УДК 539.3
DOI 10.17223/19988621/60/11

Д.В. Янов, А.С. Бодров, Н.В. Пахнутова, С.А. Зелепугин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ МЕДНЫХ ОБРАЗЦОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ НАГРУЖЕНИЯ[1]

Численно моделируется процесс интенсивной пластической деформации образца из меди при динамическом канально-угловом прессовании. В качестве исходных данных использованы экспериментальные значения скорости и давления, действующего на образец. Численные расчеты проводились с помощью модифицированного метода конечных элементов с использованием модели разрушения активного типа. В результате определены значения скорости и давления, действующего на тыльную часть образца, при которых возможно успешное прохождение динамического канально-углового прессования медного образца.

Ключевые слова: *интенсивная пластическая деформация, динамическое канально-угловое прессование, метод конечных элементов.*

Одним из основных направлений в области материаловедения является получение материалов с улучшенными физико-механическими свойствами. На данный момент уровень развития технологий дает возможность получать наноструктурные и ультрамелкозернистые (УМЗ) металлы и сплавы с размером зерна порядка 50–150 нм [1]. Металлы с УМЗ-структурой имеют уникальные свойства и применяются во многих областях науки и техники. Повышенная прочность, хладноломкость, устойчивость к радиации и многие другие характеристики тесно связаны с УМЗ-металлами, но отдельно стоит вопрос о способах получения такой структуры. Широкое развитие получила технология компактирования порошков, в том числе взрывного [2], из дисперсных частиц металла, полученных при помощи газовой конденсации, химического синтеза и т.д. При этом методика компактирования порошков имеет серьезные недостатки, такие, как остаточная пористость, загрязнённость порошков при их подготовке, небольшие размеры конечного изделия.

Активные исследования в области интенсивных пластических деформаций (ИПД) дают возможность взглянуть по-новому на процесс измельчения и образования УМЗ-структуры металла [1]. Известно, что при таких технологических процессах, как прокатка, вытяжка, прессовка, размер зерна металла уменьшается в несколько раз, но границы зерен имеют малоугловую разориентировку, поэтому для получения большеугловых границ зерен используют специальные схемы ИПД: кручение под высоким давлением, равнокальное угловое прессование (РКУП) [1], динамическое канально-угловое прессование (ДКУП) [3].

[1] Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ (проект № 0365-2019-0004) при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-48-700041 р_а).

Работы различных авторов в области интенсивной пластической деформации можно разделить на два направления: экспериментальные исследования процессов ИПД и численное моделирование. Например, в работе [4] представлено исследование особенностей деформирования образцов из меди, легированных цирконием, гафнием и оловом, прошедших ДКУП. Было выявлено, что в процессе динамического прессования образец из сплава циркониевой бронзы, подвергнутый предварительному гомогенизационному отжигу при температуре 800 °С, более устойчив к появлению трещин, чем образец, не прошедший отжиг. При динамическом прессовании образца из сплава гафниевой бронзы, также подвергнутого гомогенизационному отжигу при температуре 800 °С, во всем сечении по плоскости сдвига наблюдаются трещины. То есть в результате легирования медного образца происходит его интенсивное упрочнение в процессе ДКУП и, как следствие, проявляется тенденция к появлению трещин, но в зависимости от легирующей добавки и предварительных технологических операций разрушение образца в процессе ДКУП может быть предотвращено. Также авторами работы [5] подробно изучено изменение микроструктуры и свойств образца из сплава меди с хромом и цирконием при ДКУП. Был выявлен значительный рост механических характеристик сплава после ДКУП, а именно, увеличение микротвердости Cu–0.14Cr–0.04Zr с 700 до 1600 МПа, увеличение предела текучести с 100 до 464 МПа.

В работе [6] представлены результаты численного моделирования процесса РКУП методом сглаженных частиц (SPH) и методом конечных элементов (МКЭ), а также проведен сравнительный анализ двух подходов к решению задачи. Идея применения метода сглаженных частиц к динамическому прессованию связана с тем, что в процессе ИПД конечные элементы в МКЭ подвергается значительным деформациям, в результате чего конечные элементы начинают вытягиваться и вырождаться. В таком случае говорить о сходимости численного решения нельзя. Метод SPH относится к бессеточным методам и лишен такого недостатка, так как модель исследуемой среды состоит из частиц определённого радиуса, взаимодействие между которыми описывается с помощью функции ядра. В работе делается вывод о пригодности метода SPH к описанию процессов интенсивного пластического деформирования.

