

УДК: 621.7 : 539.3

DOI: 10.17073/0021-3438-2015-1-39-44

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУНЕПРЕРЫВНОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ ПОРИСТОЙ ЗАГОТОВКИ

© 2015 г. **И.М. Березин, А.Г. Залазинский, А.В. Долматов**

Институт машиноведения (ИМАШ) УрО РАН, г. Екатеринбург

Институт металлургии (ИМЕТ) УрО РАН, г. Екатеринбург

*Статья поступила в редакцию 12.04.13 г., подписана в печать 07.05.13 г.*

Осуществлено моделирование процесса полунепрерывного выдавливания прутков неограниченной длины из предварительно спрессованной и спеченной порошкообразной меди. Для минимизации действия внешнего трения применяется гидродинамический режим смазки. Приведена зависимость давления выдавливания от перемещения пуансона при различных углах конуса матрицы. Предложена методика построения сетки конечных элементов для решения задач компьютерного моделирования процесса полунепрерывного выдавливания цилиндрических образцов. Исследован механизм изменения пористости по сечению заготовки на различных стадиях процесса. Построены математические модели процесса полунепрерывного выдавливания.

**Ключевые слова:** полунепрерывное выдавливание, моделирование, пористый материал, метод конечных элементов, условие текучести Гурсона, гидродинамическое трение, Abaqus.

Semicontinuous extrusion of the infinite length rods from preliminarily compacted and sintered powder copper is simulated. To minimize the external friction effect, hydrodynamic lubrication mode is used. The dependence of extrusion pressure on the punch travel at various die cone angles is presented. A procedure of construction of the grid of finite elements to solve the problems of computer modeling of semicontinuous extrusion of cylindrical samples is proposed. The mechanism of varying the porosity over the bar cross-section at various process stages is investigated. Mathematical models of semicontinuous extrusion are constructed.

**Keywords:** semicontinuous extrusion, simulation, porous material, finite element method, Gurson yield condition, hydrodynamic friction, Abaqus.

### Введение

Традиционная технология получения прутков неограниченной длины из пористого и порошкообразного сырья базируется на продавливании деформируемого материала через матрицу (мундштук). Оно осуществляется способом «тандем» (заготовка за заготовкой), при котором задний конец предшествующей заготовки (пресс-остаток) выдавливается из конической полости матрицы передним концом очередного брикета. Схема полунепрерывного выдавливания прутков показана на рис. 1.

Для процесса выдавливания характерны три основных случая. Первый реализуется при малых вытяжках, при этом возникающие во всех частях

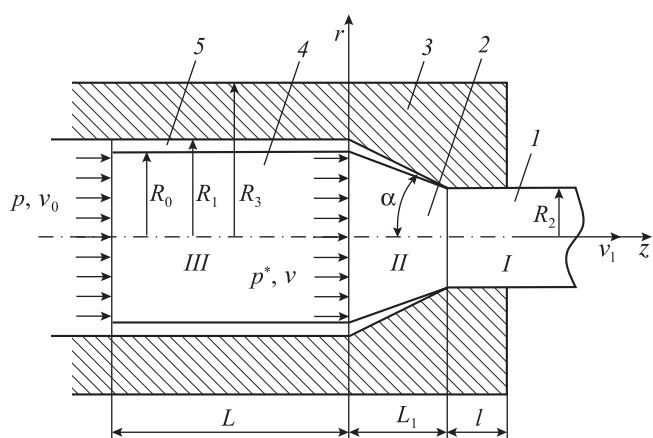
деформируемой заготовки средние нормальные напряжения недостаточны для обеспечения объемного сжатия деформируемой сдвигом пористой массы.

Второй вариант характерен, когда требуется значительная вытяжка пористой заготовки, при этом напряжения подпора со стороны пресс-остатка настолько велики, что полное уплотнение следующей заготовки достигается внутри цилиндрической части матрицы III. Таким образом, после окончания стадии прессования (распрессовки) брикета процесс переходит в стадию выдавливания несжимаемого материала.

