

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ СХЕМЫ
КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

С.А. Зелепугин^{1,2}, А.Н. Шипачев^{1,2}, И.К. Суглобова²

¹ Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН, г. Томск, Россия

² Томский государственный университет, г. Томск, Россия

E-mail: szel@dsm.tsc.ru

Проведено численное исследование процессов деформирования титановых образцов при движении по пересекающимся под прямым углом каналам при использовании динамической схемы нагружения. Расчеты выполнены методом конечных элементов в плоской постановке в рамках модели упругопластической среды.

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.

Несмотря на активное развитие в последующие годы 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 [4]. Исследования такого необычного сочетания прочности и пластичности наноструктурных материалов имеют весьма важное как фундаментальное, так и практическое значение. С фундаментальной точки зрения эти исследования интересны для выяснения новых механизмов деформации. 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 методом конечных элементов в плоскодеформационной постановке в рамках упругопластической модели среды. В численных расчетах используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся возможностью зарождения и развития в ней микрповреждений. Общий объем среды W

составляют ее неповрежденная (сплошная) часть, занимающая объем W_c и характеризующаяся плотностью ρ_c , а также занимающие объем W_f микрповреждения, 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 трещин $V_f = W_f / (W\rho)$.

Система уравнений, описывающая нестационарное адиабатическое движение сжимаемой среды состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии [5-8]. Моделирование «отрывных» разрушений проводится с помощью кинетической модели разрушения активного типа. 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 Гюгио. 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 [7, 8]. Для решения задачи используется метод конечных элементов.

Динамическая схема нагружения

Рассматривается задача взаимодействия образца с пересекающимися каналами, которые описываются двумя ломаными линиями $A_1A_2A_3A_4$ и $B_1B_2B_3$ (Рис. 2). Для уравнений из приведенной выше модели 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 по пересекающимся под прямым углом каналам матрицы с начальной скоростью v_0 , полученной при разгоне образца пороховыми газами в стволе пушки. На границе ($A_1A_2A_3A_4$ и $B_1B_2B_3$) ставится условие жесткой стенки. На тыльной поверхности образца задается постоянная нагрузка P_0 , которая равномерно распределена по тыльной поверхности, противоположная поверхность образца свободна от внешних нагрузок в течение всего процесса деформирования.

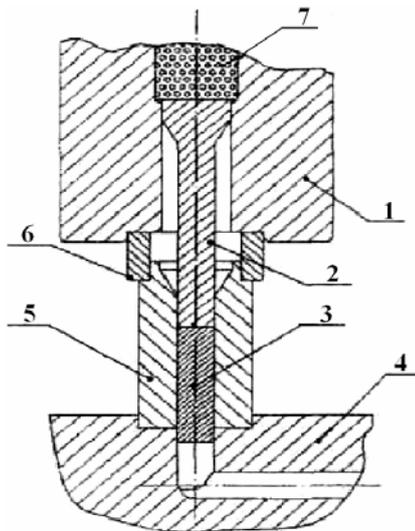


Рисунок 1. Общая схема установки для динамической деформации материала методом канально-углового прессования. 1 – ствол, 2 – поршень, 3 – образец, 4 – матрица, 5 – направляющая втулка, 6 – кольцо, 7 – пороховой заряд [4].

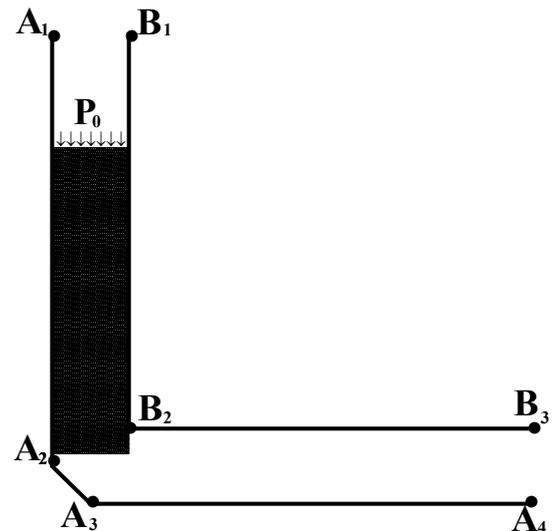


Рисунок 2. Начальные и граничные условия.