Авторами [7] исследована структура и механические свойства образца из алюминиевого сплава 1560 после ИПД методом прессования с рифлением. Данный метод ИПД позволяет в несколько раз увеличить механические характеристик легких сплавов за счет изменения зеренной структуры. Особенность такого подхода заключается в том, что обрабатываемые образцы имеют форму в виде лент или пластин. В результате механических испытаний алюминиевого сплава 1560, прошедшего четыре цикла прессования, получено, что микротвердость увеличилась в 2.8 раза и составляет 112 HV, а предел текучести возрос в 1.4 раза и составляет 177 МПа.

В настоящее время большой интерес представляют работы в области численного моделирования микроструктуры материалов. В [8] представлен метод молекулярной динамики, описывающий поведение зеренной структуры в процессе ИПД. В основе метода лежит уравнение Ньютона и потенциал Леннарда – Джонса, описывающий взаимодействие молекул. В двумерной постановке рассмотрено поведение четырехзеренной модели при различных стадиях нагружения: упругая деформация, пластическая деформация и изменение зерен, разгрузка. Было выявлено, что при достижении критических напряжений в четырехзеренной модели возникают дефекты, которые в дальнейшем разрастаются по обширной площади зерна. Также происходят изменения в самой структуре, измельчение и перестройка зерен.

В данной работе рассматривается процесс ДКУП, который является модификаций РКУП. Процесс РКУП проводится при помощи прессового оборудования, при этом приходится неоднократно пропускать металлический образец через пересекающиеся каналы для достижения однородной УМЗ-структуры в объеме образца. В процессе ДКУП вместо пресса используется, как правило, пороховой заряд, вследствие чего происходит быстрый рост давления, действующего на тыльную часть образца, а сам образец может быть разогнан до высоких скоростей. Применение метода ДКУП дает возможность снизить количество проходов образца в несколько раз за счет высоких скоростей деформаций с сохранением пластических свойств материала образца. При этом размеры образцов могут быть достаточно большими. Динамическое канально-угловое прессование применимо ко многим металлам и сплавам, интерметаллидам, конструкционным, функциональным материалам [3, 4], поэтому необходим более глубокий анализ этого технологического процесса со стороны механики деформируемого твердого тела и механики разрушения, в том числе методами математического моделирования.

Целью данной работы является численное моделирование и анализ процесса ДКУП с учетом параметров давления и ускорения, определенных из экспериментов [9], а также определение величины скорости, при которой возможно успешное прохождение образцом пересекающихся каналов. Принципиальным отличием от предыдущих работ в области численного моделирования [10–14] является исследование процесса ДКУП в условиях нагружения, приближенных к реализующимся в экспериментах [9].

Постановка задачи. Выбор экспериментальных значений

Рассматривается задача о движении медного (М1) образца квадратного сечения в процессе ДКУП. Длина образца 65 мм, размеры в сечении 16×16 мм. В начальный момент времени образец находится в вертикальном канале оснастки и имеет начальную скорость υ_0 и давление P_0, действующие на тыльную часть образца. Стенки оснастки считаются абсолютно жесткими.

На рис. 1 изображена схема пересечения каналов оснастки в продольном сечении, наклонная площадка находится под углом 45°, высота наклонной площадки составляет 4 мм.

На рис. 2 изображена кривая, интерполирующая экспериментальные данные изменения во времени давления, действующего на тыльную часть образца [9]. С учетом представленных на рис. 2 экспериментальных результатов вопрос о выборе величины давления, действующего на тыльную часть образца, в качестве начального параметра для расчета процесса прохождения образцом пересечения каналов, является нетривиальным. Из анализа результатов численных расчетов процессов ДКУП [10–14] можно определить продолжительность основной стадии прохождения каналов, составляющей 0.8–1.0 мс. Экспериментальные данные, приведенные на рис. 2, показывают, что в течение данного интервала процесса давление изменяется не столь значительно. Это позволяет выбрать для расчетов постоянную величину давления, осредненную на интервале в 1 мс. На рис. 2 штриховыми вертикальными линиями определен такой интервал, в качестве осредненного давления выбрано значение $P_0 = 310$ МПа.

