

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОСАДКЕ НЕОДНОРОДНОГО МАТЕРИАЛА В ЗАКРЫТОМ ШТАМПЕ*

Н.А. БОГДАНОВА, аспирант

В.В. ЧЕРНОМАС, доктор техн. наук, доцент

А.А. СОСНИН, канд. техн. наук

(ИМиМ ДВО РАН, г. Комсомольск-на-Амуре)

Поступила 5 августа 2013 года

Рецензирование 25 августа 2013 года

Принята к печати 6 сентября 2013 года

Богданова Н.А. – 681005, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Metallургов, 1,
Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН,
e-mail: joyful289@inbox.ru

Разработана методика, позволяющая зафиксировать изменение геометрических параметров неоднородного плоского образца в процессе его уплотнения в закрытой матрице при различных скоростях деформирования и условиях контакта в системе «образец – матрица – пуансон». Представлены кривые, характеризующие изменение геометрических параметров пор и углов поворотов наибольших осей эллипсов, вписанных в поры, а также движение фронта уплотнения и распределение усилий в процессе деформирования образцов. Получены линейные модели, описывающие характер изменения пор и энергосиловых характеристик процесса уплотнения. Представлены данные моделирования в программной среде «Q Form 3D» процесса осадки неоднородного плоского образца в закрытой матрице. Приведен анализ и сравнение результатов численного эксперимента с данными натурального эксперимента, полученными при физическом моделировании.

Ключевые слова: осадка, деформация, фронт уплотнения, пористый плоский образец.

Введение

Современный этап развития материаловедения характеризуется появлением новых конструкционных материалов, физико-механические, эксплуатационные и технологические свойства которых значительно отличаются от традиционных материалов, применяемых в машиностроении. Выбор и разработка того или иного технологического процесса формирования изделий из конструкционных материалов (литье, обработка материалов давлением и резанием, порошковая металлургия и т. д.) напрямую связаны с определенными значениями (показателями) этих свойств с учетом экономической эффективности каждого из технологических процессов, которые в конечном итоге и определяют выбор того или иного способа для формообразования изделий. Одним из наиболее распространенных способов получения фасонных изделий из металлов и сплавов для нужд машиностроительной отрасли производства являются способы получения изделий методами литья и методами пластической деформации материала. Од-

нако комплекс свойств, которыми обладают новые материалы (например: пластические свойства – для технологий обработки металлов давлением; жидкотекучесть и склонность к ликвации – для технологий литейного производства), не всегда удовлетворяют требованиям традиционных технологий формообразования, что является сдерживающим фактором в широком применении данных материалов.

Поиск способов формирования изделий методами пластической деформации из таких материалов и повышение эффективности существующих процессов формообразования из традиционных конструкционных материалов в мировой практике ведется по нескольким направлениям. Среди этих направлений можно выделить: формирование изделий из материалов в твердожидком состоянии [1–6] и получение изделий из неоднородных, обычно пористых, материалов (аналог методов порошковой металлургии) [7–11].

Основной особенностью указанных процессов является то, что материал деформируемой заготовки, в отличие от традиционных процессов обработки ма-

* Работа выполнена при поддержке грантов 12-I-ОЭМПУ-06 и 12-I-П25-02.

териалов давлением, имеет определенные значения исходной пористости. В первом случае материал заготовки представляет собой определенным образом структурированный каркас из твердого (твердофазного) материала, внутреннее пространство которого заполнено расплавленным металлом (жидкой фазой). Во втором случае – твердофазный материал с открытой, закрытой или смешанной газовой пористостью (вспененный материал).

Одними из основных требований, предъявляемых к процессам получения металлоизделий из таких заготовок, являются отсутствие (минимизация) пористости в конечном изделии и снижение удельных энергетических затрат на сам процесс деформирования. В связи с этим целью данного исследования является определение влияния скорости деформирования и условий контакта в системе «образец – матрица – пуансон» на характер уплотнения неоднородного материала с помощью физического моделирования процесса осадки пористого плоского образца в закрытой матрице, а также анализ и сравнение результатов численного эксперимента, полученных в программной среде «Q Form 3D» с данными натурального эксперимента, образовавшимися в результате физического моделирования.

1. Методика проведения исследований

Для физического моделирования процесса осадки пористого плоского образца была разработана методика, позволяющая зафиксировать динамику его уплотнения в закрытой матрице. В качестве материала для изготовления образцов использовали скульптурный пластилин «Люкс» по ТУ 2389–011–02954519–99. Соотношение размеров образца 2:1:0,15 (140×70×10,5 мм) выбирали исходя из условий моделирования плоской деформации [12].

Неоднородность образца (открытую пористость, равную 0,25) задавали с помощью равномерно распределенных по фронтальной плоскости отверстий диаметром 4 мм (рис. 1).

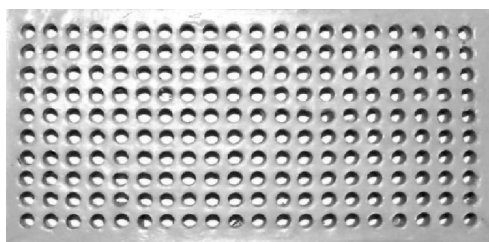


Рис. 1. Внешний вид образца

Сборную закрытую матрицу выполняли из прозрачного материала (оргстекло марки ТОСН по ГОСТ 17622–72) с толщиной стенки 10 мм. Фиксирование процесса уплотнения производили высоко-

скоростной видеосъемкой через переднюю фронтальную стенку матрицы, подсвеченную контрольным светом через заднюю фронтальную стенку для исключения образования контурных теней и бликов на кадрах видеозаписи. По раскадровке видеосъемки, произведенной с помощью программного пакета «Adobe Premiere Pro CS6», в дальнейшем оценивали изменение геометрических размеров пор и их взаимного расположения в процессе деформации (площадь поперечного сечения, положение центров отверстий в декартовых координатах, величины главных осей деформированных отверстий и углы поворотов наибольших главных осей относительно вертикали).

