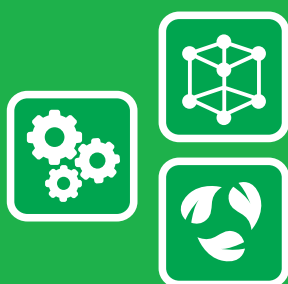


Совет научной молодежи ТНЦ СО РАН  
Институт сильноточной электроники СО РАН  
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН  
Институт оптики атмосферы СО РАН  
Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН  
Институт химии нефти СО РАН  
Отдел структурной макрокинетики ТНЦ СО РАН  
Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики СО РАН  
Центр исследований в области материалов и технологий  
Национального исследовательского Томского государственного университета

VI Всероссийская конференция молодых ученых



# МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКОЛОГИЯ В ТРЕТЬЕМ ТЫСЯЧЕЛЕТИИ

11-13 мая 2016 г., Томск

*Материалы конференции*

Томск  
Издательство ИОА СО РАН  
2016

УДК 004.9:502.171:535.33:539:551:621.3:661.1:665.61:681.5

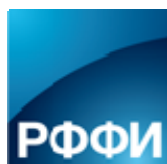
**Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии:** Материалы VI Всероссийской конференции молодых ученых [Электронный ресурс]. — Томск: Издательство ИОА СО РАН, 2016. — 1 CD-ROM. — PC Pentium 1 или выше; ОС Microsoft Windows; CD-ROM 16-х или выше; мышка.

Сборник включает доклады VI Всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технологии и экология в третьем тысячелетии». Обсуждаются результаты исследований молодых ученых России по следующим направлениям: сильноточная электроника; материаловедение; методы получения, исследования и обработки органических и неорганических материалов; атмосферная оптика, спектроскопия и лазерная физика; экология природных комплексов и методы исследования окружающей среды; химия нефти и физико-химические аспекты рационального природопользования; методы обработки и анализа информации.

Опубликованные материалы представляют интерес для специалистов, работающих в областях естественных и инженерных наук, а также аспирантов и молодых ученых, работающих в смежных направлениях, развиваемых в Томском научном центре.

Доклады печатаются на основе электронных форм, представленных авторами, которые и несут ответственность за содержание и оформление текста.

Ответственный за выпуск М. Надежкин



Конференция проведена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-38-10058).

ISBN 978-5-94458-157-0

## **СЕКЦИЯ 2.**

**Актуальные проблемы современного  
материаловедения. Физическая мезомеханика,  
компьютерное конструирование и разработка новых  
материалов**

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТРЕХМЕРНОЙ ПОСТАНОВКЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КАНАЛЬНО-УГЛОВОГО ПРЕССОВАНИЯ ТИТАНОВЫХ ОБРАЗЦОВ

В данной работе численно в трехмерной постановке исследуется 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 значения начальной скорости образца и действующего на образец давления, обеспечивающие успешное прохождение образца через пересечение каналов при незначительном уровне поврежденности материала и сохранении конечной формы образца, близкой к начальной.

Получение объемных наноструктурных и ультрамелкозернистых материалов является одним из активно развиваемых направлений в современном материаловедении. Динамическое канально-угловое прессование (ДКУП) – один из методов получения таких материалов посредством интенсивной пластической деформации. Данный метод является вариантом метода равноканального углового прессования, позволяющим повысить скорость пластического деформирования образца. Экспериментальные исследования показывают, что необходимы широкомасштабные численные исследования процессов ДКУП для выявления особенностей интенсивного пластического деформирования и установления эффективных параметров ДКУП.

В данной работе численное моделирование процесса ДКУП проводится в трехмерной постановке в рамках упругопластической модели среды [1-3]. Используется модель повреждаемой среды, характеризующаяся возможностью зарождения и эволюции в ней микроповреждений. Система уравнений, описывающая нестационарное адиабатическое движение сжимаемой среды состоит из уравнений неразрывности, движения, энергии:

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \mathbf{v}) &= 0, \\ \rho \frac{d v_i}{d t} &= \sigma_{ij,j}, \\ \frac{d E}{d t} &= \frac{1}{\rho} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij},\end{aligned}$$

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

Моделирование разрушений проводится с помощью кинетической модели активного типа, определяющей рост микроповреждений, непрерывно изменяющих свойства материала и вызывающих релаксацию напряжений:

$$\frac{d V_f}{d t} = \begin{cases} 0 & \text{при } (|P_c| \leq P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f = 0)) \\ -\operatorname{sign}(P_c) K_f (|P_c| - P^*) (V_2 + V_f) & \text{при } (P_c < -P^* \text{ или } (P_c > P^* \text{ и } V_f > 0)) \end{cases}$$

Давление в неповрежденном веществе считается функцией удельного объема сплошной части вещества и удельной внутренней энергии и во всем диапазоне условий нагружения определяется с помощью уравнения состояния типа Ми-Грюнаузена, в котором коэффициенты подбираются на основе констант ударной адиабаты Гюгонно. 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. Для решения задачи используется модифицированный метод конечных элементов без глобальной матрицы жесткости, предназначенный для решения задач высокоскоростного нагружения.