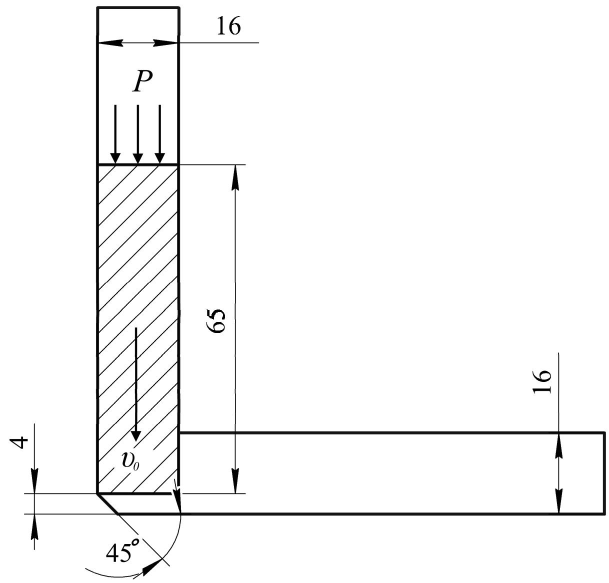

Рис. 1. Постановка задачи, размеры указаны в мм
Fig. 1. Statement of the problem (the sizes are given in mm)

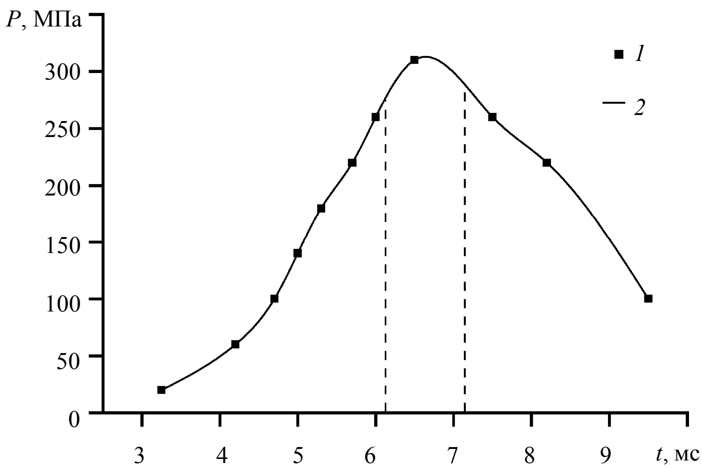

Рис. 2. График зависимости давления от времени.
1 – экспериментальные данные [9], *2* – интерполяционная кривая
Fig. 2. Pressure as a function of time:
1, experimental data from [9] and *2*, interpolation curve

Используя результаты измерений скорости движения образца [9], построена интерполяционная кривая изменения скорости образца во времени (рис. 3). На рис. 3 можно наблюдать практически линейную часть графика в интервале времени 4–10 мс, которую можно аппроксимировать прямой. Вычислив тангенс угла наклона аппроксимирующей прямой, можно определить ускорение образца $2.7 \cdot 10^5$ м/с^2. Определив его ускорение, можно варьировать скорость образца, с которой он начинает прохождение пересечения каналов, в широких пределах 0–1800 м/с (согласно рис. 3) в зависимости от пройденного образцом расстояния по вертикальному каналу до начала процесса ДКУП. Таким образом, на основании экспериментальных данных [9] в данной работе выбраны давление P_0 = 310 МПа, действующее на тыльную поверхность образца в течение всего процесса ДКУП, и интервал изменения начальной скорости образца 0–1800 м/с.

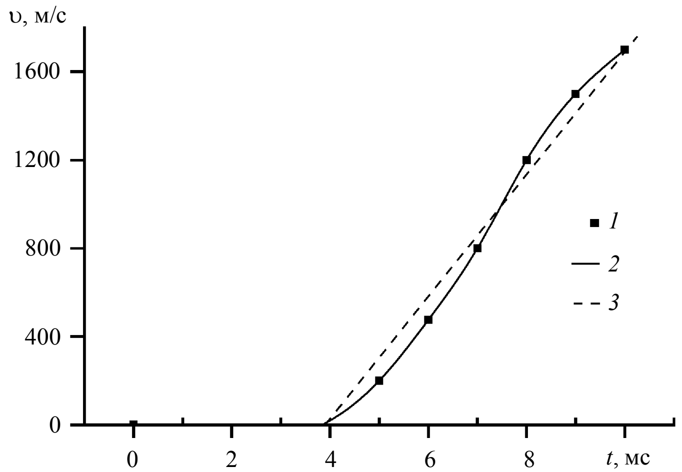

Рис. 3. Скорость движения образца в зависимости от времени:
1 – экспериментальные данные [9], *2* – интерполяционная кривая,
3 – аппроксимирующая прямая
Fig. 3. Velocity of the sample as a function of time: *1*, experimental data from [9],
2, interpolation curve, and *3*, approximating line

Физико-математическая модель

Решение задачи проводилось модифицированным методом конечных элементов в трехмерной постановке. В качестве базовых уравнений используется уравнение неразрывности (1), движения (2) и энергии (3) [10 – 13]:

$$\frac{1}{\rho}\frac{d\rho}{dt}+\frac{\partial \upsilon_i}{\partial x_i}=0\,; \tag{1}$$

$$\frac{d\upsilon_i}{dt}=\frac{1}{\rho}\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}\,; \tag{2}$$

$$\rho\frac{dE}{dt}=\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}\,, \tag{3}$$

где ρ – плотность, t – время, υ_i – компоненты скорости, x_i – компоненты пространственных переменных, E – удельная внутренняя энергия, $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij}+S_{ij}$ – компоненты тензора напряжений, $P = P_c(\rho/\rho_c)$ – среднее давление, δ_{ij} – символ Кронекера, P_c – давление в неповрежденной части среды, S_{ij} – девиатор напряжений, ε_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций.