Измерение и запись величин перемещений пуансона и значений силовых параметров процесса уплотнения образца проводили с помощью блока автоматической регистрации данных на экспериментальном стенде, оборудованном на базе испытательной электромеханической машины Instron 3382 (рис. 2).

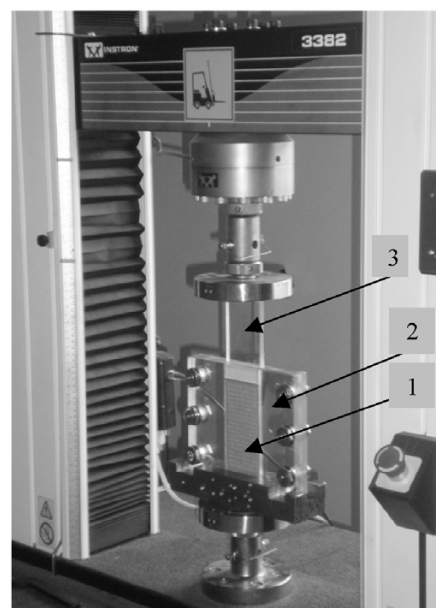


Рис. 2. Стенд для проведения испытаний:

1 – образец; 2 – матрица; 3 – пуансон

Условия контакта поверхностей образца со стенками закрытой матрицы и плоскостью пуансона оценивали через идеальные значения фактора трения (0 и 1), максимальное значение которого соответствовало идеальному контакту, а минимальное – контакту через слой силиконовой смазки по ТУ 2384–032–56751830–2007. Идеализация условий контакта при физическом моделировании связана с двухуровневым изменением независимого фактора. Его фактические значения могут быть рассчитаны с использованием закона трения Зибеля с уточнениями, характеризующими свойства материала и схему его деформирования [13].

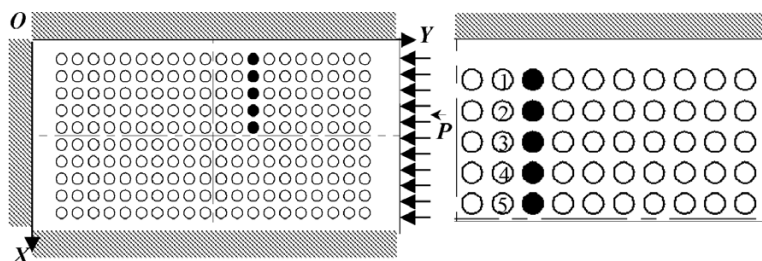


Рис. 3. Схема для оценки изменения геометрических параметров отверстий

Скорость деформирования при проведении испытаний выбрали из рекомендуемого интервала скоростей деформирования, характерных для обработки материалов давлением, и устанавливали на двух уровнях – минимальной (0,5 мм/с) и максимальной (5 мм/с) с помощью управления скоростью перемещения подвижной цапги узла нагружения испытательной машины Instron 3382.

Откликами эксперимента являлись данные в виде кривой в координатах «нагрузка – перемещение», синхронизированные с раскадровой видеосъемки, а также изменение геометрических размеров пор и их взаимное расположение.

Связь значений отклика с независимыми факторами (скоростью деформирования, величиной фактора трения и степенью деформации (0,03...0,3)) устанавливали с помощью линейных моделей, построенных на основе статистической обработки экспериментальных данных, полученных по плану полного факторного эксперимента типа 2^x .

Экспериментальные данные изменения геометрических параметров пор (отверстий) и их взаимного расположения фиксировали для рядов отверстий, расположенных вблизи продольной оси симметрии образцов по схеме, представленной на рис. 3. При этом точка отсчета (центр координат), относительно которой определяли линейные смещения центров анализируемых пор (на рис. 3 зачернены и обозначены цифрами) в направлении осей OX и OY , находилась в верхнем левом углу образца. Угловые отклонения наибольших осей деформированных пор отсчитывали относительно оси OY .

Изображения, полученные при раскадровке видеосъемки с шагом, кратным перемещению пуансона, масштабировали и в среде программного пакета Image-Pro. Plus, производили измерения указанных выше геометрических параметров с точностью, равной 0,01 мм по линейным размерам и 0,1 градуса по угловым размерам.

На рис. 4 представлена схема измерения геометрических параметров пор. В контуры исходных пор (рис. 4, а) вписывалась окружность диаметром $d_0 = l_{\min} = l_{\max}$, где $l_{\min}$ – длина минимальной оси эллипса; $l_{\max}$ – длина максимальной оси эллипса. Принимали, что направление максимальной оси эллипса исходных отверстий совпадает с направлением оси OX . Отсчет угла поворота максимальной оси эллипса α производили от направления оси OY (для исходных отверстий $\alpha_0 = 90^\circ$).

Относительные отклонения размеров осей эллипсов и изменение площадей пор (ΔS) определяли из соотношений: $\Delta l_{\min} = d_0 - l_{\min}$; $\Delta l_{\max} = l_{\max} - d_0$; $\Delta S = (S - S_0)/S \cdot 100\%$, где S_0 и S – соответственно площади вписанных в поры эллипсов до и после деформации.

Для моделирования процесса деформации необходимо задать свойства материала образцов (скульптурный пластилин «Люкс»). С целью получения сведений о механических свойствах были проведены испытания на сжатие предварительно изготовленных цилиндрических образцов. Высота h и диаметр d образцов подбирались в соответствии с ГОСТ 4651–82 и составляли $h = 30$ мм и $d = 20$ мм. Испытания проводили с помощью электромеханической испытательной машины INSTRON 3382 при скорости испытания $v_0 = 0,5$ мм/с. По результатам испытаний цилиндрических образцов по ГОСТ 9550–81 определялся модуль Юнга и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$.

Для численного моделирования процесса осадки неоднородного плоского образца использовалась программная среда «Q Form 3D». Конфигурацию исследуемого объекта (заготовки) и формообразующего инструмента создавали в программной среде «T-Flex».

