (35)$$

Причем на выходе из зоны 2 ($r = R_2$) при установившемся процессе

$$\begin{aligned} \sigma &= 2\sqrt{3}\mu\tau_s (R_2 - R_1) / h_2 + 2\tau_s \ln(R_2 / R_1) + \\ &+(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s R_1 / 3h_2 + (1 + \sqrt{3})\tau_s - p + \Delta p. \end{aligned} \quad (36)$$

При неустановившемся процессе (зоны 3 и 4 не заполнены металлом)

$$\begin{aligned} p_n^{(2)} &= (N_c^{(01)} + N_\theta^{(1)} + N_m^{(1)} + \\ &+ N_c^{(12)} + N_\theta^{(2)} + N_T^{(2)}) / \pi R_1^2 v_0; \\ \Delta p_n^{(2)} &= \frac{N_c^{(12)}}{\pi R_1^2 v_0}. \end{aligned} \quad (37)$$

Гидростатическое напряжение на выходе из зоны 2 при неустановившемся процессе

$$\begin{aligned} \sigma &= 2\sqrt{3}\mu\tau_s (R_2 - R_1) / h_2 + 2\tau_s \ln(R_2 / R_1) + \\ &+(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s R_1 / 3h_2 + (1 + \sqrt{3})\tau_s - p_n^{(2)} + \Delta p_n^{(2)}. \end{aligned} \quad (38)$$

Таким образом, показатель напряженного состояния на выходе из зоны 2 при установившемся процессе

$$\begin{aligned} K_y^{(2)} &= \sigma / T = 2\sqrt{3}\mu(R_2 - R_1) / h_2 + 2\ln(R_2 / R_1) + \\ &+(1 + \sqrt{3}\mu)R_1 / 3h_2 + 1 + \sqrt{3} - (p - \Delta p) / \tau_s. \end{aligned} \quad (39)$$

При неустановившемся процессе

$$\begin{aligned} K_n^{(2)} &= \sigma / T = 2\sqrt{3}\mu(R_2 - R_1) / h_2 + 2\ln(R_2 / R_1) + \\ &+(1 + \sqrt{3}\mu)R_1 / 3h_2 + 1 + \sqrt{3} - (p_n^{(2)} - \Delta p_n^{(2)}) / \tau_s. \end{aligned} \quad (40)$$

Допустим, что в зоне 3, как и в зоне 1, имеет место осесимметричное деформированное состояние. Тогда, проинтегрировав уравнение (11) и определив постоянную интегрирования из условия $q_{rr}^{(3)} \Big|_{r=R_2} = q_{rr}^{(2)} \Big|_{r=R_2}$, можно получить выражение для радиального и тангенциального напряжений в зоне 3:

$$\begin{aligned} q_{rr}^{(3)} &= q_{\phi\phi}^{(3)} = -2\sqrt{3}\mu\tau_s (R_2 - R_1) / h_2 - 2\tau_s \ln(R_2 / R_1) - \\ &-(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s R_1 / 3h_2 - (1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s (r - R_2) / \\ &/h_2 - \sqrt{3}\tau_s + p - \Delta p. \end{aligned} \quad (41)$$

Условие пластичности для зоны 3 принимали в виде

$$q_{rr}^{(3)} - p^{(3)} = \sigma_s, \quad (42)$$

где $p^{(3)}$ – удельное усилие подпора, создаваемое силами трения на калибрующем пояске матрицы.

$$p_{cp}^{(3)} = -\frac{N_T^{(4)}}{\pi R_1^2 v_0}. \quad (43)$$

Из условия пластичности (42) и уравнения (41) следует, что

$$\begin{aligned} p^{(3)} &= -2\sqrt{3}\mu\tau_s (R_2 - R_1) / h_2 - 2\tau_s \ln(R_2 / R_1) - \\ &-(1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s R_1 / 3h_2 - (1 + \sqrt{3}\mu)\tau_s (r - R_2) / \\ &/h_2 - 2\sqrt{3}\tau_s + p - \Delta p. \end{aligned} \quad (44)$$

Причем, при $r = R_3$ (зона 3 полностью заполнена металлом)

$$p^{(3)} = p_{cp}^{(3)}.$$

Главные напряжения в зоне 3 могут быть записаны в виде:

$$\sigma_{rr}^{(3)} = -q_{rr}^{(3)}; \quad \sigma_{\phi\phi}^{(3)} = -q_{\phi\phi}^{(3)}; \quad \sigma_{zz}^{(3)} = -p^{(3)}. \quad (45)$$

Принимая во внимание уравнение (43) и условие пластичности (42), можно записать выражение для определения среднего гидростатического напряжения в зоне 3.