*Березин И.М. — аспирант лаборатории системного моделирования ИМАШ УрО РАН (620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, 34). Тел.: (343) 375-35-90. E-mail: berezin.e-mail@yandex.ru.*

*Залазинский А.Г. — докт. техн. наук, проф., зав. этой лабораторией. Тел.: (343) 375-35-90. E-mail: zal@imach.uran.ru.*

*Долматов А.В. — канд. хим. наук, ст. науч. сотр. лаборатории физической химии металлургических расплавов ИМЕТ УрО РАН (620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101). Тел.: (343) 267-89-24. E-mail: dolmatov.imet@gmail.com.*



**Рис. 1.** Схема полунепрерывного выдавливания

*I* – задний конец прутка; *2* – пресс-остаток; *3* – матрица; *4* – брикет; *5* – смазка

$R_0$  – радиус заготовки;  $R_1$  – радиус цилиндрической части матрицы;  $R_2$  – радиус выдавленного прутка;  $R_3$  – радиус внешней стенки матрицы;  $\alpha$  – угол конуса матрицы;  $L$  – длина цилиндрической части матрицы;  $L_1$  – длина конусной части матрицы;  $l$  – длина калибрующего пояса;  $p, p^*$  – давление;  $v_0, v, v_1$  – скорость истечения материала на разных стадиях процесса

Третий случай осуществляется, когда объемное сжатие возможно одновременно как в области *II*, так и в области *III*. Материал в зоне *III* сжимается активным пуансоном при создании противодействия со стороны материала, прилежащего к области *II*. Это противодействие обусловлено как сопротивлением сдвиговым деформациям, так и напряжениями трения на зеркале матрицы и калибрующем пояске [1], причем в области *II* образуются две зоны – деформаций сдвига и объемного сжатия пористой массы. При этом в результате действия внешнего трения происходит перераспределение напряжений и плотности, что, в свою очередь, приводит к неоднородности механических свойств изделий.

В работе [2] показано, что за счет минимизации сил трения путем применения альтернативных режимов смазки, например гидродинамического [3, 4], значительно возрастает коэффициент запаса прочности заготовки, смягчается напряженное состояние и улучшается пластичность. Таким образом, существование нескольких случаев течения пластически сжимаемой массы при выдавливании, наличие различных стадий процесса и условий контактного трения значительно усложняют математическое моделирование. Для решения задач пластического течения пористых тел развита прикладная теория пластичности [5–7], установлены вариационные принципы [8, 9]. На их основе осуществлено моделирование процессов изостатического прес-

сования, прокатки и выдавливания пористых заготовок [7]. При этом использованы континуальные представления, в соответствии с которыми пористые металлические материалы – сплошная пластически сжимаемая среда. Однако область применения таких решений ограничена принятием ряда допущений. В них не учитываются распределение плотности, характер и картина течения материала в произвольной области деформируемой заготовки, ограничиваются деталями простой формы. Этот недостаток позволяет устранить использование современных компьютерных средств – таких, как «Deform», «Abaqus» и др.

Цель настоящей работы – математическое моделирование процесса на примере исследования полунепрерывного выдавливания заготовок из предварительно спрессованной и спеченной порошкообразной меди в режиме гидродинамического трения. При этом актуальным вопросом является оценка энергосиловых параметров процесса и пористости выдавленных прутков.

## Постановка задачи

Для определения параметров процесса выдавливания использовали систему конечно-элементного анализа «Abaqus» (студенческая версия). Исследуемым объектом служили заготовки из предварительно спрессованной и спеченной порошкообразной меди марки ПМС-1. Поставленная задача реализовывалась путем решения серии компьютерных экспериментов. Значения параметров угла матрицы ( $2\alpha$ ), вытяжки ( $\mu$ ) и пористости заготовки ( $\theta_3$ ) изменялись в интервалах  $2\alpha = 40 \div 100^\circ$ ;  $\mu = 2 \div 8$ ;  $\theta_3 = 0,02 \div 0,2$ . Значения пористости пресс-остатка  $\theta_{II}$  малы и находятся в диапазоне  $0 \leq \theta_{II} \leq 0,02$ .