Вклад P_0 в узловые силы находился из уравнения:

$$F_i = P_0 \cdot S_R \cdot m_i / M,$$

где F_i – узловая сила i -го узла на тыльной поверхности образца, S_R – площадь поверхности тыльного торца образца, m_i – масса i -го узла, M – суммарная масса узлов тыльной поверхности образца.

Процесс динамического деформирования моделировали на примере титановых образцов шириной 16 мм и длиной 65 мм. Начальная скорость образцов варьировалась в диапазоне 100 – 500 м/с. Задаваемое давление – 0.0 – 0.4 ГПа. Угол пересечения каналов – 90° . В области внешнего угла стенок задана площадка V_1C_1 , составляющая с осями декартовой системы координат углы 45° . 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.

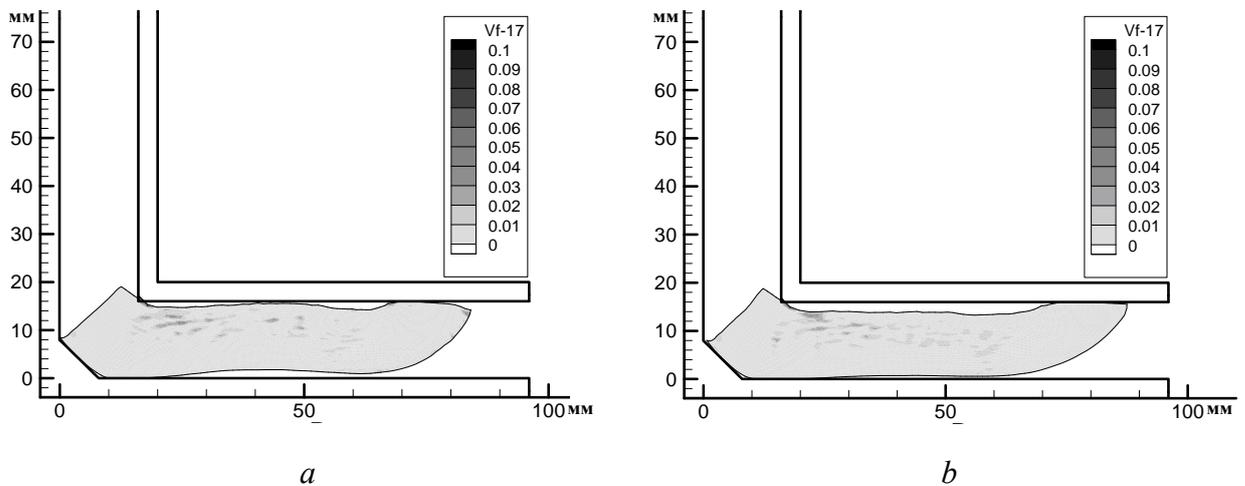


Рисунок 3. Поля удельного объема микрповреждений (в см³/кг) для титанового образца при начальной скорости 100 м/с, давлении 0.36 ГПа (а) и при начальной скорости 250 м/с, давлении 0.28 ГПа (б) в моменты времени 700 мкс.

