УДК 539.3:621.777

ДИАГРАММА ПРОЦЕССА ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ

^{1,2}Зелепугин С.А., ¹Бодров А.С., ¹Пахнutowa Н.В.

¹Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Томск, e-mail: szel@yandex.ru;

²Томский научный центр СО РАН, Томск

В статье представлены результаты трехмерного численного моделирования процесса динамического канально-углового прессования (ДКУП) образцов из титана. Для решения задачи высокоскоростной интенсивной пластической деформации образца в рамках модели повреждаемой упругопластической среды использован модифицированный метод конечных элементов. Определены значения начальной скорости образца и приложенного к нему давления, обеспечивающие успешное прохождение процесса ДКУП; построена диаграмма процесса в координатах “давление, действующее на тыльный торец образца – начальная скорость образца”. Выделены три области на диаграмме, характеризующие поведение образца при различных условиях: область остановки образца при пересечении каналов, область разрушения и область устойчивого прохождения процесса ДКУП. Выявлено, что увеличение средней скорости движения образца по каналам вследствие роста начальной скорости образца или действующего на его тыльный торец давления приводит к удлинению образца в направлении продольной оси.

Ключевые слова: динамическое канально-угловое прессование, интенсивная пластическая деформация, численное моделирование

THE DIAGRAM OF THE DYNAMIC CHANNEL ANGULAR PRESSING OF TITANIUM SPECIMEN

^{1,2}Zelepugin S.A., ¹Bodrov A.S., ¹Pakhnutova N.V.

¹National Research Tomsk State University, Tomsk, e-mail: szel@yandex.ru;

²Tomsk Scientific Center SB RAS, Tomsk

This paper presents three-dimensional numerical simulation results of titanium specimens' dynamic channel angular pressing (DCAP) process. Modified finite element method to solve the problem of high-speed severe plastic deformation of the specimen within the framework of the elastic-plastic medium model was used. Initial velocity and pressure values to provide successful passage of DCAP process were determined; the process diagram in “pressure acting on a rear surface of the specimen – initial velocity of the specimen” coordinates was plotted. Three regions characterizing the behavior of the specimen under various conditions were identified: the region with specimen stuck at the channels' intersection, the region with specimen destructed and the region with stable DCAP process. It was found that an increase in the average velocity of the specimen passing through channels due to an increase in the initial velocity or pressure, acting on a rear surface of the specimen, leads to the elongation of the specimen in the longitudinal axis direction.

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

Одной из фундаментальных проблем современного материаловедения является получение объемных ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов и сплавов, обладающих усовершенствованными свойствами – повышенными прочностью и пластичностью, высокой усталостной прочностью, коррозионной и радиационной стойкостью и др. Металлические материалы с таким высоким уровнем свойств становится возможным получить, применяя методы интенсивной пластической деформации (ИПД). Динамическое канально-угловое прессование (ДКУП) [1] – уникальный метод ИПД, разработанный на базе метода равноканального углового прессования (РКУП) в РФЯЦ ВНИИТФ (г. Снежинск). В отличие от РКУП, метод ДКУП позволяет сохранить высокую пластичность образца после обработки, значительно увеличить скорость пластического деформирования, а также использовать более крупные образцы и сократить общее

количество проходов образца через оснастку. Исследования, проводимые в настоящее время, показывают необходимость установления эффективных параметров процесса ДКУП и выявления особенностей ИПД, что становится возможным при применении инструментов численного моделирования [2–7].

Постановка задачи

Процессы, которые рассматриваются в данной работе, имеют нестационарный характер. Также при их описании используется приближение адиабатического процесса применительно к сжимаемой упругопластической среде. Система уравнений, описывающая такое поведение среды, является следствием законов сохранения массы, импульса, энергии:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = \sigma_{ij} \varepsilon_{ij}. \quad (3)$$

где ρ – плотность, t – время, v_i – компоненты вектора скорости, $\sigma_{ij} = -P\delta_{ij} + S_{ij}$ – 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 неповрежденной части вещества.