В начальный момент очередного цикла выдавливания полость матрицы, имеющей коническую форму, заполняет пресс-остаток заготовки, выдавленной в предшествующем цикле прессования; полость цилиндрического контейнера занимает пористый брикет. Зазор между боковой поверхностью брикета и стенкой контейнера заполнен слоем смазки. Задача решалась в цилиндрической системе координат  $r, \varphi, z$ . Весь объем пористой массы, подвергаемой выдавливанию, делится на три части: *I* – ею заполнен калибрующий поясок матрицы, *II* – коническая полость матрицы, *III* – цилиндрическая. Для областей *I–III* рассматривались следующие процессы: прессование пористого материала в ци-

линдрической полости матрицы и его истечение из нее с некоторой скоростью  $v_1$  под действием давления ( $p$ ), приложенного в сечении  $z = -L$  со стороны пуансона. В сечении  $z = 0$  со стороны пресс-остатка выдавливанию препятствует давление  $p^*$ , обусловленное действием сил трения в конической полости и калибрующем пояске матрицы.

В настоящее время при выдавливании широко применяется сухая порошкообразная смазка на основе стеаратов (например, стеарат цинка). Необходимым условием реализации гидродинамического режима трения является существование устойчивого толстого слоя вязкопластичной смазки, позволяющего разделить поверхности обрабатываемой заготовки и инструмента. Поддержать толстый смазочный слой и предупредить выдавливание смазки из очага деформации можно, сообщив смазке такое давление, которое достаточно для пластической деформации обрабатываемого материала. Для расчета давления смазки на входе в очаг деформации используется формула [2]

$$\frac{q}{\sigma_{sc}} = 2 \frac{T}{\sigma_{sc}} \frac{L}{R_0} \left( \frac{R_1}{R_0} - 1 \right)^{-1}, \quad (1)$$

где  $q$  — давление вещества смазки в слое интенсивного течения;  $\sigma_{sc}$  — предел текучести смазки;  $T$  — интенсивность касательных напряжений смазки.

Так как величина  $T$  слоя смазки много меньше предела текучести выдавливаемой заготовки, то в рассматриваемом случае контактные касательные напряжения полностью определяются механическими свойствами смазочного слоя. Для расчета этих напряжений применили соотношения, связывающие динамическую вязкость ( $\eta$ ), предел текучести слоя смазки при сдвиге ( $\tau_{sc}$ ) и температуру ( $\Theta$ ) [2]:

$$\frac{T}{\tau_{sc}} = 1 - \exp\left(-\frac{\eta}{\tau_{sc}} H\right), \quad (2)$$

$$\tau_{sc} = \beta_1 [1 - \exp(-\beta_2 q)] \exp(-\beta_3 \Theta / \Theta_p), \quad (3)$$

$$\eta = \alpha_1 [1 - \exp(-\alpha_2 q)] \exp(-\alpha_3 \Theta / \Theta_p), \quad (4)$$

где  $H$  — интенсивность скорости деформации сдвига;  $\Theta$  — температура вещества смазки в слое интенсивного течения;  $\Theta_p$  — температура размягчения смазки;  $\alpha_1 - \alpha_3$ ,  $\beta_1 - \beta_3$  — эмпирические коэффициенты.

Для установившегося интенсивного течения смазки в узких зазорах из уравнения (2) следует соотношение  $T = \tau_{sc}$ . В этом случае для расчета кон-

тактных касательных напряжений используется уравнение (3).

С учетом того, что в очаге деформации слой смазки очень тонкий, приравнивали температуры обрабатываемой заготовки и смазки. В результате для расчета температуры смазки применяем формулу [2]

$$\Theta = \Theta_0 + \frac{(\sigma_s^* + T \operatorname{ctg} \alpha') \ln(\mu/2)}{c^* \rho^* + \frac{\lambda(L+L_1+l)}{v_1 R_2^2} \left( \ln \frac{2R_3}{R_1+R_2} \right)^{-1}}, \quad (5)$$

где  $\Theta_0$  — температура заготовки на входе в очаг деформации;  $\sigma_s^*$  — предел текучести материала заготовки;  $c^*$ ,  $\rho^*$  — удельная теплоемкость и плотность материала заготовки;  $\lambda$  — теплопроводность стенки матрицы;  $\mu$  — вытяжка;  $\alpha'$  — приведенный угол матрицы [10]:

$$\alpha' = \operatorname{arccctg} \left[ \operatorname{ctg} \alpha + \frac{1}{1 + \sqrt{\mu}} \frac{1}{R_2} \right]. \quad (6)$$