Объем повреждаемой среды W состоит из объема конденсированной фазы W_c и объема пор W_f. Для описания степени поврежденности среды вводится удельный объем микроповреждений V_{f} и средняя плотность повреждаемой среды $\rho = \rho_{\mathrm{c}}(W_{\mathrm{c}}/W)$. Моделирование разрушения материала осуществляется с использованием модели разрушения активного типа [15], где $P^* = P_k V_1/(V_{\mathrm{f}} + V_1)$, V_1, V_2, K_{f}, P_k – константы:

$$\frac{dV_{\mathrm{f}}}{dt} = \begin{cases} 0, \text{ если } |P_{\mathrm{c}}| \le P^* \text{ или } (P_{\mathrm{c}} > P^* \text{ и } V_f = 0), \\ -\operatorname{sign}(P_{\mathrm{c}}) K_{\mathrm{f}} (|P_c| - P^*)(V_2 + V_{\mathrm{f}}), \text{ если } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0). \end{cases}$$

Для описания пластического деформирования используется условие текучести Мизеса, модуль сдвига и динамический предел текучести зависят от степени повреждения материала и температуры.

Для описания поведения материала под нагрузкой используется уравнение состояния типа Ми – Грюнайзена

$$\begin{aligned} P_{\mathrm{c}} &= \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0 / 2 + 2(b-1)]\mu^2 + \\ &+ \rho_0 a^2 [2(1-\gamma_0/2)(b-1) + 3(b-1)^2]\mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E, \end{aligned} \tag{4}$$

где ρ_0 – начальная плотность материала, $\mu = V_0/(V - V_{\mathrm{f}}) - 1$, γ_0 – коэффициент Грюнайзена, V_0 – начальный объем, V – текущий объем, a, b – константы адиабаты Гюгонио.

В работе использованы представления, согласно которым на изменение пористости влияет только шаровая компонента напряжений или давление, а компоненты девиатора напряжений ограничены независимой девиаторной функцией текучести

$$2G\left(\varepsilon_{ij} - \frac{1}{3}\varepsilon_{kk}\delta_{ij}\right) = \frac{dS_{ij}^0}{dt} + \lambda S_{ij}. \tag{5}$$

Производная по Яуману определяется следующим образом:

$$\frac{dS_{ij}^0}{dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik}W_{jk} - S_{jk}W_{ik}, \tag{6}$$

где G – модуль сдвига, σ – динамический предел текучести, параметр λ равен 0 при упругих деформациях, а при пластических определяется с помощью критерия текучести Мизеса:

$$G = G_0 K_T \left(1 + \frac{cP}{(1+\mu)^{1/3}}\right) \frac{V_3}{(V_{\mathrm{f}} + V_3)}; \tag{7}$$

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_0 K_T \left(1 + \dfrac{cP}{(1+\mu)^{1/3}}\right)\left(1 - \dfrac{V_{\mathrm{f}}}{V_4}\right), \text{ если } V_f \le V_4, \\ 0, \text{ если } V_f \ge V_4. \end{cases} \tag{8}$$

Тепловой коэффициент K_T вычисляется следующим таким образом:

$$K_T = \begin{cases} 1, \text{ если } T_0 < T < T_1, \\ \dfrac{T_m - T}{T_m - T_1}, \text{ если } T_1 < T < T_m, \\ 0, \text{ если } T > T_m, \end{cases} \tag{9}$$

где T_m – температура плавления вещества, c, V_3, V_4, T_1 – константы материала. Значения параметров материала: $\rho = 8930$ кг/м^3, $a = 3940$ м/с, $b = 1.49$, $\gamma_0 = 2.04$,

$G_0 = 41$ ГПа, $\sigma_0 = 0.43$ ГПа, $T_m = 1358$ К, $T_1 = 1154$ К, $c = 280$ ГПа$^{-1}$, $K_f = 0.005$, $P_k = -0.7$ ГПа, $V_1 = 5.6 \cdot 10^{-4}$ см^3/г, $V_2 = 5.6 \cdot 10^{-5}$ см^3/г, $V_3 = 0.0224$ см^3/г, $V_4 = 0.0672$ см^3/г.

