

УДК 539.388.2

И.К. Суглобова, Е.В. Ильина, А.Н. Шипачев, С.А. Зелепугин**ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ НАГРУЖЕНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ КАНАЛЬНО-УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ¹**

Численно исследованы процессы деформирования титановых образцов при движении по пересекающимся под прямым углом каналам для двух схем нагружения: инерционной и динамической. Расчеты выполнены методом конечных элементов в рамках модели упругопластической среды. Показано преимущество динамической схемы, определены оптимальные значения начальной скорости образца и действующего на него давления.

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

Объемные наноструктурные материалы в настоящее время рассматриваются как перспективные конструкционные и функциональные материалы нового поколения. Выделяются два основных метода их получения – компактирование исходных нанопорошков и формирование наноструктур при интенсивной пластической деформации (ИПД). Исследование ультрамелкозернистых (УМЗ) металлов, полученных ИПД, показало, что они характеризуются рядом уникальных свойств – повышенной в несколько раз, по сравнению с крупнозернистыми аналогами, прочностью, сочетающейся с хорошей пластичностью, низко- и высокотемпературной сверхпластичностью, циклической и радиационной стойкостью.

Для получения УМЗ-структуры методом ИПД используют процесс равноканального углового прессования (РКУП), разработанный творческим коллективом В.М. Сегала [1] и развитый Р.З. Валиевым с сотрудниками [2]. В РФЯЦ–ВНИИТФ предложен динамический вариант этого метода, в котором продавливание материала через каналы осуществляется путем импульсной нагрузки за счет энергии продуктов горения пороха, сжатых газов и др. [3]. Основное преимущество этого метода по сравнению с РКУП состоит в том, что увеличивается скорость пластического деформирования, а также добавляется ударно-волновая деформация, которая увеличивает общий результат воздействия [4].

Несмотря на активное развитие нескольких новых методов интенсивной деформации (всестороннейковки, прокатки с наложением и соединением листов, специального циклического деформирования и ряда других), ДКУП остается наиболее широко исследуемым методом ИПД. При использовании ДКУП существует возможность принципиального изменения свойств металлов и сплавов при формировании в них ультрамелкозернистых структур, что позволяет реализовать сочетание высоких прочности и пластичности [5]. Исследования такого необычного сочетания прочности и пластичности наноструктурных материалов имеют весьма важное как фундаментальное, так и практическое значение. С фундаментальной

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-08-00516), Минобрнауки РФ в рамках АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.1/5993).

точки зрения эти исследования интересны для выяснения новых механизмов деформирования. С практической стороны, создание наноматериалов с высокой прочностью и пластичностью может резко повысить их усталостную прочность, ударную вязкость, снизить температуру хрупко-вязкого перехода.

Постановка задачи

В данной работе процессы деформирования образцов при их движении по пересекающимся каналам исследуются численно в плоскодеформационной постановке в рамках упругопластической модели среды. В численных расчетах используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся возможностью зарождения и развития в ней микроповреждений. Элементарный объем среды W составляют ее неповрежденная (сплошная) часть, занимающая объем W_c и характеризующаяся плотностью ρ_c , а также занимающие объем W_f микроповреждения, плотность которых полагается равной нулю. Средняя плотность среды связана с введенными параметрами соотношением $\rho = \rho_c(W_c/W)$. Степень поврежденности среды характеризуется удельным объемом микроповреждений $V_f = W_f/(W\rho)$.

Система уравнений, описывающая нестационарное адиабатическое движение сжимаемой среды, состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии [6, 7]. Моделирование «отрывных» разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа [8]. Давление в неповрежденном веществе считается функцией удельного объема и удельной внутренней энергии и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми-Грюнайзена, в котором коэффициенты подбираются на основе констант ударной адиабаты Гюгоню. 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 [8 – 11]. Для решения задачи используется метод конечных элементов.

Инерционная схема нагружения

Рассматривается задача взаимодействия образца с матрицей, в которой имеются пересекающиеся под прямым углом каналы (рис. 1, а). В начальный момент времени образцу задается скорость v_0 и в дальнейшем образец движется по каналам по инерции. При этом на контактных поверхностях между образцом и внутренними поверхностями каналов матрицы реализованы условия идеального скольжения.

Процесс деформирования моделируется на примере титановых образцов шириной 16 и длиной 65 мм. Начальная скорость образцов варьируется в диапазоне 100 – 500 м/с. Угол пересечения каналов 90° , длина внешних сторон вертикального и горизонтального каналов матрицы 100 мм каждая. При пересечении каналов внутренний и внешний радиусы скругления равны 5,1 и 9,3 мм, соответственно. В начальный момент времени образец располагается в верхней части вертикального канала матрицы. Материал матрицы – высокопрочная сталь [6]. Были использованы следующие значения констант материала титанового образца: $\rho_0 = 4426$ кг/м³, $a = 4990$ м/с, $b = 1,05$, $G_0 = 41$ ГПа, $\sigma_0 = 0,5$ ГПа, $V_1 = 4,52 \cdot 10^{-6}$ м³/кг, $V_2 = 1,58 \cdot 10^{-6}$ м³/кг, $K_f = 0,005$ м·с/кг, $P_k = -0,75$ ГПа.