При разработке конфигурации формообразующего инструмента (матрицы и пуансона) выбирали посадку с зазором, равным 0,05 мм, что соответствовало реальной посадке пуансона в эксперименталь-

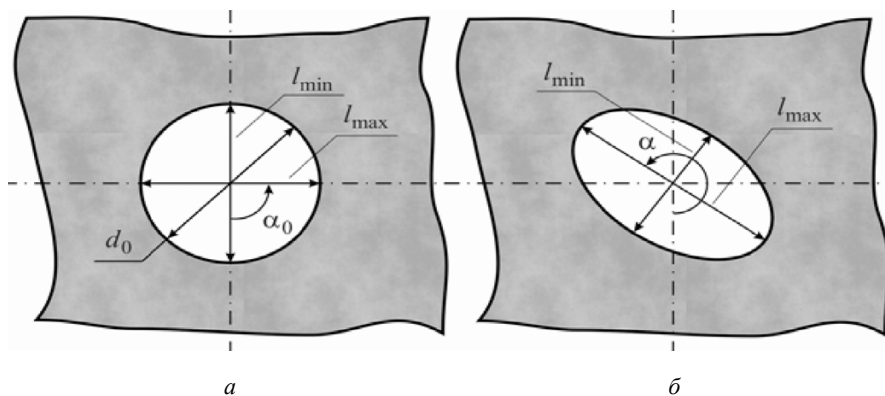


Рис. 4. Схема определения геометрических параметров пор:

а – до деформации; б – после деформации

ной матрице, используемой при физическом моделировании процесса. Моделировался процесс холодной объемной штамповки на гидравлическом прессе с максимальным усилием 50 МН. Свойства материала образца задавали в виде функции, полученной в результате аппроксимации экспериментальных данных испытаний материала образцов на сжатие.

В качестве анализируемых изображений использовали изображения, полученные в ходе расчета по шагам, соответствующим степеням деформации исходной заготовки: $\varepsilon_1 = 0,03$, $\varepsilon_2 = 0,1$, $\varepsilon_3 = 0,17$, $\varepsilon_4 = 0,25$.

2. Результаты исследований

Физическое моделирование процесса деформирования неоднородного материала проводили для четырех серий экспериментов, отличающихся между собой скоростью деформирования и условиями контакта образцов со стенками матрицы и пуансоном (табл. 1).

Таблица 1

Номер серии эксперимента	Скорость деформирования, мм/с	Фактор трения
1	0,5	1
2	5	1
3	0,5	0
4	5	0

На рис. 5 представлены кривые, характеризующие перемещение центров ряда пор (отверстия 1–5) в направлении осей OX и OY в процессе деформирования образцов для четырех серий экспериментов.

Степень деформации образцов ε_i при перемещении пуансона на 0, 5, 15, 25 и 35 мм соответственно составляла $\varepsilon_0 = 0$, $\varepsilon_1 = 0,03$, $\varepsilon_2 = 0,1$, $\varepsilon_3 = 0,17$, $\varepsilon_4 = 0,25$. Указанные кривые, опорные точки которых соответствуют средним значениям для трех экспериментов в каждой из серий, характеризуют движение фронта уплотнения в процессе деформирования образца. Начальное (до деформации) расположение центров пор описывается для каждой из серии экспериментов кривыми ε_0 , остальные кривые определяют динамику процесса уплотнения материала образца до конечной степени деформации ε_4 . Характер перемещения центров пор свидетельствует о влиянии фактора трения и скорости деформи-

рования на формирование фронта уплотнения материала в процессе осадки, причем оно наиболее ярко выражено при максимальной степени деформации. На начальных стадиях деформирования смещение центров рядов пор по координате Y имеет практически линейный характер. При степенях деформации больше 0,1 (ε_2) изменяются условия контакта образца со стенками матрицы, связанные с уплотнением материала в верхней части образца. Это приводит к увеличению сопротивления деформации материала в этой области, что подтверждается уменьшением смещения центров пор вблизи контактной поверхности (отверстия 1, 2) по сравнению с остальными (отверстия 3–5). Фронт уплотнения приобретает параболический характер. С увеличением скорости деформирования в условиях идеального контакта образца со стенками матрицы (рис. 5, а, б) характер фронта уплотнения приобретает более ярко выраженный параболический характер с вершиной параболы, соответствующей $X(\varepsilon_4) = 68,1$ мм. В условиях контакта через слой силиконовой смазки наблюдается аналогичная картина (рис. 5, в, г). Вершина параболы соответствует значению $X(\varepsilon_4) = 67,4$ мм.

Процесс осадки образцов в зависимости от условий трения на контактных поверхностях и скорости деформирования характеризуется различным распределением усилий, определяющих энергосиловые затраты на процесс деформирования. Распределение усилий деформирования для различных серий экспериментов представлено на рис. 6.

Условия идеального контакта образца со стенками матрицы характеризуются более высокими энергетическими затратами на процесс деформирования

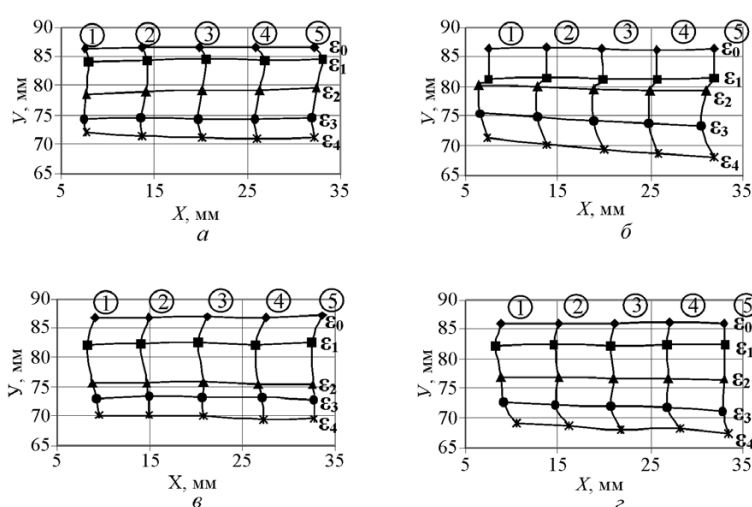


Рис. 5. Перемещение центров пор образцов в процессе деформации по сериям экспериментов:

а – 1-я серия, б – 2-я серия, в – 3-я серия, г – 4-я серия; ①–⑤ номера отверстий; ε_i – степень деформации

Таблица 2

Степень деформации	Номер серии*			
	Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4
ε_1	0,74/1,75	0/0	0,6/1,5	0/0
ε_2	0,25/1,34	0,92/0,85	2,01/1,48	1,13/1,89
ε_3	0,39/1,73	0/0,1	2,28/1,72	1,49/3,09
ε_4	3,56/3,3	0,95/1,85	0,72/2,18	0,65/1,65

* в числителе $\Delta l_{\max}$, мм; в знаменателе $\Delta l_{\min}$, мм

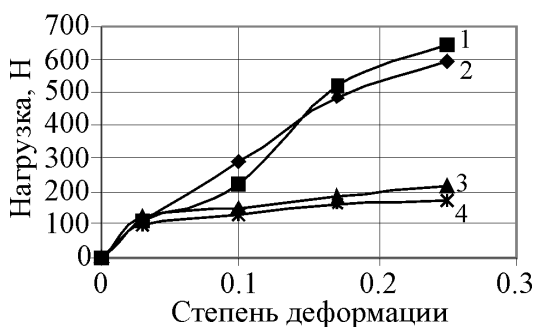


Рис. 6. Распределение усилий деформирования для различных серий экспериментов:

1 – первая серия; 2 – вторая серия; 3 – третья серия;
4 – четвертая серия

(рис. 6, кривые 1, 2), чем при деформировании со смазкой (рис. 6, кривые 3, 4). Максимальное усилие, возникающее в конце процесса деформирования составляет 645,95 Н и соответствует 1-й серии экспериментов. Минимальное усилие, возникающее в конце процесса деформирования, составляет 176,46 Н и соответствует 4-й серии экспериментов. Влияние скорости деформирования на сопротивление деформации зависит от условий контакта образца со стенками матрицы. При значениях фактора трения $f = 1$ сопротивление деформации с увеличением скорости уменьшается, что приводит к снижению усилия с 645,95 Н до 593 Н, а при значении фактора трения $f = 0$ – к уменьшению усилия с 216 Н до 176,46 Н.

При проведении серий экспериментов было установлено, что наибольшему формоизменению в процессе деформации подвержена пора, находящаяся вблизи боковой контактной поверхности образца со стенкой матрицы – отверстие № 1 (рис. 3).

В табл. 2 представлены результаты изменения размеров осей эллипсов $\Delta l_{\min}$ и $\Delta l_{\max}$ в процессе деформирования поры, характеризующие изменение ее геометрических параметров. Аналогичные данные получены для остальных рассматриваемых пор.

На рис. 7 показано изменение углов поворота наибольших осей эллипсов, вписанных в деформированные поры для четырех серий экспериментов. Представленные данные совместно с данными табл. 2 характеризуют формоизменение пор в процессе деформирования.

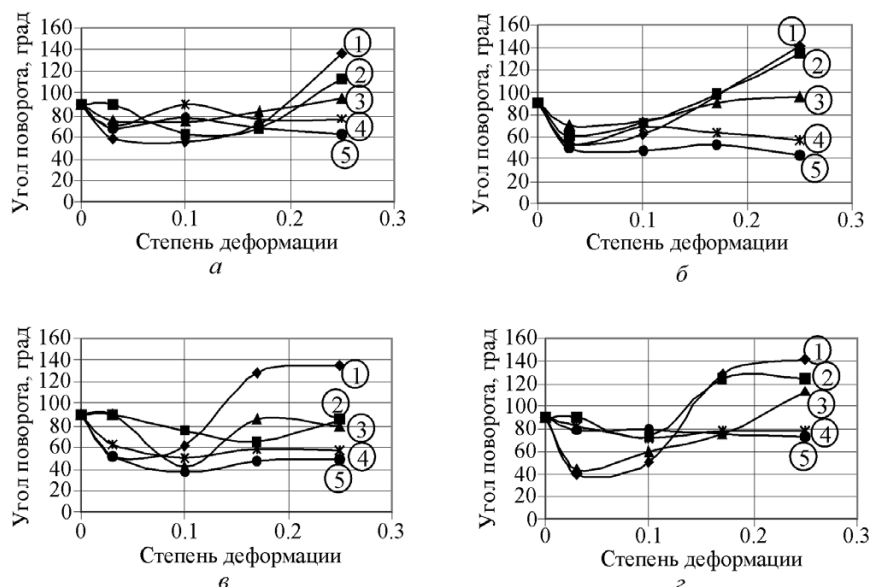


Рис. 7. Изменение углов поворотов наибольших осей эллипсов, вписанных в поры в процессе деформации по сериям экспериментов:

а – 1-я серия; б – 2-я серия; в – 3-я серия; г – 4-я серия; ①–⑤ номера отверстий

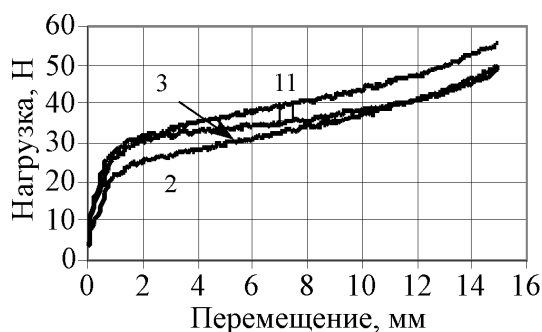


Рис. 8. График зависимостей нагрузки P от перемещения верхнего торца образца (Δl):

1, 2, 3 – номера образцов

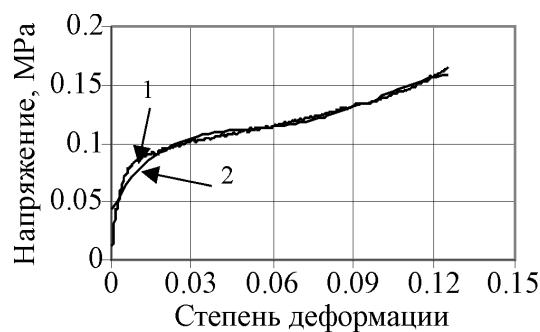


Рис. 9. Кривая « σ – ϵ »:

1 – экспериментальные данные;
2 – аппроксимирующая кривая

деформирования приводит к уменьшению $\Delta l_{\max}$, что связано с увеличением сопротивления деформации. В результате испытания образцов из скульптурного пластилина «Люкс» получены данные по перемещениям верхнего торца образцов и соответствующим нагрузкам (рис. 8). Усредняя данные по результатам испытания трех образцов, получили диаграмму сжатия материала в координатах « σ – ϵ » (рис. 9), исходя из которой был определен условный предел текучести материала образцов $\sigma_{0,2} = 0,047$ МПа, модуль Юнга который составляет 5,46 МПа.