Результаты расчетов

Основная задача численных расчетов – выбор начальной скорости образца, необходимой для успешного прохождения каналов оснастки при выбранном постоянном давлении $P_0 = 310$ МПа. Серия численных расчетов показала, что рациональное значение скорости для медного образца составило 170 м/с. При повышении данного значения скорости движения происходят критические деформации образца и рост микроповреждений, а при меньших скоростях образец застревает в пересекающихся каналах [14].

На рис. 4 представлена динамика процесса прессования и поля удельной энергии сдвиговых деформаций. Из анализа результатов видно, что значительным пластическим деформациям подвергается почти весь образец из меди, кроме передней и тыльной частей, где пластическая деформация несущественна. Также в процессе ДКУП происходит равномерное распределение деформаций и удлинение образца в продольном направлении.

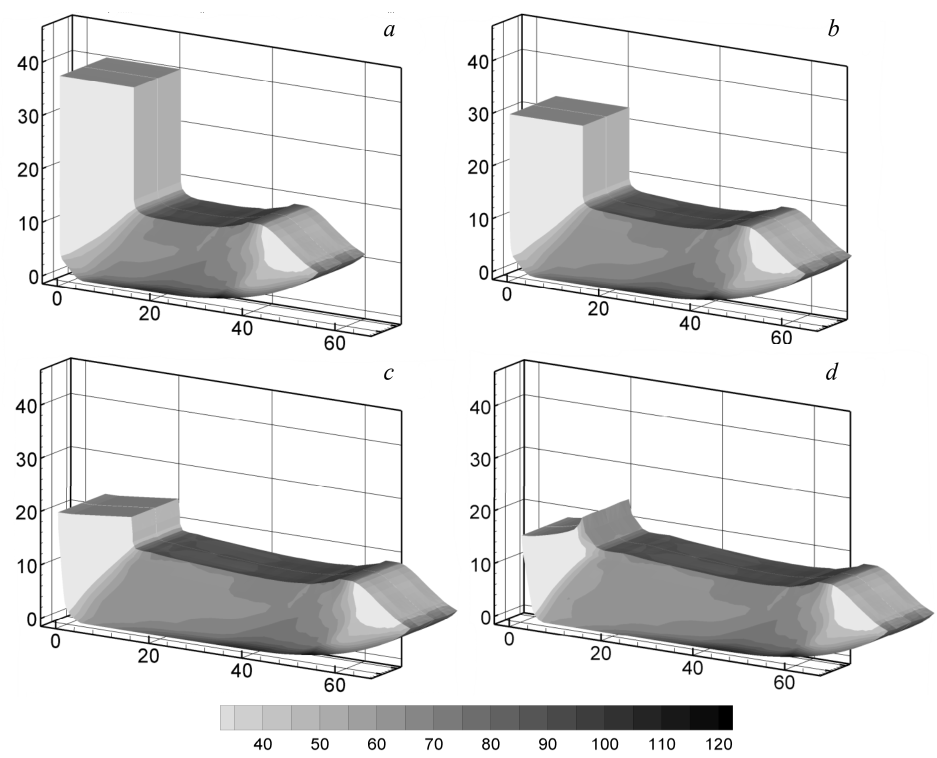

Рис. 4. Поля удельной энергии сдвиговых деформаций, кДж/кг, в различные моменты времени при $P_0 = 310$ МПа, $\upsilon_0 = 170$ м/с: $t = 250$ мкс (*a*), $t = 350$ мкс (*b*), $t = 550$ мкс (*c*), $t = 795$ мкс (*d*)

Fig. 4. Fields of a specific energy of shear deformations, kJ/kg, for $P_0 = 310$ MPa, $\upsilon_0 = 170$ m/s at various time instants: $t =$ *a*) 250, *b*) 350, *c*) 550, and *d*) 795 μs

На рис. 5, *a* изображено распределение температуры по образцу. Максимальная температура $T = 600$ K соответствует области интенсивного взаимодействия образца со стенками каналов и находится в нижней части образца. Важно, что при данной температуре не происходит рост зерен [3]. При приближении тыльной поверхности образца к пересекающимся каналам оснастки происходит образование выступа, такой характер деформирования согласуется с экспериментальными формами образца, полученными в процессе ДКУП [3].