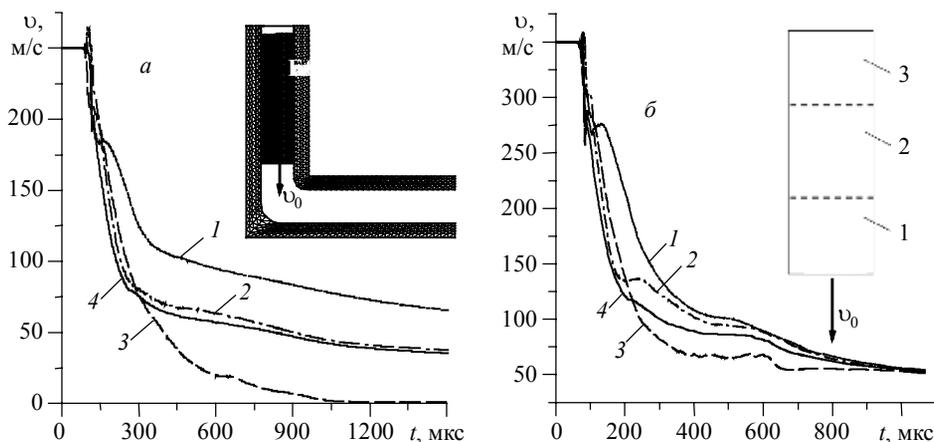


Рис. 1. Средние скорости титанового образца и его областей: (а) – начальная скорость образца 250 м/с, (б) – 350 м/с; кр. 1 – 3 соответствуют областям образца, кр. 4 – всему образцу

Для анализа динамики прохождения образцом пересечения каналов определялись скорости областей 1, 2 и 3, делящих образец на три равные части, причем область 1 – передняя часть образца (рис. 1).

Из результатов расчетов следует, что титановый образец останавливается во внутреннем канале матрицы, если его начальная скорость меньше 300 м/с, что иллюстрирует рис. 1, а для начальной скорости движения 250 м/с. При начальной скорости 350 м/с (рис. 1, б) примерно к 1000-й мкс процесса скорости частей образца уравниваются, и образец в дальнейшем продолжает двигаться со средней скоростью 52 м/с. Титановый образец в этом случае полностью проходит пересекающиеся каналы, что позволяет считать диапазон скоростей 300 – 350 м/с нижним порогом скорости, при которой обеспечивается прохождение титановых образцов по каналам при ДКУП. Однако при увеличении начальной скорости в образце возникают области роста удельного объема микроповреждений, которые могут привести к образованию макротрещин и разрушению образца. Для предотвращения таких последствий рассмотрена динамическая схема нагружения, в которой образец продавливается через каналы под постоянно действующим давлением, обусловленным действием пороховых газов.

Динамическая схема нагружения

На рис. 2 представлена общая схема нагружения, реализованная в экспериментах [5]. Для численного моделирования такого процесса рассматривается задача взаимодействия образца с пересекающимися каналами, которые описываются двумя ломаными линиями $A_1A_2A_3A_4$ и $B_1B_2B_3$ (рис. 3). Для системы основных уравнений в декартовой системе координат ставится задача с начальными при $t = 0$ и граничными условиями. Начальные условия характеризуются отсутствием внутренних напряжений, а причиной взаимодействия является движение образца с начальной скоростью v_0 , полученной при разгоне образца пороховыми газами в стволе пушки. Также на тыльной поверхности образца задается постоянная нагрузка P_0 , которая равномерно распределена по тыльной поверхности. Противоположная (лицевая) поверхность образца свободна от внешних нагрузок в течение

всего процесса деформирования. На границах $A_1A_2A_3A_4$ и $B_1B_2B_3$ ставится условие жесткой стенки. Для обеспечения равномерного движения тыльной поверхности образца узловые силы на этой поверхности находились из уравнения

$$F_i = -P_0 S m_i / M,$$

где F_i – компонента узловой силы i -го узла на тыльной поверхности образца, направленная вертикально вниз, S – площадь поверхности тыльного торца образца, m_i – масса i -го узла на тыльной поверхности образца, M – суммарная масса узлов тыльной поверхности образца.