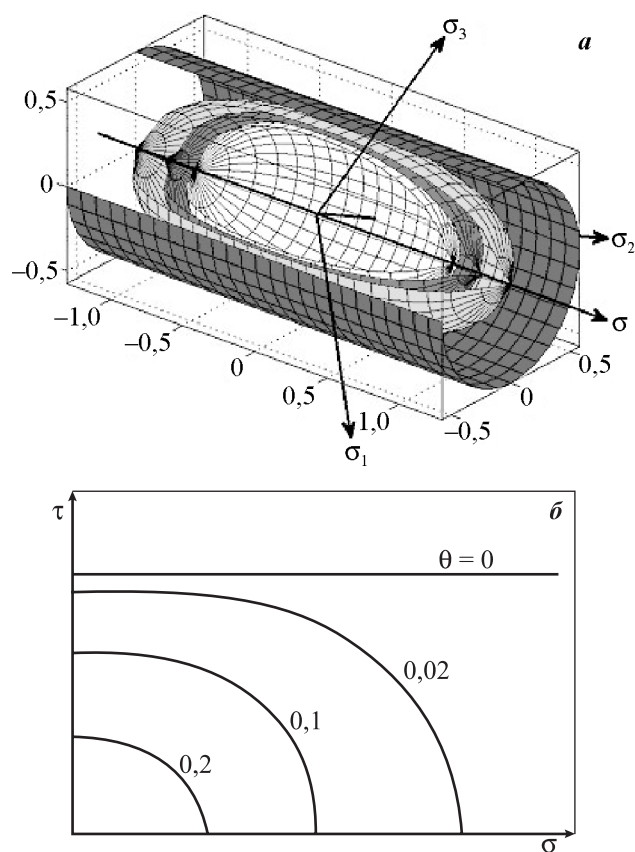
Используемый в настоящей работе закон текучести

$$\left( \frac{\sigma_i}{\sigma_s} \right)^2 + 2a\theta \operatorname{ch} \left( -\frac{3}{2} b \frac{\sigma}{\sigma_s} \right) - (a\theta)^2 = 1 \quad (7)$$

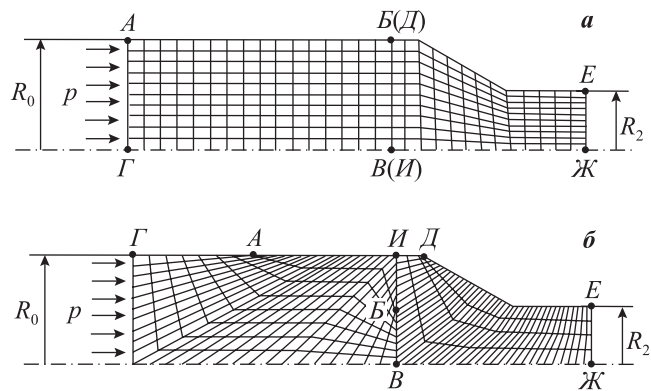
получен автором [11] из решения задачи о деформации жесткопластической среды с единичной сферической порой и впоследствии модифицирован автором [12]. Здесь  $\sigma_i$  — интенсивность напряжений;  $\sigma$  — среднее нормальное напряжение;  $\sigma_s$  — предел текучести материала основы при одноосном растяжении/сжатии;  $\theta$  — относительная пористость;  $a = 1$ ,  $b = 1,25$  — функции состояния материала [11–13].

Геометрическая интерпретация принятого условия текучести приведена на рис. 2. Под действием гидростатического давления пористое тело приобретает необратимые деформации объема. Условие пластичности здесь зависит от среднего напряжения, а поверхность текучести замкнута. При относительной пористости  $\theta = 0$  условие (7) превращается в условие пластичности Губера—Мизеса для несжимаемого материала.

Для описания деформации сплошной среды традиционно используются три подхода: Лагранжа, Эйлера и Лагранжево-Эйлеровый. Например, в работе [14] последний подход называется Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation (ALE). Решение задач в ALE-постановке методом конечных элементов позволяет обеспечить качественную сетку даже в случае больших деформаций и нарушения сплош-



**Рис. 2.** Геометрическая интерпретация условия текучести (7)  
*а* – в пространстве главных напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (3/4 модели)  
*б* – на плоскости  $\sigma, \tau$



**Рис. 3.** Схема построения сетки конечных элементов  
*а* – до адаптации сетки; *б* – после адаптации сетки

ности материала, при этом узлы сетки перемещаются независимо от области, которую занимает материал. Однако данный подход имеет ограниченное применение, в частности для способа полунепрерывного выдавливания. Указанный процесс характеризуется сильным искажением сетки в области контакта заготовки и пресс-остатка вследствие не-