Экспериментальные данные $\sigma = f(\epsilon)$ были аппроксимированы полиномом четвертой степени, описывающим свойства материала:

$$\sigma = 0,04 + 4,09 \cdot \epsilon - 92,81 \cdot \epsilon^2 + 921,02 \cdot \epsilon^3 - 3049,12 \cdot \epsilon^4, \quad (1)$$

где ϵ – степень деформации. Средняя относительная ошибка аппроксимации составляет 2,2 %, коэффициент корреляции $R^2 = 0,972$.

На рис. 10 и 11 в качестве примера представлены изображения, полученные в результате моделирования в программной среде «Q Form 3D» процесса осадки неоднородной пластины для первой ($\nu = 0,5$ мм/с, $f = 1$) и третьей ($\nu = 0,5$ мм/с, $f = 0$) серии экспериментов.

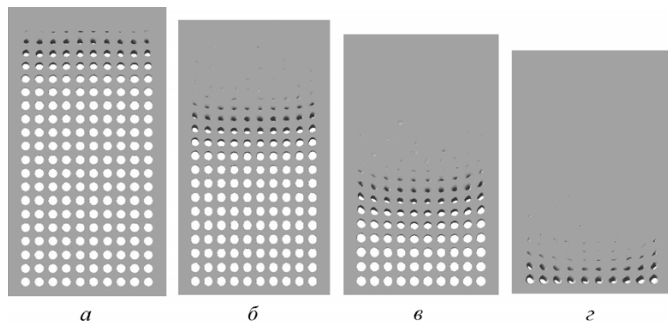


Рис. 10. Изображения расчетных моделей «Q-Form» при различных степенях деформации ($f=1$):

a – $\epsilon_1 = 0,03$; б – $\epsilon_2 = 0,1$; в – $\epsilon_3 = 0,17$; г – $\epsilon_4 = 0,25$

При осадке образца в условиях идеального контакта (рис. 10) ярко выражено влияние контактного трения на процесс деформирования. При степенях деформации свыше 0,03 формируется фронт уплотнения, имеющий параболический вид. Отверстия (поры), расположенные вблизи контактных поверхностей образца со стенками матрицы, деформируются наиболее интенсивно и имеют форму эллипсов с наибольшей осью, направленной под углом к оси симметрии образца. Анализируемый ряд отверстий полностью «закрывался» при степенях деформации свыше 0,1.

При изменении условий контакта образцов со стенками матрицы (рис. 11) картина деформирования кардинальным образом меняется. Деформирование материала образцов происходит без образования фронта уплотнения и характеризуется равномерным уменьшением диаметров пор по всей высоте образца без искажения их геометрии (отсутствует эллипсоидность пор).

На рис. 12 представлены кривые, описывающие распределение усилий при деформировании образцов в расчетном эксперименте.

С изменением условий контакта между образцами и стенками матрицы усилия деформирования су-

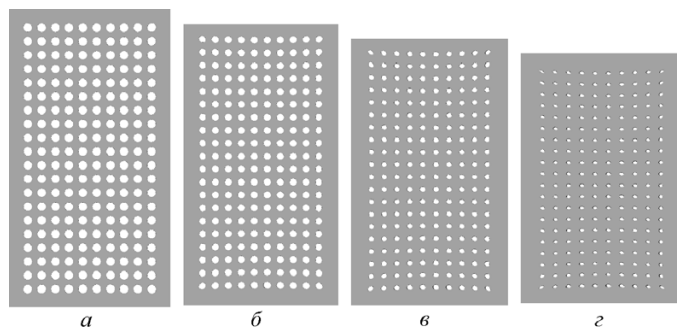


Рис. 11. Изображения расчетных моделей «Q-Form» при различных степенях деформации ($f=0$):

a – $\epsilon_1 = 0,03$; б – $\epsilon_2 = 0,1$; в – $\epsilon_3 = 0,17$; г – $\epsilon_4 = 0,25$

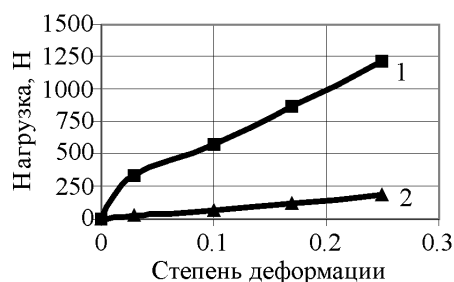


Рис. 12. Кривые расчетных нагрузок:

1 – нагрузка при $f=1$; 2 – нагрузка при $f=0$

щественно различаются между собой. При $f=1$ максимальное усилие в конце цикла осадки ($\varepsilon_4 = 0,25$) составляет 1210 Н, а при $f=0$ – в 6,7 раза меньше (180 Н).

Аналогичные данные были получены и для второй и четвертой серии экспериментов.

3. Обсуждение результатов

Из представленных на рис. 5–7 и табл. 2 результатов экспериментальных исследований видно, что однозначно сделать вывод о преимущественном влиянии того или иного фактора на процесс достаточно сложно. Для описания совместного влияния всех факторов на поведение материала образца при его осадке был реализован полный факторный эксперимент типа 2^3 . В табл. 3 представлены данные откликов эксперимента, полученные после обработки всех серий экспериментов на примере эволюции поры (отверстия) № 1 (рис. 3).