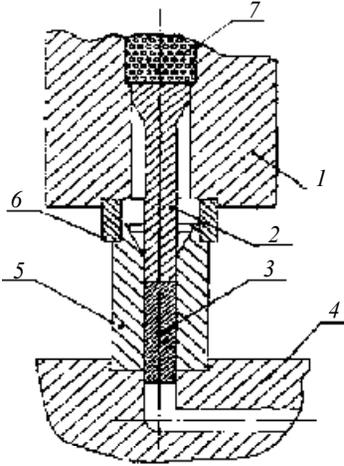


Рис. 2. Общая схема установки для динамического канально-углового прессования: 1 – ствол, 2 – поршень, 3 – образец, 4 – матрица, 5 – направляющая втулка, 6 – кольцо, 7 – пороховой заряд [5]

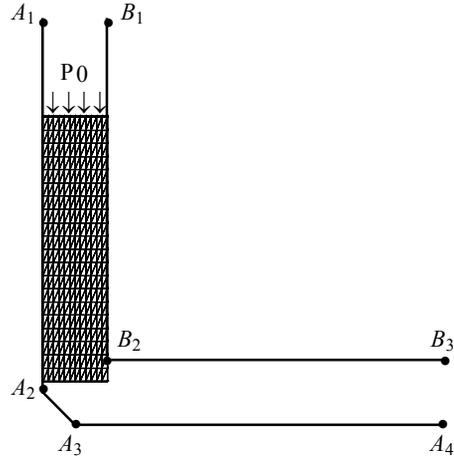


Рис. 3. Динамическая схема нагружения

Процесс динамического канально-углового прессования моделировали на примере титановых образцов шириной 16 и длиной 65 мм. Начальная скорость образцов варьировалась в диапазоне 0 – 500 м/с. Задаваемое давление составило 0,1 – 0,4 ГПа. Угол пересечения каналов 90° . В области внешнего угла пересечения каналов задана площадка A_2A_3 , составляющая с направляющими каналов угол 45° .

Расчеты показывают, что поле удельной энергии сдвиговых деформаций после прохождения образцом пересечения каналов распределено по образцу неравномерно, что в экспериментах приводит к неравномерному измельчению структуры образца [5]. Поле температур практически идентично полю удельной энергии сдвиговых деформаций, что свидетельствует о том, что температурный режим при ДКУП определяется в основном пластическим деформированием материала образца.

Формирующиеся в титановом образце области микрповреждений, в которых может наступить макроразрушение образца, представлены на рис. 4 и 5 при вариации начальных скоростей образца и действующего на него давления. На рис. 4, а также приведена легенда, идентичная для всех четырех рассматриваемых случаев.

Наибольшие градиенты удельного объема микрповреждений возникают в образце при пересечении каналов, причем формирование областей микрповреждений в основном обусловлено воздействием внутреннего угла матрицы. К харак-

терным особенностям начальной стадии процесса можно отнести формирование области повреждений в передней части образцов, охватывающей всю толщину образцов. Также имеют место деформации тыльной части образцов, форма которых качественно близка к экспериментальным [4]. Во всем исследованном диапазоне в образцах формируются качественно подобные области микроповреждений, в которых уровни поврежденности количественно также близки.

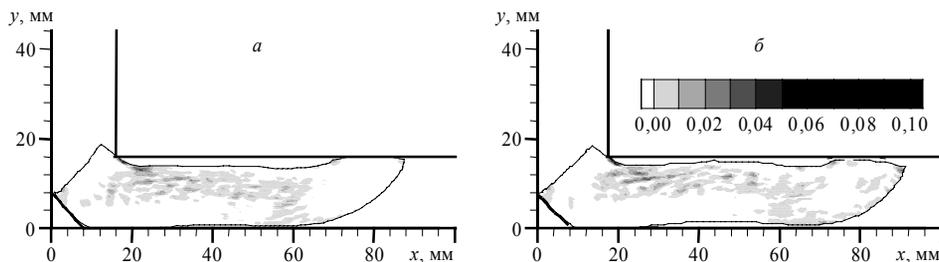


Рис. 4. Поля удельного объема микроповреждений ($\text{см}^3/\text{кг}$) в образце в момент времени 700 мкс: *a* – при начальной скорости 100 м/с, давлении 0,36 ГПа; *б* – при скорости 250 м/с, давлении 0,28 ГПа

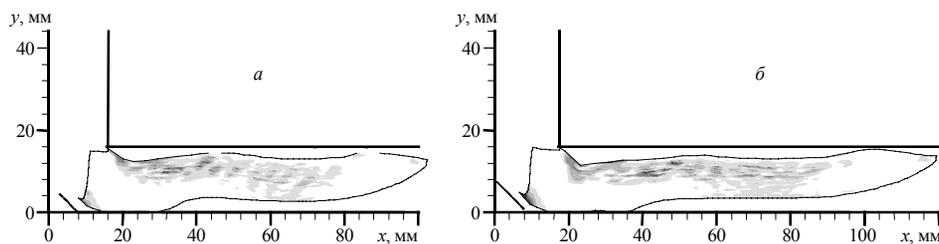


Рис. 5. Поля удельного объема микроповреждений ($\text{см}^3/\text{кг}$) в образце: *a* – в момент времени 600 мкс при начальной скорости 400 м/с, давлении 0,12 ГПа; *б* – в момент времени 400 мкс при начальной скорости 500 м/с, давлении 0,1 ГПа

