МЕХАНИКА

УДК 539.3

DOI 10.17223/19988621/37/5

А.С. Бодров, Н.В. Олимпиева, А.С. Зелепугин, С.А. Зелепугин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ¹

Численно в трехмерной постановке исследован процесс интенсивного пластического деформирования образцов из титана при динамическом канально-угловом прессовании для динамической схемы нагружения. Расчеты проведены методом конечных элементов в рамках модели повреждаемой упругопластической среды. Определены рациональные значения начальной скорости образца и действующего на образец давления.

Ключевые слова: динамическое канально-угловое прессование, интенсивное пластическое деформирование, численное моделирование.

Получение объемных наноструктурных и ультрамелкозернистых материалов является одним из активно развиваемых направлений в современном материаловедении [1, 2]. Объемные ультрамелкозернистые (УМЗ) металлы и сплавы, полученные с помощью методов интенсивной пластической деформации (ИПД), обладают улучшенными, по сравнению с крупнозернистыми аналогами, свойствами – повышенной прочностью, высокой усталостной прочностью, ударной вязкостью, коррозионной и радиационной стойкостью и др. Исследования свойств таких материалов имеют важное как фундаментальное, так и практическое значение.

Динамическое канально-угловое прессование (ДКУП) – один из методов получения УМЗ-материалов с помощью ИПД [3–5]. Данный метод является развитием метода равноканального углового прессования (РКУП) [1], позволяющим повысить скорость пластического деформирования образца. Метод ДКУП позволяет использовать образцы значительно больших размеров при меньшем количестве проходов, чем в РКУП. В процессе ИПД при измельчении структуры повышаются прочностные свойства материала, при этом при ДКУП сохраняются высокие пластические характеристики, что в РКУП недостижимо.

Экспериментальные исследования показывают, что необходимы широкомасштабные численные исследования процессов ДКУП для выявления особенностей интенсивного пластического деформирования и установления эффективных параметров данных процессов. До настоящего времени известно лишь несколько работ, посвященных численному моделированию процессов ДКУП. В [6–8] в двумерной плоскодеформационной постановке исследованы особенности ИПД образцов из титана, алюминия и меди для четырех схем нагружения: инерционной, когда задается начальная скорость образца и он проходит пересечение каналов по инерции; динамической, когда дополнительно на тыльный торец образца

¹ Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 14-08-31208 и 13-08-98104.

действует давление, моделирующее давление пороховых газов; динамической с пуансоном, когда давление на тыльный торец образца передается через пуансон; двухпоршневой, когда помимо толкающего пуансона (в вертикальном канале) действует поршень в горизонтальном канале, обеспечивая противодействие. В [9] представлена трехмерная схема расчета и приведены первые численные результаты в сравнении с двумерными.

Целью данной работы было определение рациональных параметров процесса (начальной скорости и давления) с точки зрения обеспечения прохождения образцом пересечения каналов при сохранении формы, близкой к первоначальной, и низком уровне поврежденности. Численное моделирование процесса ДКУП проводится в трехмерной постановке. Процесс интенсивного пластического деформирования объемных титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании исследован для динамической схемы нагружения. Расчеты проведены методом конечных элементов в рамках модели повреждаемой упругопластической среды [10, 11].

Постановка задачи

В численных расчетах используется модель повреждаемой упругопластической среды, которая позволяет описывать зарождение и эволюцию микроповреждений. В элементарном объеме среды W конденсированная фаза занимает объем W_c и характеризуется плотностью ρ_c , микрополости (пустоты) занимают объем W_f , в которых плотность материала полагается равной нулю. Средняя плотность повреждаемой среды связана с введенными параметрами соотношением $\rho = \rho_c(W_c/W)$. Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом микроповреждений $V_f = W_f/(W \cdot \rho)$.

Система уравнений, описывающая нестационарное адиабатическое движение сжимаемой среды состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии [6]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) = 0, \quad \rho d\mathbf{v}_i/dt = \sigma_{ij,j}, \quad \frac{dE}{dt} = \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij},$$

где ρ – плотность, t – время, $\mathbf{v}$ – вектор скорости с компонентами v_i , $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$ – компоненты тензора напряжений, E – удельная внутренняя энергия, ε_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, $P = P_c(\rho/\rho_c)$ – среднее давление, δ_{ij} – символ Кронекера, S_{ij} – компоненты девиатора напряжений, P_c – давление в сплошной компоненте вещества.