Во всем диапазоне условий нагружения применяется уравнение состояния, определяющее давление как функцию удельных объема и внутренней энергии:

$$P_c = \rho_0 a^2 \mu + \rho_0 a^2 [1 - \gamma_0/2 + 2(b-1)] \mu^2 + \rho_0 a^2 [2(1 - \gamma_0/2)(b-1) + 3(b-1)^2] \mu^3 + \gamma_0 \rho_0 E, \quad (4)$$

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

$$u_s = a + bu_p,$$

где u_s – скорость распространения фронта ударной волны, u_p – массовая скорость вещества за фронтом ударной волны. Данное уравнение относится к уравнениям состояния типа Ми – Грюнайзена, в котором выделяется «холодная» и «тепловая» части.

Для описания повреждения материала среды используется кинетическая модель разрушения активного типа [8, 9]:

$$\frac{dV_f}{dt} = \begin{cases} 0, & \text{если } |P_c| \leq P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f = 0), \\ -\text{sign}(P_c) K_f (|P_c| - P^*) (V_2 + V_f), & \text{если } P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0), \end{cases} \quad (5)$$

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

В рамках данной модели степень повреждения среды характеризуется удельным объемом микроповреждений V_f . Для повреждаемой среды можно определить элементарный объем среды W , который включает объем конденсированной фазы W_c и объем микрополостей (пустот), которые занимают объем W_f . Плотность конденсированной фазы ρ_c , а плотность пустот полагается равной нулю. Вводится

понятие средней плотности повреждаемой среды $\rho = \rho_c (W_c/W)$. Тогда удельный объем микроповреждений определяется как $V_f = W_f/(W \rho)$. В совокупности такой подход можно определить как модель повреждаемой среды.

Компоненты девиатора напряжений определяются через компоненты тензора скоростей деформаций, при этом используется производная по Яуманну. Пластическое течение описывается с использованием условия текучести Мизеса. Модуль сдвига и динамический предел текучести зависят от температуры и поврежденности материала.

Рассматривается задача взаимодействия титанового образца с пересекающимися каналами. Для системы основных уравнений (1)–(5) в декартовой системе координат ставится задача с начальными и граничными условиями. Начальные условия

характеризуются отсутствием внутренних напряжений, а образец движется с начальной скоростью v_0 . На границах каналов ставится условие жесткой стенки. На тыльной поверхности образца задается постоянная нагрузка P , моделирующая давление пороховых газов. Для решения задачи используется модифицированный метод конечных элементов без глобальной матрицы жесткости, предназначенный для решения задач высокоскоростного нагружения [10].

Численные результаты

Численное моделирование процесса ДКУП в трехмерной постановке выполне-

но для образцов длиной 65 мм и поперечным сечением 16x16 мм. Каналы оснастки, по которым движется образец, пересекаются под углом 90°; в области внешнего угла пересечения каналов задана наклонная площадкой под углом 45° и высотой 4 мм (рис. 1, а).

В расчетах варьировались величины нагрузки P и начальной скорости образца v_0 . Анализ результатов серии расчетов позволяет построить диаграмму процесса ДКУП в координатах $P - v_0$ (рис. 1, б) и определить комбинацию их значений, обеспечивающих

успешное деформирование образца с полным прохождением по каналам (зона II на рис. 1, б). Диаграмма разделена на следующие зоны:

Зона I: образец останавливается при пересечении каналов оснастки.

Зона II: образец успешно проходит через каналы.

Зона III: образец разрушается во время процесса ДКУП.

Образец успешно проходит через пересекающиеся каналы при достижении минимального значения давления на тыльную поверхность образца, равного 0,6 ГПа. При увеличении начальной скорости образца до 250 м/с возрастает вероятность успешного прохождения процесса ДКУП при значениях $P < 0,6$ ГПа. В правой нижней части диаграммы зоны I и III пересекаются: здесь происходит переход режима процесса ДКУП от остановки образца в области

пересечения каналов оснастки к остановке с частичным разрушением образца. С увеличением значений P и v_0 были определены верхняя и правая границы зоны II, за которыми прохождение образца по каналам невозможно без накопления критического уровня повреждений или разрушения образца (зона III).