При установившемся процессе

$$\sigma = -2\tau_s / \sqrt{3} - p_{cp}^{(3)}. \quad (46)$$

При неустановившемся процессе $p_{cp}^{(3)} = 0$ (истечение металла в зону 4 только начинается)

$$\sigma = -2\tau_s / \sqrt{3}. \quad (47)$$

Отсюда показатель напряженного состояния при установившемся процессе

$$K_y^{(3)} = \sigma / T = -2 / \sqrt{3} - p_{cp}^{(3)} / \tau_s \quad (48)$$

При неустановившемся процессе

$$K_n^{(3)} = \sigma / T = -2 / \sqrt{3} \quad (49)$$

Анализ напряженного состояния, возникающего в процессе выдавливания, и результаты исследования макроструктуры полученных полуфабрикатов показали, что на свободной поверхности деформируемого металла при заполнении зоны 2 возникают растягивающие напряжения, которые приводят к появлению микротрещин в верхней части стенок штампуемых изделий. Создание схемы напряженного состояния с преобладанием сжимающих напряжений могло бы способствовать повышению ресурса пластичности металла и устранению такого рода дефектов [9].

С этой целью пресс-форму [3] (см. рис. 1) снабдили размещенным в нижней части основной матрицы сменным кольцом, внешний диаметр которого равен внутреннему диаметру основной матрицы, а внутренний диаметр совпадает с внутренним диаметром дополнительной матрицы (рис. 2) [11]. Кольца изготавливали из алюминиевого сплава, близкого по химическому составу к материалу гранул.

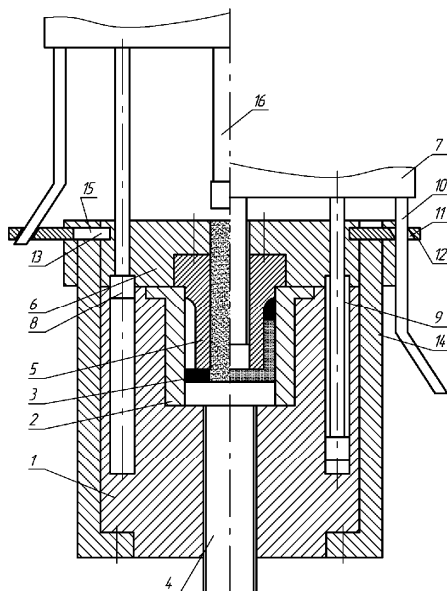


Рис. 2. Пресс-форма для выдавливания полых изделий из гранул алюминиевых сплавов: 1 – нижняя плита; 2 – основная матрица; 3 – сменное кольцо; 4 – нижний пуансон; 5 – дополнительная матрица; 6 – верхняя плита; 7 – траверса; 8 – тяги верхней плиты; 9 – направляющие; 10 – клин-пальцы; 11 – наклонные отверстия; 12 – ползуны; 13 – горизонтальные пазы; 14 – тяги нижней плиты; 15 – горизонтальные отверстия; 16 – верхний пуансон

Наличие такого кольца привело к появлению усилия подпора при выдавливании брикетированных гранул из дополнительной матрицы в основную и создало более благоприятную схему напряженного состояния с преобладанием сжимающих напряжений, препятствующих возникновению микротрещин. В результате применения

пресс-формы со сменными кольцами стала ненужной дополнительная операция по обточке верхней части пресс-изделия и повысился на 7–8% выход годного.

В конструкции пресс-формы [3] предусмотрен пакет тарельчатых пружин для создания противодействия при предварительном уплотнении гранул в брикет. При горячей деформации тарельчатые пружины подвергались воздействию высоких температур, что достаточно быстро приводило их в негодность из-за потери упругих свойств. Замена пружин требовала остановок в работе пресс-формы. В конструкции пресс-формы [11] необходимость в тарельчатых пружинах отпала, так как нужное по величине противодействие обеспечивает сменное кольцо. Сокращение остановок пресс-формы для замены пружин позволило повысить производительность процесса на 2 – 3%.