Давление в неповрежденном веществе является функцией удельного объема, удельной внутренней энергии и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми – Грюнайзена

$$P_c = \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0/2 + 2(b-1)] \mu^2 + \\ + \rho_0 a^2 [2(1 - \gamma_0/2)(b-1) + 3(b-1)^2] \mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E,$$

где $\mu = V_0/(V - V_f) - 1$, γ_0 – коэффициент Грюнайзена, V_0 и V – начальный и текущий удельные объемы, a и b – константы адиабаты Гюгоньо, описываемой линейным соотношением

$$u_s = a + bu_p,$$

где u_s – скорость распространения фронта ударной волны, u_p – массовая скорость вещества за фронтом ударной волны.

Определяющие соотношения связывают компоненты девиатора напряжений и тензора скоростей деформаций и используют производную Яуманна. Для описания пластического течения используется условие Мизеса. Учтены зависимости модуля сдвига и динамического предела текучести от температуры и уровня поврежденности материала [12–15].

Для численного моделирования разрушения материала при растяжении в условиях динамического нагружения применялась кинетическая модель разрушения активного типа. Модель определяет скорость изменения удельного объема микроповреждений, которые непрерывно изменяют свойства материала, вызывая релаксацию напряжений [12]:

$$\frac{dV_f}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_c| \leq P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f = 0), \\ -\text{sign}(P_c) K_f (|P_c| - P^*) (V_2 + V_f), & \text{если } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0), \end{cases}$$

где $P^* = P_k V_1 / (V_f + V_1)$; V_1, V_2, P_k, K_f – экспериментально определяемые константы материала ($P^* > 0$).

Для решения задачи используется модифицированный метод конечных элементов без глобальной матрицы жесткости, предназначенный для решения задач динамического нагружения [10, 11].

Процесс ДКУП моделируется на примере титановых образцов сечением 16×16 мм, длиной 65 мм. Угол пересечения каналов составляет 90° с наклонной площадкой под углом 45° в области внешнего угла. На тыльной поверхности образца задается постоянная нагрузка P , моделирующая давление пороховых газов (динамическая схема нагружения). На границах каналов ставится условие жесткой стенки. Наклонная площадка представляет собой большую грань прямой призмы, основаниями которой являются равнобедренные прямоугольные треугольники, прямой угол и катеты которых совпадают с внешним углом и соответствующими ребрами пересекающихся каналов. В расчетах размер и положение наклонной площадки соответствует величине катетов $h = 4$ и 8 мм. Варьируется величина нагрузки P и начальное положение лицевой поверхности образца H в вертикальном канале.

Результаты расчетов

Результаты численного моделирования показывают, что на процесс деформирования образца при прохождении пересечения каналов существенное влияние оказывает наклонная площадка. Поле векторов скоростей на рис. 1, а демонстрирует наличие двух плоскостей изменения направления движения материала в данной области. Эти плоскости направлены от концов наклонной площадки к внутреннему углу пересечения стенок каналов. Такая динамика движения приводит к образованию двух плоскостей пластического деформирования, представленных на рис. 1, б. При этом в каждой из этих плоскостей пластическое деформирование материала образца происходит достаточно равномерно. При уменьшении размеров площадки плоскости пластического деформирования сближаются, формируя при $h = 4$ мм одну общую плоскость.

Анализ распределений удельной энергии сдвиговых деформаций показывает практически полную идентичность полей пластического деформирования в поперечном направлении, что свидетельствует о предпочтительности использования при ДКУП образцов квадратного сечения по сравнению с цилиндрическими. Вместе с тем, вдоль образца имеет место неравномерность деформирования, что особенно

заметно в передней части образца и может приводить к необходимости повторного прохождения образца по каналам. Следует отметить, что максимальные значения удельной энергии сдвиговых деформаций достигаются в приповерхностных слоях образца вследствие его взаимодействия со стенками каналов. В этих областях возможно плавление материала образца, что наблюдается и в эксперименте [3].

Рис. 1. Векторы скоростей (а) и распределение удельной энергии сдвиговых деформаций (б) (начальный уровень 15 кДж/кг, интервал между уровнями 5 кДж/кг) в образце в области пересечения каналов в момент времени 200 мкс при давлении 0.55 ГПа, $H = 10.6$ мм (соответствующее значение скорости образца в момент начала взаимодействия с наклонной площадкой равно 100 м/с), $h = 8$ мм. Размеры даны в мм

Результаты расчетов показывают, что при движении в вертикальном канале под действием давления в зависимости от пройденного расстояния и величины P образец разгоняется до различных скоростей, что существенно влияет на процесс ДКУП.