Таблица 3

№ п/п	Значения факторов			Значения откликов				
	ε	v , мм/с	f	α , град	$\Delta l_{\max}$, мм	$\Delta l_{\min}$, мм	ΔS , %	P , Н
1	0,03	0,5	0	58,4	0	0	0	96
2	0,25	0,5	0	135,8	0,72	2,18	23,31	176,46
3	0,03	5	0	54,7	0,60	1,5	27,10	122,01
4	0,25	5	0	140,9	0,65	1,65	1,77	216,26
5	0,03	0,5	1	52,1	0,74	1,75	29,49	108,18
6	0,25	0,5	1	134,4	3,56	3,30	84,72	593,31
7	0,03	5	1	39,4	0	0	0	108,79
8	0,25	5	1	140,7	0,95	1,85	11,24	645,95

После статистической обработки результатов эксперимента методом наименьших квадратов в программной среде «Statan» были получены линейные модели в виде уравнений регрессии следующего вида:

$$\alpha = 50,4 + 333,2\varepsilon - 1,8v - 9,8f + 14\varepsilon v + 45,5\varepsilon f - 0,9vf; \quad (2)$$

$$\Delta l_{\max} = 0,6 + 0,2\varepsilon + 9,9\varepsilon v + 45,5\varepsilon f - 0,3vf; \quad (3)$$

$$\Delta l_{\min} = 1 + 3,5\varepsilon + 9,9\varepsilon v + 6\varepsilon f - 0,3vf; \quad (4)$$

$$\Delta S = -0,6 + 124,1\varepsilon + 7,1v + 29,7f - 46,8\varepsilon v + 155,7\varepsilon f - 12,1vf; \quad (5)$$

$$P = 90,2 + 302,9\varepsilon + 2,5v - 55f + 34,3\varepsilon v + 1931\varepsilon f - 1,6vf. \quad (6)$$

Область определения значений факторов, входящих в уравнения (2)–(6):

$$\varepsilon = [0,03; 0,25]; v = [0,5; 5]; f = [0; 1].$$

Адекватность полученных линейных моделей оценивали по критерию Фишера ($F_{\text{табл}} \geq F_{\text{расч}}$), а статистическую значимость коэффициентов уравнений регрессии по критерию Стьюдента ($t_{\text{расч}} \geq t_{\text{табл}}$). Дополнительно анализировали относительную ошибку аппроксимации и коэффициент корреляции. Все полученные уравнения адекватны, статистически незначимые члены уравнений регрессии были исключены. Относительная ошибка аппроксимации не превышала 12 % при коэффициенте корреляции не ниже 0,91 при доверительной вероятности 0,95.

Используя линейные модели (2) – (6) в пределах области определения значений факторов, можно оценить энергосиловые характеристики и проследить эволюцию пор при осадке неоднородного материала.

Единственная функциональная зависимость, которая описывает свойства деформируемого материала и может быть задана в пакете прикладных программ «Q Form 3D», имеет вид

$$\sigma = A\varepsilon^{-m_1}\varepsilon^{m_2}\exp(-m_3\varepsilon)\xi^{m_4}, \quad (7)$$

где θ – температура; ε – степень деформации; ξ – скорость деформации. В связи с этим дополнительно была решена задача по аппроксимации экспериментальных данных этой зависимостью. Так как не имеется данных по температурным показателям процесса деформации скульптурного пластилина, то принимали, что $m_1 = 0$, а коэффициенты m_2, m_3, m_4 и A находили путем минимизации функционала метода наименьших квадратов [14]. В результате получили зависимость

$$\sigma = 2,11\varepsilon^{0,39}\exp(-4,1\varepsilon)\xi^{0,56}. \quad (8)$$

Поскольку средняя относительная ошибка аппроксимации функции (8) не превышает 2,4 % при степенях деформирования до 0,25, то ее можно использовать в программной среде «Q Form 3D» для описания свойств деформируемого материала.

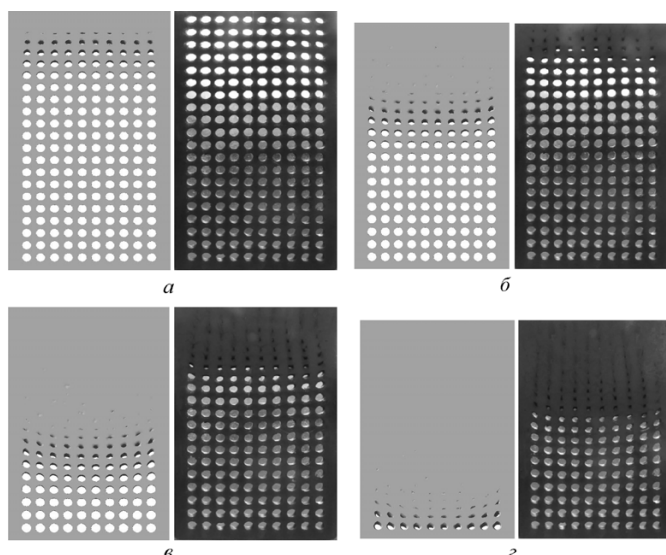


Рис. 13. Сравнение изображений экспериментальных образцов с расчетными моделями Q-Form при различных степенях деформации ($f=1$):

$$a - \varepsilon_1 = 0,03; б - \varepsilon_2 = 0,1; в - \varepsilon_3 = 0,17; г - \varepsilon_4 = 0,25$$

На рис. 13 и 14 представлены результаты сравнения расчетных моделей, полученных в программной среде «Q Form 3D» с данными физического моделирования.

При максимальном значении фактора трения (рис. 13) при физическом моделировании наблюдали формирование ярко выраженного фронта уплотнения материала при степенях деформации свыше 0,1, в то время как в расчетной модели он формируется значительно раньше ($\varepsilon \geq 0,03$). Искажение геометрических параметров пор анализируемого ряда по окончании цикла осадки в эксперименте ($\varepsilon_4 = 0,25$) характерно для степени деформации 0,03 в расчетной модели.