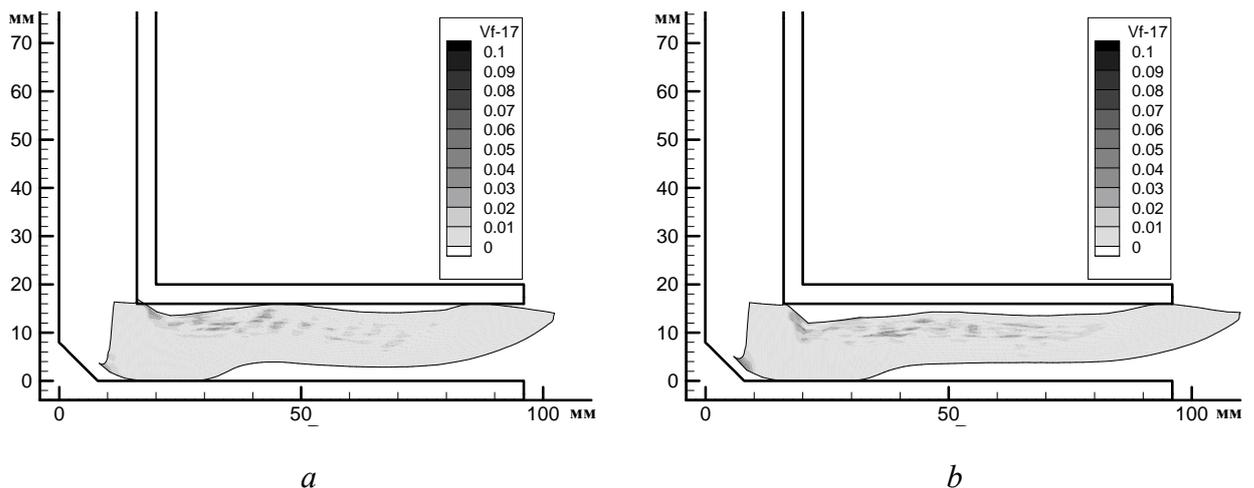


Рисунок 4. Поля удельного объема микрповреждений (в см³/кг) для титанового образца при начальной скорости 400 м/с, давлении 0.12 ГПа (а) и при начальной скорости 500 м/с, без давления (б) в моменты времени 700 мкс.

Расчеты показывают, что поле удельной энергии сдвиговых деформаций после прохождения образцом пересечения каналов распределено по образцу неравномерно, что приводит к также неравномерному измельчению структуры. Поле температур

практически идентично полю удельной энергии сдвиговых деформаций, что свидетельствует о том, что температурный режим при ДКУП определяется в основном пластическим деформированием материала заготовки. Наибольшие значения удельной энергии сдвиговых деформаций сосредоточены в области контакта и в срединной передней (А) части образца.

Формирующиеся в титановом образце области микроповреждений, в которых может наступить макроразрушение образца, представлены на рис. 3 и 4. Наибольшие градиенты возникают при пересечении каналов. Сравнивая рис. 3 и 4, можно сделать вывод, что увеличение скорости на 100-150 м/с приводит к значительному изменению геометрической формы образца. Оптимальной формой, для дальнейшей обработки материала, будет более компактная, но при скорости 100 м/с отмечены области высоких температур в А. Значительного роста удельного объема микроповреждений при увеличении начальной скорости не наблюдается.

Заключение

Проведен анализ полей удельной энергии пластических деформаций и удельного объема микроповреждений. Определены эффективные начальные параметры процесса (скорость, давление на пуансон), при которых обеспечивается прохождение образцов по каналам и их целостность. На основании полученных результатов расчетов установлено, что интенсивность пластических деформаций (и, как следствие, измельчение структуры) титанового образца после одного цикла ДКУП неравномерна по образцу, что свидетельствует о необходимости дополнительных циклов ДКУП.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 10-08-00516-а).

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.* Высокоскоростное деформирование металлических материалов методом канально-углового прессования для получения ультрамелкозернистой структуры // Деформация и разрушение материалов. – 2009. – № 2. – С. 36-40.
5. *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.
6. *Шипачев А.Н., Зелепугин С.А.* Численное моделирование процессов высокоскоростного ортогонального резания металлов // Вестник ТГУ. Математика и механика. – 2009. Т. 6. – № 2. – С. 109–115.
7. *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.
8. *Зелепугин С.А., Коняев А.А., Сидоров В.Н. и др.* Экспериментально-теоретическое исследование соударения группы частиц с элементами защиты космических аппаратов // Космические исследования. – 2008. – Т. 46. – № 6. – С. 559-570.