При постоянном значении P с увеличением параметра H возрастает расстояние, которое в равноускоренном режиме проходит образец до начала деформирования, при этом увеличивается скорость прохождения образца через пересекающиеся каналы. В результате повышается скорость деформирования материала, происходит рост температуры в образце, особенно в области его контакта со стенками каналов. Образец с увеличением скорости сильнее растягивается в направлении продольной оси, а в верхней части образца наблюдается увеличение области, содержащей микроповреждения. На рис. 2 приведены графики изменения во времени средней скорости образца при постоянном значении P равном 0.55 ГПа, $h = 4$ мм, для выбранных значений H .

Линейная часть графиков соответствует равноускоренному движению образца по вертикальному каналу, причем ускорение определяется величиной P и в данном случае равно $1.874 \cdot 10^6$ м/с². В первом случае ($H = 4$ мм) образец начинает взаимодействие с наклонной площадкой при нулевой начальной скорости, в отличие от остальных вариантов. Тем не менее средняя скорость образца успевает возрасти почти до 100 м/с за счет действия давления на тыльный торец образца. Во всех четырех вариантах образец успешно проходит пересечение каналов, окончание процесса ДКУП происходит в момент обрыва графиков.

Рис. 2. Изменение средней скорости образца при $P = 0.55$ ГПа для фиксированных значений H

Анализ результатов численных расчетов позволяет определить область значений параметров P и H , для которых обеспечивается успешное прохождение титанового образца по каналам. На рис. 3 представлена диаграмма области рациональных значений параметров P и H для успешного прохождения титанового образца через пересечение каналов. Область $P-H$ разбита на три зоны: в зоне I образец застревает, зона II соответствует успешному прохождению образца по каналам, зона III — неустойчивому прохождению и разрушению образца. Минимальное значение H ограничено высотой наклонной площадки (штриховая горизонтальная линия на рис. 3) и в данном случае равно 4 мм. Зона устойчивого прохождения титанового образца по каналам в исследованном диапазоне давлений, зона II, достаточно узкая и имеет ряд существенных ограничений. Было установлено значение минимальной величины нагрузки, обеспечивающей успешное прохождение образца через пересекающиеся каналы при $H = 4$ мм, равное 0.53 ГПа. Так как в данном случае $H = h$, то образец начинает прохождение области пересечения каналов с нулевой начальной скоростью. При постоянном значении P с увеличением параметра H возрастает расстояние, которое в равноускоренном режиме

Рис. 3. Диаграмма процесса ДКУП титанового образца

проходит образец до начала деформирования, при этом увеличивается начальная скорость образца и скорость прохождения образцом области пересечения каналов. За счет роста начальной скорости возможно успешное прохождение образца при значениях $P < 0.53$ ГПа, в результате чего граница между зонами I и II имеет наклон в сторону меньших значений P при росте H . В этом случае недостаточная нагрузка в ходе процесса компенсируется предварительным разгоном образца в вертикальном канале и образец не застревает на начальном этапе деформирования. С увеличением H для фиксированных значений P была определена верхняя граница зоны II, выше которой успешное прохождение образца через пересекающиеся каналы невозможно без накопления критического уровня повреждений либо макроразрушения образца (зона III). Также существует граница между зонами I и III в левой верхней части диаграммы, характеризующаяся переходом от застревания образца в каналах матрицы к застреванию с частичным разрушением. Диаграмма позволяет определить минимальные значения H и P при размере наклонной площадки $h = 4$ мм, составляющие $4 \text{ мм} \leq H < 27 \text{ мм}$, $P > 0.46$ ГПа, вне которых образец гарантированно или застревает в каналах, или разрушается. Результаты трехмерного моделирования позволяют сделать вывод о рациональных значениях параметров нагружения титанового образца с точки зрения обеспечения прохождения образцом пересечения каналов при сохранении формы, близкой к первоначальной, и низком уровне поврежденности: $v_0 = 100$ м/с, $P = 0.55$ ГПа.