При минимальном значении фактора трения (рис. 14) различия становятся более очевидными.

В экспериментальных образцах наблюдается наличие четкого фронта уплотнения материала, который в расчетной модели отсутствует.

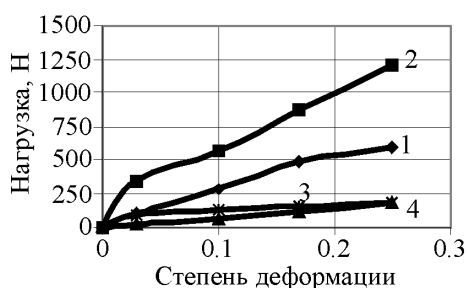


Рис. 15. Кривые расчетных и экспериментальных нагрузок:

1 – экспериментальная нагрузка при $f=1$; 2 – расчетная нагрузка при $f=1$; 3 – экспериментальная нагрузка при $f=0$; 4 – расчетная нагрузка при $f=0$

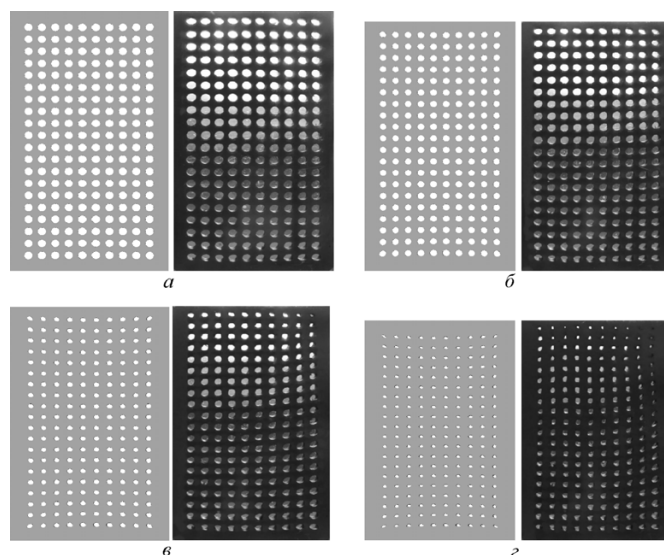


Рис. 14. Сравнение изображений экспериментальных образцов с расчетными моделями Q-Form при различных степенях деформации ($f=0$):

$$a - \varepsilon_1 = 0,03; б - \varepsilon_2 = 0,1; в - \varepsilon_3 = 0,17; г - \varepsilon_4 = 0,25$$

Поскольку изображения, полученные с использованием расчетных моделей по шагам деформирования, существенно отличаются от изображений, полученных в результате физического моделирования, то анализ изменения геометрических параметров пор для них не проводили.

Сравнение результатов распределения усилий в процессе деформирования (рис. 15) показывает, что расчетные значения усилия в конце цикла обжатия превышают в 2 раза (соответственно 1210 Н и 593 Н) экспериментальные значения при факторе трения, равном 1, и практически совпадают при факторе трения, равном 0 (соответственно 180 Н и 176 Н).

Выводы

В результате экспериментального исследования процесса осадки неоднородного материала в закрытой матрице получены линейные модели, описывающие формоизменение пор и распределение усилий в зависимости от фактора трения, скорости деформирования и степени деформации. Предложена методика оценки изменения геометрических параметров пор в процессе деформирования, позволяющая определить фронт уплотнения материала. Из испытаний материала на сжатие предложены три варианта функции с той или иной точностью, описывающие свойства деформируемого материала. Полученные экспериментальные данные использованы для построения модели, описывающей деформацию неоднородной среды с учетом сжимаемости материала. В результате сравнения данных физического и численного моделирования процесса осадки неоднород-

ного материала в закрытой матрице можно сделать вывод о некорректности, полученной в программной среде «Q Form 3D» модели. Наиболее наглядно это демонстрируется при $f = 0$. Полученная расчетная модель близка к схемам деформирования образцов в условиях всестороннего сжатия и неадекватна данным, полученным при физическом моделировании процесса. Очевидно, что для расчетного моделирования процесса деформирования неоднородных материалов необходимо уточнение параметров модели с учетом сжимаемости неоднородного материала в процессе его деформирования.

Список литературы

1. Семенов Б.И., Куштаров К.М. Производство изделий из металла в твердожидком состоянии. Новые промышленные технологии. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 223 с.
2. Тиксоштамповка и тиксолитье – современные технологии формообразования алюминиевых и других сплавов в твердожидком состоянии / Б.И. Семенов, Ю.А. Бочаров, К.М. Куштаров, Ю.А. Гладков, Л.В. Хижнякова // Технология легких сплавов. – 2010. – № 1. – С. 129–150.
3. Бочаров Ю.А., Хижнякова Л.В. Параметры тиксоштамповки осесимметричных поковок из алюминиевого сплава А356 // Заготовительные производства в машиностроении. – 2008. – № 10. – С. 36–40.
4. Бочаров Ю.А., Койдан И.М. Взаимное влияние температуры нагрева заготовки и скорости деформирования в тиксотехнологиях // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. – № 10. – С. 69–74.
5. Тиксоформинг высокопрочных сплавов Al–Zn–Mg–Cu / Т.Б. Нго, Н.А. Джиндо, А.Б. Семенов, Б.И. Семенов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2012. – СВ-3. – С. 148–165.
6. Иванова Е.В., Тагиров Д.В., Кайбышев Р.О. Влияние жидкофазного горячего изостатического прессования на свойства литых алюминиевых сплавов. Часть 1. Структура и свойства сплава АК7Ч, полученного литьем в песчаные формы // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 2. – С. 11–17.
7. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Уплотнение, консолидация и разрушение пористых материалов. – М.: Физматлит, 2009. – 265 с.
8. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Демин В.А. Пластическая деформация пористых материалов. – М.: МГИУ, 2008. – 276 с.
9. Шестаков Н.А., Субич В.Н., Власов Д.А. Расчетный метод построения истинных кривых упрочнения пористых и композиционных материалов // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2010. – № 10. – С. 15–20.
10. Исследование уплотнения при деформации пористых материалов / Н.А. Шестаков, В.Н. Субич, А.Е. Максименко, М.В. Лысюк // Известия ТулГУ. Серия. Технические науки. Вып. 3 (Ч. 1). – 2011. – С. 440–448.
11. Власов А.В., Субич В.Н., Шестаков Н.А. Моделирование механических свойств пористых и композитных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. – 2010. – № 3. – С. 31–35.
12. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. – М.: Наука, 1969. – 420 с.
13. Контактное трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов, В.Л. Колмогоров, С.П. Буркин, Б.Р. Картак, Ю.В. Ашпур, Ю.И. Спасский. – М.: Металлургия, 1976. – 416 с.
14. Севастьянов Г.М. Об одном способе задания определяющих зависимостей «напряжения – скорости деформаций» в условиях активного пластического течения по опытным данным // Дальневосточный математический журнал. – 2011. – Том 11, № 1. – С. 88–92.