На рис. 5, *b* представлены поля удельного объема микроповреждений. Из рисунка видно, что максимальным повреждениям подвергаются в основном несколько областей на верхней плоскости образца, расположенные в его передней и тыльной частях. Рост микроповреждений в передней части связан с особенностями деформирования на начальном этапе ДКУП, в том числе с образованием свободной поверхности образца между верхней плоскостью образца и верхней границей горизонтального канала. Рост микроповреждений в тыльной части связан с особенностями деформирования на заключительном этапе ДКУП при образовании выступа на верхней плоскости образца и растяжении материала в данной области.

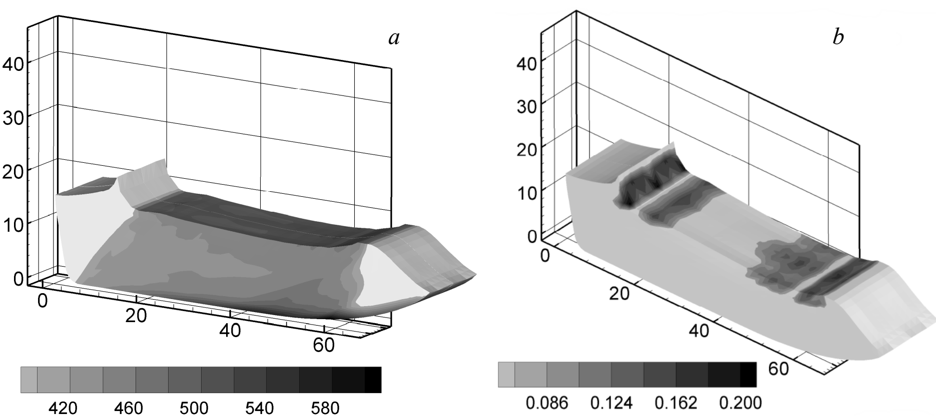

Рис. 5. Параметры процесса при $P_0 = 310$ МПа, $\upsilon_0 = 170$ м/с, $t = 795$ мкс:
a – поля распределения температуры, K, *b* – удельный объем микроповреждений, см^3/г
Fig. 5. Process parameters at $P_0 = 310$ MPa, $\upsilon_0 = 170$ m/s, $t = 795$ μs:
(*a*) fields of temperature distribution (K) and (*b*) specific volume of microdamages (cm^3/g)