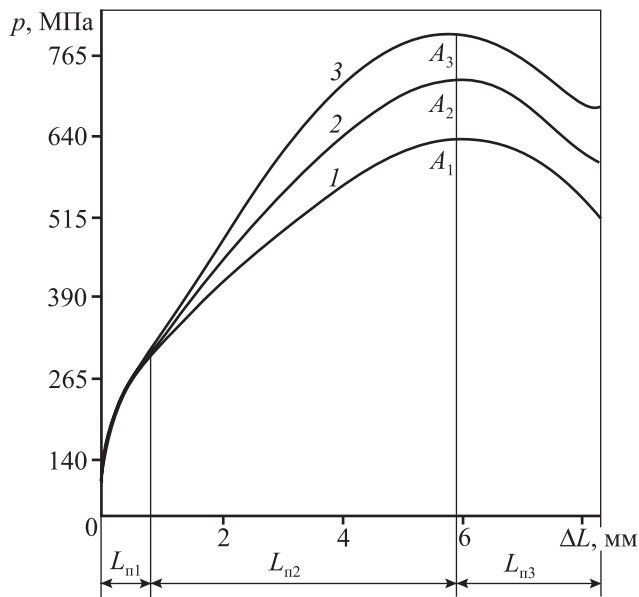
равномерности распределения скоростей истечения материала на различных участках очага деформации. В связи с этим возникает потребность использования специальной техники построения сетки конечных элементов.

На рис. 3 показана схема адаптации сетки, разработанная для задачи полунепрерывного выдавливания цилиндрических прутков. При осесимметричной постановке задачи область построения сетки четырехугольных билинейных конечных элементов описывается 4 вершинами: для брикета – *А, Б, В, Г*; для пресс-остатка – *Д, Е, Ж, И*. Вершины необходимо переместить таким образом, чтобы отрезки *ГА* и *ИД* находились на образующей заготовки радиусом  $R_0$  в цилиндрической части матрицы, причем  $GA \leq AI$ , а отрезок *БВ*, расположенный на линии стыка заготовки и пресс-остатка, удовлетворял условию  $BB \leq R_2$ . Видно (см. рис. 3, *б*), что конечные элементы ориентированы под углом к образующей прутка в цилиндрической части матрицы, при этом сгущение сетки организовано в зоне потенциально больших деформаций: конической полости матрицы; границы раздела заготовки и пресс-остатка.

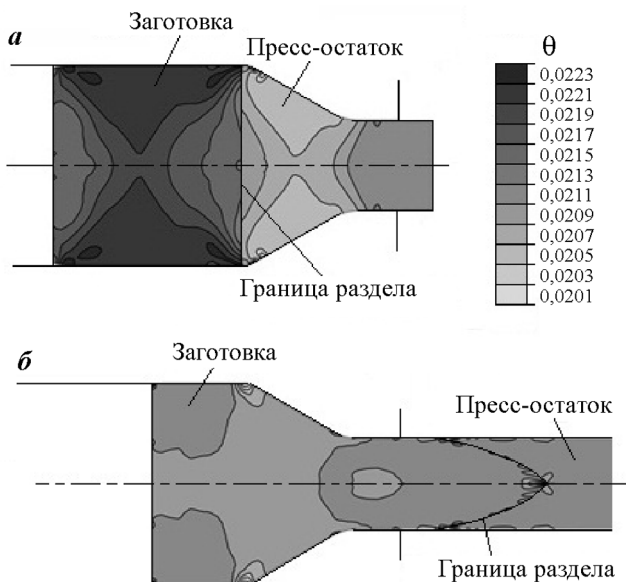
### Обсуждение результатов исследования

Для характеристики различных стадий цикла полунепрерывного выдавливания на рис. 4 дана зависимость давления выдавливания ( $p$ ) брикета пористостью  $\theta_3 = 0,1$  от перемещения пуансона ( $\Delta L$ ) при углах матрицы  $2\alpha$ . Выделены следующие стадии, соответствующие различным участкам диаграммы  $p = p(\Delta L)$ : прессование брикета ( $L_{п1}$ ); выдавливание пресс-остатка предшествующей заготовки ( $L_{п2}$ ); спад давления выдавливания, обусловленный уменьшением влияния сил контактного трения ( $L_{п3}$ ). С практической точки зрения, для совершенствования процесса полунепрерывного выдавливания из перечисленных стадий важна вторая – завершение прессования брикета и его дальнейшее выдавливание до момента спада кривых (точки  $A_1, A_2$  и  $A_3$ ).