Obработка metallo

N 3 (60), July–September 2013, Pages 9-18

Simulation of heterogeneous material deformation process during shortening in the closed die

N.A. Bogdanova, V.V. Chernomas, A.A. Sosnin

Institute of Machinery and Metallurgy, Metallurgov st., 1,
Komsomolsk-on-Amur, 681005, Russia
E-mail: joyful289@inbox.ru

Abstract

The technique allowing to detect a change of geometrical parameters of the heterogeneous plane sample, in the course of its compression in the closed matrix at various speeds of deformation and contact conditions in system «a sample – a matrix – a punch» is developed. The curves, describing change of pores geometrical parameters and angles of rotation greatest axes of ellipse inscribed in the pores, and also movement of the compression front and force distribution in the deformation process of samples are presented. The linear models describing the behavior of the pores and energy-power characteristics of the compression process are found. The data of modeling in software environment «Q Form 3D» of the compression process

of the heterogeneous plane sample in the closed die is presented. The analysis and comparison of the results numerical experiment with the data of natural experiment, obtained by physical modeling, is submitted.

Keywords: compression, deformation, compression front, heterogeneous plane sample

References

1. Semenov B.I., Kushtarov K.M. *Proizvodstvo izdelij iz metalla v tverdozhidkom sostojanii. Novye promyshlennye tehnologii* (Manufacture of metal in the solid-liquid state. New industrial technology). Moscow, BMSTU, 2010. 223 p.
2. Semjonov B.I., Bocharov Yu.A., Kushtarov K.M., Gladkov Yu.A., Hizhnjakova L.V. *Tehnologija legkih splavov*, 2010, no. 1, pp. 129-150.
3. Bocharov Yu.A., Hizhnjakova L.V. *Parametry tiksoštampovki osesimmetrichnyh pokovok iz aljuminievogo splava A356* [Aluminium alloy A356 thixoforging parameters for axis-symmetric components]. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii - Blanking productions in mechanical engineering*, 2008, no. 10, pp. 36-40.
4. Bocharov Yu.A., Kojdan I.M. *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Mashinostroenie*, 2012, no. 10, pp. 69-74.
5. Ngo T.B., Dzhindo N.A., Semenov A.B., Semenov B.I. *Tiksoforming vysokoprochnykh splavov Al – Zn – Mg – Cu* [Thixoforging high-strength alloy Al – Zn – Mg – Cu]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tehnicheskogo universiteta im. N.Je. Bauman. Serija: Mashinostroenie - Herald of BMSTU. Series "Mechanical engineering"*, 2012. special no. 3, pp. 148-165.
6. Ivanova E.V., Tagirov D.V., Kaibyshev R.O. *Vlijanie zhidkofaznogo go-rjachego izostaticheskogo pressovaniya na svojstva lityh aljuminievych splavov. Chast' I. Struktura i svojstva splava AK7Ch, poluchennogo lit'em v peschanye formy* [Effect of liquid-phase hot isostatic pressing on the properties of cast aluminum alloys. Part 1. Structure and properties of alloy AK7Ch obtained by casting into sand molds]. *Metallovedenie i termicheskaja obrabotka metallov - Metal Science and Heat Treatment*, 2012, no. 2, pp. 11-17.
7. Shestakov N.A., Soubich V.N., Demin V.A. *Uplotnenie, konsolidacija i razrushenie poristykh materialov* (Compaction, consolidation and destruction of porous materials). Moscow, Fizmatlit, 2009. 265 p.
8. Shestakov N.A., Soubich V.N., Demin V.A. *Plasticheskaja deformacija poristykh materialov* (Plastic deformation of porous materials). Moscow, MSIU, 2008. 276 p.
9. Shestakov N.A., Soubich V.N., Vlasov D.A. *Raschetnyj metod postroenija istinnykh krivykh uprochnenija poristykh i kompozicionnykh materialov* [Calculating Technique of Plotting True Curves of Porous and Composite Materials Hardening]. *Kuznechno-shtampovnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*, 2010, no. 10, pp. 15-20.
10. Shestakov N.A., Soubich V.N., Maksimenko A.E., Lysjuk M.V. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tehnicheskie nauki*, 2011, Issue 3, part 1, pp. 440-448.
11. Vlasov A.V., Soubich V.N., Shestakov N.A. *Modelirovanie mehanicheskikh svojstv poristykh i kompozitnykh materialov* (Modelling of mechanical properties of porous and composite materials). *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii - Blanking productions in mechanical engineering*, 2010, no. 3, pp. 31-35.
12. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastichnosti* (Fundamentals of the plasticity theory). Moscow, Nauka, 1969. 420 p.
13. Levanov A.N., Kolmogorov V.L., Burkin S.P., Kartak B.R., Ashpur Yu.V., Spasskij Yu.I. *Kontaknoe trenie v processe obrabotki metallov davleniem* (Contact friction in metal forming processes). Moscow, Metallurgija, 1976. 416 p.
14. Sevast'janov G.M. *Dal'nevostochnyj matematicheskij zhurnal*, 2011, Vol.11, no.1, pp. 88-92.