Увеличение значения P при постоянном значении v_0 приводит к удлинению образца в направлении продольной оси, также увеличивается средняя скорость движения образца по каналам в течение всего процесса ДКУП. В результате увеличивается скорость пластического деформирования, повышается температура образца. При постоянном значении P увеличение значения v_0 также приводит к удлинению образца.

Динамика успешного прохождения образца по пересекающимся каналам представлена на рис. 2.

Рис. 1. Начальное положение образца и геометрия пересекающихся каналов (а); $P - v_0$ диаграмма процесса ДКУП титанового образца (б)

Рис. 2. Образец в различные моменты времени процесса: 80, 160 и 240 мкс. $P=1$ ГПа, $v_0=100$ м/с. Размеры даны в мм

Рис. 3. Распределение удельной энергии сдвиговых деформаций (кДж/кг) в образце: $P=1 \text{ ГПа}$, $v_0=100 \text{ м/с}$, $t=240 \text{ мкс}$ (а); $P=1,5 \text{ ГПа}$, $v_0=150 \text{ м/с}$, $t=160 \text{ мкс}$ (б). Размеры даны в мм

Исследование полей пластического деформирования в образцах (рис. 3) позволяет сделать вывод о неравномерности процесса деформирования в продольном направлении, это может привести к необходимости повторения процесса ДКУП. В приповерхностных слоях образцов наблюдаются наибольшие значения удельной энергии сдвиговых деформаций ввиду взаимодействия со стенками каналов, при этом в поперечном направлении распределение полей практически полностью идентично.

Закключение

Выполнено численное исследование в трехмерной постановке процессов интенсивного пластического деформирования образцов из титана при ДКУП. Определены значения начальной скорости образца и приложенного к нему давления, обеспечивающие успешное прохождение процесса ДКУП; построена диаграмма процесса в координатах “давление, действующее на тыльный торец образца – начальная скорость образца”. Выделены три области на диаграмме процесса ДКУП, характеризующие поведение образца при различных условиях: область остановки образца при пересечении каналов, область разрушения и область устойчивого прохождения процесса ДКУП. Установлено, что рост средней скорости движения образца по пересекающимся каналам из-за увеличения значений начальной скорости или действующего на него давления приводит к удлинению образца в направлении продольной оси.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 16-43-700774).

Список литературы

1. Шорохов Е.В., Жиглев 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.
2. Ширинкина И.Г., Бродова И.Г. Исследование термической стабильности субмикроструктурного алюминийного сплава, полученного высокоскоростным деформированием // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 12. – С. 27–33.
3. 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.
4. Найзабеков А.Б., Лежнев С.Н., Волокитина И.Е., Курапов Г.Г., Кнапиньски М.Я. Эволюция микроструктуры латуни CuZn36 при прессовании в равноканальной ступенчатой матрице // Труды Университета. – 2016. – № 1(62). С. 40–44.
5. Скрыбина Н.Е., Аптуков В.Н., Романов П.В., Фрушар Д. Применение метода сеток при изучении процессов равноканального углового прессования магниевых сплавов // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2015. – № 3. – С. 133–145.
6. Аборкин А.В., Захаров А.А., Бабин Д.М., Орехов О.П. Расчетно-экспериментальное исследование энергосиловых параметров процесса непрерывного канально-углового прессования алюминия // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 3(17). – С. 47–51.
7. Иванов А.М., Петрова Н.Д., Ващенко С.С. Канальное угловое прессование медной пластины // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 4. – 2(288). С. 56–60.
8. 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.
9. Зелепугин С.А., Шпаков С.С. Разрушение металл-интерметаллидного многослойного композита при высокоскоростном ударе // Механика композиционных материалов и конструкций. – 2009. – Т. 15, № 3. – С. 369–382.
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. – № 37(6). – С. 742–750.