На рис. 5 показано распределение пористости по сечению заготовки для начальной пористости  $\theta_3 = 0,1$  при угле матрицы  $2\alpha = 60^\circ$  и вытяжке  $\mu = 4,94$  на различных стадиях процесса выдавливания. Видно (см. рис. 5, *а*), что пористость материала брикета, деформированного в непосредственной близости от пуансона, достигает пористости пресс-остатка.



**Рис. 4.** Зависимость давления выдавливания от перемещения пуансона  
 $2\alpha = 40^\circ$  (1),  $60^\circ$  (2) и  $80^\circ$  (3)



**Рис. 5.** Распределение пористости ( $\theta$ ) по сечению заготовки  
 а – распрессовка заготовки  
 б – выход границы раздела заготовок из очага матрицы

Далее материал брикета проходит через коническую часть матрицы практически без изменения пористости, что объясняется недостаточным уровнем средних нормальных напряжений, отвечающих за изменение объема. При этом наибольшая скорость истечения материала наблюдается на оси симметрии заготовки (см. рис. 5, б). На выходе из калибрующего пояса матрицы возникает другой вид напряженно-

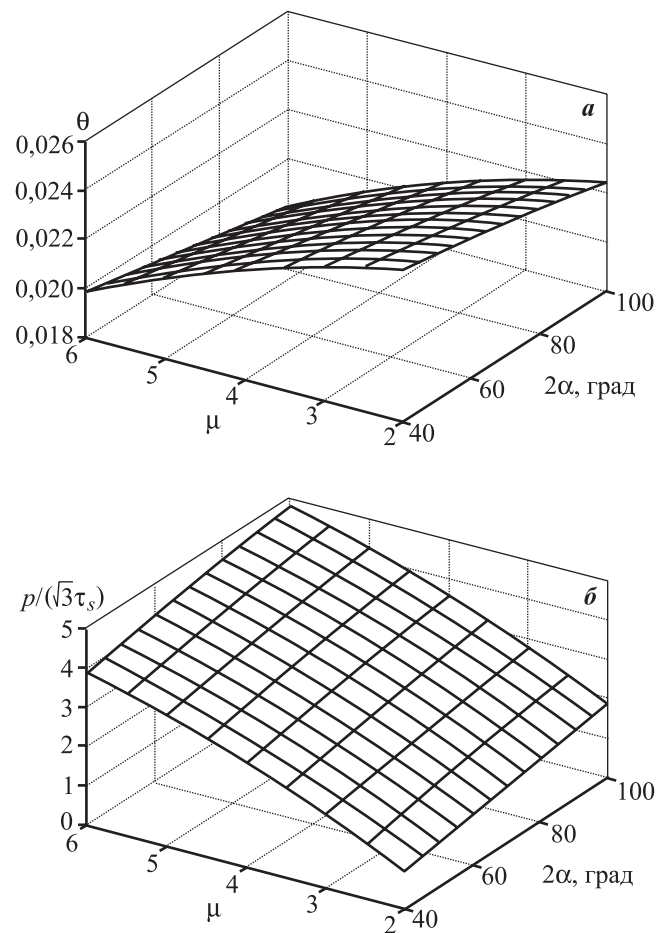
го состояния — продольное напряжение переходит из сжимающего в растягивающее, вследствие чего возникает незначительное разуплотнение. Следует отметить, что в принятом диапазоне значений  $\mu$  и  $\alpha$  относительная пористость материала ( $\theta$ ) на выходе из очага матрицы несущественно зависит от начальной пористости заготовки ( $\theta_3$ ).