Заключение

Проведено численное исследование процессов деформирования титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании в трехмерной постановке. Построена диаграмма процесса ДКУП титанового образца в координатах $H - P$ (начальное положение образца в вертикальном канале – давление, действующее на тыльный торец образца). Обнаружено, что увеличение скорости прохождения образца через каналы (скорости деформирования образца) с увеличением начального пробега образца в вертикальном канале приводит к удлинению образца в направлении продольной оси, росту температуры в образце и росту микроповреждений. Результаты трехмерного моделирования позволяют сделать вывод о рациональных значениях параметров нагружения титанового образца: $v_0 = 100$ м/с, $P = 0.55$ ГПа. Данные значения отличаются от полученных в двумерном расчете [6, 7]: $v_0 = 200\text{--}250$ м/с, $P = 0.28\text{--}0.32$ ГПа, хотя и не противоречат друг другу.

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.
2. Valiev R. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties // Nature Materials. 2004. V. 3. Issue 8. P. 511–516.
3. Шорохов Е.В., Жгилев И.Н., Хомская И.В. и др. Высокоскоростное деформирование металлических материалов методом канально-углового прессования для получения ультрамелкозернистой структуры // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 2. С. 36–40.
4. Зельдович В.И., Шорохов Е.В., Фролова Н.Ю. и др. Структура титана после динамического канально-углового прессования при повышенной температуре // ФММ. 2009. Т. 108. № 4. С. 365–370.
5. Зельдович В.И., Шорохов Е.В., Добаткин С.В. и др. Структура и механические свойства титана, подвергнутого высокоскоростному канально-угловому прессованию и деформации прокаткой // ФММ. 2011. Т. 111. № 4. С. 439–447.

6. 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.
7. Суглобова И.К., Ильина Е.В., Шипачев А.Н., Зелепугин С.А. Выбор параметров нагружения титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. № 2(14). С. 111–116.
8. 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.
9. Зелепугин С.А., Зелепугин А.С., Бодров А.С., Олимпиева Н.В. Трехмерное моделирование процессов пластического деформирования металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 7/3. С.50–52.
10. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Смолин А.Ю. Исследование влияния дискретизации при расчете методом конечных элементов трехмерных задач высокоскоростного удара // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1997. Т. 37. № 6. С. 742–750.
11. Johnson G.R. Numerical algorithms and material models for high-velocity impact computations // International Journal of Impact Engineering. 2011. V. 38. Issue 6. P. 456–472.
12. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортков В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996.
13. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Сидоров В.Н. Численное исследование трехмерной задачи высокоскоростного взаимодействия цилиндров с недеформируемой преградой с учетом разрушения и температурных эффектов // Прикл. механика. 1994. Т. 30. № 3. С. 35–40.
14. Горельский В.А., Зелепугин С.А., Толкачев В.Ф. Исследование пробивания преград при несимметричном высокоскоростном ударе с учетом разрушения и тепловых эффектов // Изв. АН. МТТ. 1994. № 5. С. 121–130.
15. Зелепугин С.А., Зелепугин А.С. Моделирование разрушения преград при высокоскоростном ударе группы тел // Химическая физика. 2008. Т. 27. № 3. С. 71–76.

Статья поступила 07.09.2015 г.

Bodrov A. S., Oлимпиева N. V., Zelepugin A. S., Zelepugin S. A. NUMERICAL SIMULATION OF DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING OF TITANIUM SPECIMENS

DOI 10.17223/19988621/37/5

At present, volume nanostructural and ultrafine-grained materials are considered as promising constructional and functional materials of new generation. Investigation of ultrafine-grained metals received by severe plastic deformation methods showed that they are characterized by a number of unique properties as compared to coarse-grained analogues: raised several times strength combined with good plasticity, low- and high-temperature superplasticity, cyclic and radiating resistance. Recently, a new method of severe plastic deformation was proposed – dynamic channel-angular pressing (DCAP), in which pressing of a specimen through channels is carried out by pulse loading at the expense of energy of compressed gases. In this work, deformation of a titanium specimen during DCAP was numerically investigated in a 3D statement for the dynamic scheme of loading. Computations have been carried out by the finite element method within the framework of the elastic-plastic medium model with allowance for fracture. The effective values of initial velocity and loading pressure are determined for a titanium specimen.

Keywords: dynamic channel-angular pressing, severe plastic deformation, numerical simulation.