Заключение

В результате проведенных исследований с использованием экспериментальных данных подобраны значения давления $P_0 = 310$ МПа и ускорения $2.7{\cdot}10^5$ м/с^2, которые позволили провести численное моделирование ДКУП в условиях нагружения, приближенных к реализующимся в экспериментах. Определено значение начальной скорости движения медного образца перед попаданием в область пересечения каналов, равное 170 м/с, при котором возможно успешное прохождение ДКУП. При увеличении скорости образца происходит критическая деформация и разрушение в начальный период (0.1–0.15 мс) процесса ДКУП, а при уменьшении – возрастает вероятность того, что образец застрянет в пересекающихся каналах. Уменьшение давления также приводит к застреванию при неизменной начальной скорости 170 м/с. Таким образом, образец из меди практически полностью проходит пересекающуюся оснастку со значительными пластическими деформациями, обеспечивающими измельчение зеренной структуры, при параметрах: скорость $\upsilon_0 = 170$ м/с, давление $P_0 = 310$ МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Valiev R.Z.*, *Islamgaliev R.K.*, *Alexandrov I.V.* Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation // Progress in Materials Science. 2000. V. 45. Issue 2. P. 103–189. DOI: 10.1016/s0079-6425(99)00007-9.
2. *Горельский В.А.*, *Зелепугин С.А.* Численное моделирование компактирования порошков при осесимметричном ударе // Порошковая металлургия. 1992. № 4. С. 11–16. DOI: 10.1007/BF00796275.
3. *Бродова И.Г.*, *Зельдович В.И.*, *Хомская И.В.*, *Шорохов Е.В.*, *Петрова А.Н.*, *Хейфец А.Э.*, *Ширинкина И.Г.*, *Фролова Н.Ю.* Структура и свойства субмикрокристаллических и нанокристаллических цветных металлов и сплавов при экстремальных воздействиях / под ред. И.Г. Бродовой. Екатеринбург: Издательство УМЦ УПИ, 2018. 363 с.
4. *Столбовский А.В.*, *Попов В.В.*, *Попова Е.Н.*, *Фалахутдинов Р.М.*, *Шорохов Е.В.* Особенности деформационного поведения бронз при динамическом канально-угловом прессовании // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11–5. С. 858–863.
5. *Khomskaya I.V.*, *Zel'dovich V.I.*, *Frolova N.Yu.*, *Kheifets A.E.*, *Shorokhov E.V.*, *Abdullina D.N.* Effect of high-speed dynamic channel angular pressing and aging on the microstructure and properties of Cu-Cr-Zr alloys // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. V. 447. 012007. DOI: 10.1088/1757-899X/447/1/012007.
6. *Fagan T.*, *Das R.*, *Lemiale V.*, *Estrin Y.* Modelling of equal channel angular pressing using a mesh-free method // J. Materials Science. 2012. V. 47. P. 4514–4519. DOI: 10.1007/s10853-012-6296-3.
7. *Москвичев Е.Н.*, *Скрипняк В.А.*, *Лычагин Д.В.*, *Козулин А.А.*, *Скрипняк В.В.* Влияние структуры на сопротивление пластической деформации алюминиевого сплава 1560 после обработки методом прессования рифлением // Письма о материалах. 2016. Т. 6. № 2. С. 141–145. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-2-141-145.
8. *Uehara T.* Molecular dynamics simulation of grain refinement in a polycrystalline material under severe compressive deformation // Materials Sciences and Applications. 2017. V. 8. P. 918-932. DOI: 10.4236/msa.2017.812067.
9. *Русяк И.Г.*, *Ермолаев М.А.* Анализ влияния различных факторов на характеристики артиллерийского выстрела // Вестник ИжГТУ. 2014. № 4(64). С. 162–165.
10. *Шипачев А.Н.*, *Ильина Е.В.*, *Зелепугин С.А.* Деформирование титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 4. С. 20–24.
11. *Шипачев А.Н.*, *Зелепугин А.С.*, *Ильина Е.В.*, *Зелепугин С.А.* Моделирование динамического канально-углового прессования титановых образцов по двухпоршневой схеме нагружения // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 10. С. 7–11.
12. *Бодров А.С.*, *Олимпиева Н.В.*, *Зелепугин А.С.*, *Зелепугин С.А.* Численное моделирование процессов динамического канально-углового прессования титановых образцов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. №5 (37). С. 56–63. DOI: 10.17223/19988621/37/5.
13. *Bodrov A.S.*, *Zelepugin S.A.* Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing of copper specimens // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. V. 177. 012056. DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012056.
14. *Зелепугин С.А.*, *Бодров А.С.*, *Пахнутова Н.В.* Диаграмма процесса динамического канально-углового прессования титановых образцов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 11-1. С. 28-31. DOI: 10.17513/mjpfi.11924.
15. *Канель Г.И.*, *Разоренов С.В.*, *Уткин А.В.*, *Фортов В.Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.

Статья поступила 18.10.2018 г.

Yanov D.V., Bodrov A.S., Pakhnutova N.V., Zelepugin S.A. (2019) SIMULATION OF DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING OF COPPER SAMPLES WITH ALLOWANCE FOR EXPERIMENTAL DATA OF LOADING. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 60. pp. 141–151

DOI 10.17223/19988621/60/11

Keywords: severe plastic deformation, dynamic channel-angular pressing, finite element method.

One of the urgent problems in the field of materials science is producing of metals and alloys with an ultrafine-grained (UFG) structure. Metals with UFG structure are characterized by improved physical and mechanical properties, such as increased strength, cold brittleness, and radiation stability. This paper considers a method of dynamic channel-angular pressing (DCAP) which is used to obtain the UFG structure. The purpose of this work is to simulate numerically the DCAP process of a copper sample using experimental data of loading. The experimental data available in the scientific literature have been analyzed to specify the initial conditions as follows: the pressure acting on the rear part of the sample is P_0=310 MPa and the initial velocity of the sample can be varied in a wide range. Numerical simulation is performed using a modified finite element method within the framework of elastoplastic model of a damaged medium. The numerical computations have shown that the copper sample successfully undergoes the DCAP process at the following initial parameters: υ_0 = 170 m/s and P_0 = 310 MPa. Almost the entire sample is exposed to uniform intense plastic deformations, except for the front and rear parts. Also, a slight elongation of the sample occurs along the longitudinal axis, and the temperature rises up to 600 K in the contact region of the sample with the walls of the horizontal part of the channel.

Financial support. The work was carried out within the state task of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. 0365-2019-0004) and partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project no. 18-48-700041).