Список литературы

1. Влияние схемы напряженного состояния на пластичность компактированного гранулированного алюминиевого сплава / А.И. Колпашиков, А.П. Петров, А.С. Кирилянчик и др. // Изв. АН СССР. Металлы. 1983. № 3. С. 99–102.
2. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
3. А.с. 1109261 СССР, МКИЗ В22F3/02, В30В15/02. Пресс-форма / Н.В. Шепельский, В.И. Белокопытов, Н.А. Грищенко, В.В. Купоросов (СССР). – № 3596053/22 – 02; заявл. 27.05.83; опубл. 23.08.84, Бюл. № 31.
4. Корнилов В.Н., Белокопытов В.И., Русов И.Г. Аналитическая оценка коэффициента бокового давления при сжатии пористого металлического материала в контейнере // Обработка металлов давлением: междуз. сб. Вып. 15. Свердловск: Изд-во УПИ им С.М. Кирова, 1988. С. 52 – 56.
5. Гун Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1980. 456 с.
6. Овчинников А.Г. Основы теории штамповки выдавливанием на прессах. М.: Машиностроение, 1983. 200 с.
7. Унксов Е.П. Инженерные методы расчета усилий при обработке металлов давлением. М.: Mashgiz, 1955. 280 с.
8. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 424 с.
9. Богатов А.А., Мижиритский О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
10. Горбунов Ю.А., Усолтцев С.В., Белокопытов В.И. Закономерности изменения сопротивления деформации высокопрочных гранулируемых сплавов при их переработке в полуфабрикаты // Тез. докл. II Всесоюз. науч.-техн. конф. по металлургии гранул. М., 1987. С. 98–99.
11. Евразийская патентная организация. Пресс-форма / В.И. Белокопытов; заявитель Сибирский федеральный университет. Заявка на изобретение. – № 201101101 / 26. Приоритет от 19.08.11.

Bibliography

1. Effect of tension on plasticity of compacted granular aluminum alloy / A.P. Kolpashnikov, A.P. Petrov, A.S. Kirilyanchik, etc. // Izv. USSR Academy of Sciences. Metals, 1983. № 3. P. 99–102.
2. Kolmogorov V.L. Mechanics of metal forming. M.: Metallurgy, 1986. 688 p.
3. A.s. 1109261 USSR, MКИЗ В22F3/02, В30В15/02. Press mold / N.V. Shepelsky, V.I. Belokopytov, N.A. Grishenko, V.V. Kuporosov (USSR). – № 3596053/22 – 02; appl. 27.05.83; publ. 23.08.84, Bull. № 31.
4. Kornilov V.N., Belokopytov V.I., Rusov I.G. Analytical estimation of lateral pressure coefficient in compression of porous metal in container // Metal Forming: Interuniversity Collection. № 15. Sverdlovsk: U PI named after S.M.Kirov, 1988. P. 52–56.
5. Gun G.Ya. Fundamentals of metal forming. M.: Metallurgy, 1980, 456.
6. Ovchinnikov A.G. Fundamentals of impact press extrusion. M.: Mashinostroenie, 1983. 200 p.
7. Unksov E.P. Engineering methods of plastic theory in metal forming. Moscow: Mashgiz, 1955. 280 p.
8. Storozhev M.V., Popov E.A. Theory of metal forming. M.: Mashinostroenie, 1977. 424 p.
9. Bogatov A.A., Mizhiritsky O.I., Smirnov S.V. Ductility in metal forming. M.: Metallurgy, 1984. 144 p.
10. Gorbunov U.A., Usoltsev S.V., Belokopytov V.I. Common factors of change in strain resistance of extra high tensile granulating alloy in processing in half-finished product // Abstracts of the 2-nd Scientific-Technical Conference of Granular Metallurgy. M., 1987. P. 98–99.
11. The Eurasian Patent Organization. Press mold / V.I. Belokopytov; applicant Siberian Federal University. An application for invention. № 201101101 / 26. Author's Priority 19.08.11.