Согласно результатам вычислительного эксперимента получены зависимости параметров процесса выдавливания  $\theta$  и  $p/(\sqrt{3}\tau_s)$  от угла  $\alpha$  и вытяжки  $\mu$ :

$$p/(\sqrt{3}\tau_s) = -2,151 + 0,0512\alpha + 1,2098\mu - 14,16 \cdot 10^{-5}\alpha^2 - 0,06\mu^2, \quad (8)$$

$$\theta = 0,0255 - 2,5 \cdot 10^{-5}\alpha - 6,04 \cdot 10^{-5}\mu - 2,5 \cdot 10^{-7}\alpha^2 - 1,28 \cdot 10^{-4}\mu^2. \quad (9)$$

На рис. 6 видно, что минимальное значение давления выдавливания  $p/(\sqrt{3}\tau_s)$  достигается для мак-



**Рис. 6.** Результаты расчета параметров выдавливания при начальной пористости  $\theta_3 = 0,1$

а – остаточная пористость; б – давление выдавливания

симальной пористости  $\theta$  и минимальных значений  $\mu$  и  $\alpha$ . Из анализа результатов следует, что при минимальной вытяжке влияние угла конуса матрицы на остаточную пористость выдавленных прутков становится несущественным, при этом давление выдавливания изменяется примерно в 2 раза. С увеличением  $\mu$  пористость резко уменьшается с 2,2 до 1,8 %. При  $\mu = 6$  и  $2\alpha = 100^\circ$  достигается состояние, близкое к беспористому ( $\theta < 1,8$  %), при этом  $p/(\sqrt{3}\tau_s) = 4,8 \div 5,0$ .

При натурном моделировании получали прутки радиусом  $R_2 = 2,5$  мм из заготовок радиусом  $R_0 = 5$  мм, длиной  $L = 20$  мм и пористостью  $\theta_3 = 0,1$  из предварительно спрессованной и спеченной порошкообразной меди. Коэффициент вытяжки  $\mu = 4$ , что соответствует степени деформации 75 %. Угол конуса матрицы  $2\alpha = 60^\circ$ . Выдавливание производили со смазкой заготовки и инструмента стеаратом цинка ( $ZnSt_2$ ), толщина слоя смазки 0,5 мм. В этих условиях измеренное давление выдавливания составило  $p/(\sqrt{3}\tau_s) = 2,7$ , остаточная пористость выдавленных прутков  $\theta = 2,5$  %, что удовлетворительно согласуется с данными, полученными по формулам (8), (9), при этом погрешность в обоих случаях не превышает 15 %.

## Заключение

Осуществлено математическое и натурное моделирование процесса полунепрерывного выдавливания заготовок из пористой меди. Для решения поставленной задачи в пакете «Abaqus» применена специальная техника построения сетки конечных элементов. Для характеристики стадий цикла рассматриваемого процесса приведена зависимость давления выдавливания от перемещения пуансона при различных углах конуса матрицы. Исследован

механизм изменения пористости по сечению заготовки на различных стадиях процесса. Получены зависимости параметров процесса выдавливания  $\theta$  и  $p/(\sqrt{3}\tau_s)$  от угла конуса матрицы  $2\alpha$  и вытяжки  $\mu$ .

*Работа выполнена в рамках междисциплинарного проекта УрО РАН №12-М-13-2028 с использованием оборудования ЦКП «Урал-М».*

## Литература

1. Перлин И.Л., Райтбарг Л.Х. Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975.
2. Залазинский А.Г. Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. Екатеринбург: УрО РАН, 2000.
3. Колмогоров В.Л., Орлов С.И., Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая подача смазки. М.: Металлургия, 1975.
4. Пат. 2440864 (РФ). Способ полунепрерывного гидромеханического прессования заготовок / В.Л. Колмогоров, А.Г. Залазинский, Д.И. Крючков, О.Ю. Агапиева. 2012.
5. Ивлев Д.Д. Теория идеальной пластичности. М.: Наука, 1966.
6. Грин Р.Дж. // Механика: Сб. переводов. 1973. № 4. С. 109.
7. Друянов Б.А. Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989.
8. Логинов Ю.Н. // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1997. № 11. С. 38.
9. Сегал В.М. // Порошк. металлургия. 1981. № 9. С. 15.
10. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971.
11. Gurson A.L. // J. Eng. Mater. Technol. 1977. Vol. 99. P. 2.
12. Tvergaard V. // Int. J. Fract. Mech. 1981. Vol. 17. P. 389.
13. Corigliano A., Mariani S., Orsatti B. // Ibid. 2000. Vol. 104. P. 349.
14. User's manual Abaqus/CAE. Vers. 6.10, 2010.