YANOV Dmitriy Vasil'evich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: dima.yanov97@mail.ru

BODROV Aleksandr Stanislavovich (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: alex.bodrov@mail.ru

PAKHNUTOVA Nadezhda Vladimirovna (Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: nadin_04@mail.ru

ZELEPUGIN Sergey Alekseevich (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Professor, Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation). E-mail: szel@yandex.ru

REFERENCES

1. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. (2000) Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. Progress in Materials Science. 45(2). pp. 103–189. DOI: 10.1016/s0079-6425(99)00007-9.
2. Gorel'skii V.A., Zelepugin S.A. (1992) Numerical modeling of powder compaction with axisymmetrical impact. *Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. 31(4). pp. 291–295. DOI: 10.1007/BF00796275.
3. Brodova I.G., Zel'dovich V.I., Khomskaya I.V., Shorokhov E.V., Petrova A.N., Kheyfets A.E., Shirinkina I.G., Frolova N.Yu. (2018) *Struktura i svoystva submikrokristallicheskikh i nanokristallicheskikh tsvetnykh metallov i splavov pri ekstremal'nykh vozdeystviyakh* [Structure and properties of submicrocrystalline and nanocrystalline non-ferrous metals and alloys under extreme loading]. Ekaterinburg: Izdatel'stvo UMC UPI.

4. Stolbovsky A.V., Popov V.V., Popova E.N., Falakhutdinov R.M., Shorokhov E.V. (2016) Osobennosti deformatsionnogo povedeniya bronz pri dinamicheskom kanal'no-uglovom pressovanii [Specific features of strain behavior of bronzes under dynamic channel-angular pressing]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy – International Journal of Applied and Fundamental Research*. 11-5. pp. 858–863.
5. Khomskaya I.V., Zel'dovich V.I., Frolova N.Yu., Kheifets A.E., Shorokhov E.V., Abdullina D.N. (2018) Effect of high-speed dynamic channel angular pressing and aging on the microstructure and properties of Cu-Cr-Zr alloys. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 447 (012007). DOI: 10.1088/1757-899X/447/1/012007
6. Fagan T., Das R., Lemiale V., Estrin Y. (2012) Modelling of equal channel angular pressing using a mesh-free method. Journal of Materials Science. 47. pp. 4514–4519. DOI: 10.1007/s10853-012-6296-3.
7. Moskvichev E.N., Skripnyak V.A., Skripnyak V.V., Kozulin A.A., Lychagin D.V. (2016) Influence of structure to plastic deformation resistance of aluminum alloy 1560 after groove pressing treatment. *Letters on Materials*. 6(2). pp. 141–145. DOI: 10.22226/2410-3535-2016-2-141-145.
8. Uehara T. (2017) Molecular dynamics simulation of grain refinement in a polycrystalline material under severe compressive deformation. *Materials Sciences and Applications*. 8. pp. 918–932. DOI: 10.4236/msa.2017.812067.
9. Rusyak I.G., Ermolaev M.A. (2014) Analiz vliyaniya razlichnykh faktorov na kharakteristiki artilleriyskogo vystrela [Wavelet-analysis application in problems about work of the regulated propulsion system]. *Vestnik IzhGTU – Bulletin of Kalashnikov ISTU*. 4(64). pp. 162–165.
10. Shipachev A.N., Il'ina E.V., Zelepugin S.A. (2010) Deformirovanie titanovykh obraztsov pri dinamicheskom kanal'no-uglovom pressovanii [Deformation of titanium samples under dynamic channel-angular pressing]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 4. pp. 20–24.
11. Shipachev A.N., Zelepugin A.S., Il'ina E.V., Zelepugin S.A. (2012) Modelirovanie dinamicheskogo kanal'no-uglovogo pressovaniya titanovykh obraztsov po dvukhporshnevoy skheme nagruzheniya [Simulation of dynamic channel-angular pressing of titanium samples using two-piston scheme of loading]. *Deformatsiya i razrushenie materialov*. 10. pp. 7–11.
12. Bodrov A.S., Olimpieva N.V., Zelepugin A.S., Zelepugin S.A. (2015) Chislennoe modelirovanie protsessov dinamicheskogo kanal'no-uglovogo pressovaniya titanovykh obraztsov [Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing of titanium specimens]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 5(37). pp. 56–63. DOI: 10.17223/19988621/37/5.
13. Bodrov A.S., Zelepugin S.A. (2017) Numerical simulation of dynamic channel-angular pressing of copper specimens. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 177 (012056). DOI: 10.1088/1757-899X/177/1/012056.
14. Zelepugin S.A., Bodrov A.S., Pakhnutova N.V. (2017) The diagram of the dynamic channel-angular pressing of titanium specimen. *International Journal of Applied and Fundamental Research*. 11(1). pp. 28–31. DOI: 10.17513/mjpfi.11924.
15. Kanel' G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. (1996) *Udarno-volnovye yavleniya v kondensirovanykh sredakh* [Shock wave phenomena in condensed matter]. Moscow: Yanus-K.

Received: October 18, 2018