BODROV Aleksandr Stanislavovich (Tomsk State University, Tomsk, Russia)

E-mail: alex.bodrov@mail.ru

OLIMPIEVA Nadezhda Vladimirovna (Tomsk State University, Tomsk, Russia)

E-mail: nadin_04@mail.ru

ZELEPUGIN Alexey Sergeyevich (Candidate of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russia; Tomsk Scientific Centre, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia)
E-mail: alekszel84@mail.ru

ZELEPUGIN Sergey Alekseyevich (Doctor of Physics and Mathematics, Tomsk State University, Tomsk, Russia; Tomsk Scientific Centre, Siberian Division of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia)
E-mail: szel@yandex.ru

REFERENCES

1. Valiev R.Z., Islamgaliev R.K., Alexandrov I.V. Bulk nanostructured materials from severe plastic deformation. *Progress in Materials Science*, 2000, vol. 45, issue 2, pp. 103–189.
2. Valiev R. Nanostructuring of metals by severe plastic deformation for advanced properties. *Nature Materials*, 2004, vol. 3, issue 8, pp. 511–516.
3. Shorokhov E.V., Zhgilev I.N., Khomskaya I.V. i dr. Vysokoskorostnoe deformirovanie metallicheskih materialov metodom kanal'no-uglovogo pressovaniya dlya polucheniya ul'tramelkozernistoy struktury. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2009, no. 2, pp. 36–40. (in Russian)
4. Zeldovich V.I., Shorokhov E.V., Frolova N.Y. et al. Structure of titanium after dynamic channel angular pressing at elevated temperatures. *The Physics of Metals and Metallography*, 2009, vol. 108, no. 4, pp. 347–352.
5. Zeldovich V.I., Shorokhov E.V., Dobatkin S.V. et al. Structure and mechanical properties of titanium subjected to high-rate channel angular pressing and deformation by rolling. *The Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 111, no. 4, pp. 421–429.
6. Shipachev A.N., Il'ina E.V., Zelepugin S.A. Deformirovanie titanovykh obraztsov pri dinamicheskom kanal'no-uglovom pressovanii. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2010, no. 4, pp. 20–24. (in Russian)
7. Suglobova I.K., Il'ina E.V., Shipachev A.N., Zelepugin S.A. Vybore parametrov nagruzheniya titanovykh obraztsov pri dinamicheskom kanal'no-uglovom pressovanii. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2011, no. 2(14), pp. 111–116. (in Russian)
8. Shipachev A.N., Zelepugin A.S., Il'ina E.V., Zelepugin S.A. Modelirovanie dinamicheskogo kanal'no-uglovogo pressovaniya titanovykh obraztsov po dvukhporyshnevoy skheme nagruzheniya. *Deformatsiya i razrushenie materialov*, 2012, no. 10, pp. 7–11. (in Russian)
9. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S., Bodrov A.S., Olimpiyeva N.V. Trekhmernoe modelirovanie protsessov plasticheskogo deformirovaniya metallicheskih obraztsov pri dinamicheskom kanal'no-uglovom pressovanii. *Izv. vuzov. Fizika*, 2013, vol. 56, no. 7/3, pp. 50–52. (in Russian)
10. Gorelski V.A., Zelepugin S.A., Smolin A.Yu. Effect of discretization in calculating three-dimensional problems of high-velocity impact by the finite-element method. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1997, vol. 37, no. 6, pp. 722–730.
11. Johnson G.R. Numerical algorithms and material models for high-velocity impact computations. *International Journal of Impact Engineering*, 2011, vol. 38, issue 6, pp. 456–472.
12. Kanel' G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. *Udarno-volnovye yavleniya v kondensirovannykh sredakh*. Moscow, Yanus-K, 1996. (in Russian)
13. Gorelskii V.A., Zelepugin S.A., Sidorov V.N. Numerical solution of three-dimensional problem of high-speed interaction of a cylinder with a rigid barrier, taking into account thermal effects. *International Applied Mechanics*, 1994, vol. 30, issue 3, pp. 193–198.
14. Gorelskiy V.A., Zelepugin S.A., Tolkachev V.F. Issledovanie probivaniya pregrad pri nesimmetrichnom vysokoskorostnom udare s uchetom razrusheniya i teplovykh effektiv. *Izv. AN. MTT*, 1994, no. 5, pp. 121–130. (in Russian)
15. Zelepugin S.A., Zelepugin A.S. Modeling of the destruction of targets during a high-velocity impact. *Russian Journal of Physical Chemistry B, Focus on Physics*, 2008, vol. 2, issue 2, pp. 246–250.