Конечная форма образцов существенно зависит от начальных условий нагружения. Определяющим параметром является начальная скорость образца. Оптимальной формой, с точки зрения возможной повторной обработки образца, будет форма, близкая к первоначальной. Учитывая это, оптимальными параметрами при динамической схеме нагружения титанового образца будут: начальная скорость 200 – 250 м/с, давление 0,28 – 0,32 ГПа.

Заключение

Проведено численное исследование процессов деформирования титановых образцов при ДКУП – движении по пересекающимся под прямым углом каналам для двух схем нагружения: инерционной и динамической. Использование динамической схемы нагружения, по сравнению с инерционной, уменьшает время одного цикла ДКУП и приводит к снижению уровня удельного объема микроповреждений в образце. Распределение пластических деформаций (и, как следствие, измельчение структуры) титанового образца после одного цикла ДКУП при использовании как инерционной схемы нагружения, так и динамической неравномерно по образцу, что свидетельствует о необходимости дополнительных циклов.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Сегал В.М., Резников В.И., Дробышевский А.Е., Копылов В.И.* Пластическая обработка металлов простым сдвигом // Изв. АН СССР. Металлы. 1981. №1. С. 115–123.
2. *Валиев Р.З., Александров И.В.* Объемные наноструктурные металлические материалы. М.: Академкнига. 2007. 397 с.
3. *Минаев И.В., Жгилев И.Н., Шорохов Е.В. и др.* Моделирование процесса интенсивной пластической деформации при высокоскоростном нагружении металлов // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 3. С. 17–20.
4. *Хомская И.В., Зельдович В.И., Шорохов Е.В. и др.* Структура титана, подвергнутого высокоскоростному прессованию при различных температурах // Деформация и разрушение материалов. 2010. № 4. С. 15–19.
5. *Хомская И.В., Зельдович В.И., Шорохов Е.В. и др.* Высокоскоростное деформирование металлических материалов методом канально-углового прессования для получения ультрамелкозернистой структуры // Деформация и разрушение материалов. 2009. № 2. С. 36–40.
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. *Шипачев А.Н., Зелепугин С.А.* Численное моделирование процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2009. № 2(6). С. 109–115.
8. *Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е.* Ударно-волновые явления в конденсированных средах // М.: Янус-К. 1996. 407 с.
9. *Зелепугин С.А., Шпаков С.С.* Разрушение металло-интерметаллидного многослойного композита при высокоскоростном ударе // Механика композиционных материалов и конструкций. 2009. Т. 15. № 3. С. 369 – 382.
10. *Ivanova O.V., Zelepugin S.A., Yunoshev A.S., Silvestrov V.V.* A multicomponent medium model for reacting porous mixtures under shock wave loading // J. Energ. Materials. 2010. V. 28. Is. 1. P. 303–317.
11. *Зелепугин С.А., Иванова О.В., Юношев А.С., Сильвестров В.В.* Развитие реакции синтеза сульфида алюминия при взрывном нагружении цилиндрической ампулы // ДАН. 2010. Т. 434. № 5. С. 643–647.

Статья поступила 27.04.2011 г.

Suglobova I.K., Il'ina E.V., Shipachev A.N., Zelepugin S.A. SELECTION OF PARAMETERS FOR LOADING OF TITANIUM SAMPLES UNDER DYNAMIC CHANNEL-ANGULAR PRESSING. Deformation of titanium samples moving through orthogonally crossed channels under inertial and dynamic loading has been numerically investigated. Computations have been carried out by the finite element method in the context of the elastic-plastic medium model. The advantage of dynamic loading is shown and the optimum initial velocity of the sample and loading pressure are determined.

Keywords: dynamic channel-angular pressing, intensive plastic deformation, failure, numerical simulation, finite element method.

SUGLOBOVA Irina Konstantinovna (Tomsk State University)

E-mail: irina-ks@sibmail.com

IL'INA Elena Vladimirovna (Tomsk State University)

E-mail: ileo@sibmail.com

SHIPACHEV Aleksandr Nikolaevich (Tomsk State University)

E-mail: alex18023@mail.ru

ZELEPUGIN Sergey Alekseevich (Tomsk State University)

E-mail: szel@dsm.tsc.ru, szel@yandex.ru