Процесс ДКУП моделируется на примере титановых образцов сечением 16x16 мм, длиной 65 мм. На тыльной поверхности образца задается постоянная нагрузка  $P$ , моделирующая давление пороховых газов. Угол пересечения каналов составляет  $90^\circ$  с наклонной площадкой под углом  $45^\circ$  в области внешнего угла. На границах каналов ставится условие жесткой стенки. В расчетах высо-

та наклонной площадки  $h = 4$  мм, величина начальной нагрузки  $P$ , начальная скорость образца  $v_0$  и расстояние  $H$  от лицевой поверхности образца до внешнего угла пересечения каналов варьируются.

Выполнена серия численных расчетов (при  $v_0 = 0$ ) для определения области значений нагрузки  $P$  и начального положения образца в вертикальном канале  $H$ , обеспечивающих успешное деформирование титанового образца и его полное прохождение по каналам. На рис. 2а представлено графическое изображение области параметров  $P - H$ . Область 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  $H$  ограничивается высотой наклонной площадки  $h = 4$  мм (штриховая горизонтальная линия на рис. 1а)

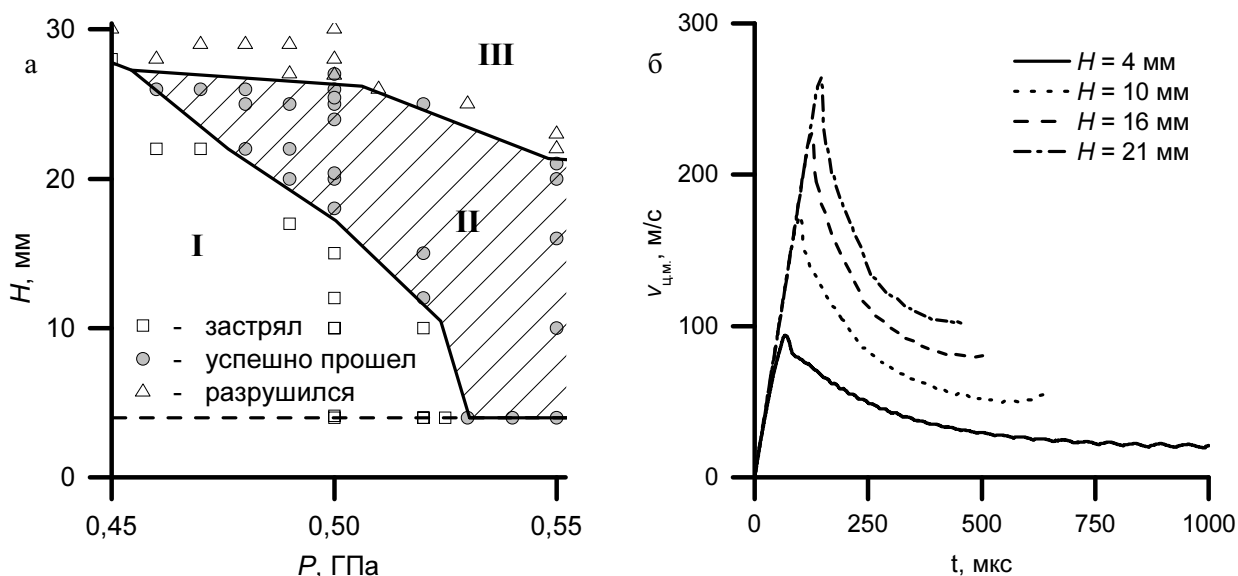


Рис. 1. Результаты численных расчетов: а) диаграмма процесса ДКУП титанового образца, б) изменение скорости центра масс образца при  $P = 0,55$  ГПа для фиксированных значений  $H$

На рис. 1б приведены графики изменения во времени средней скорости образца при постоянном значении  $P$ , равном 0,55 ГПа, 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/с<sup>2</sup>. Во всех четырех вариантах образец успешно проходит пересечение каналов, полное прохождение образца в горизонтальный канал происходит в момент обрыва графиков.

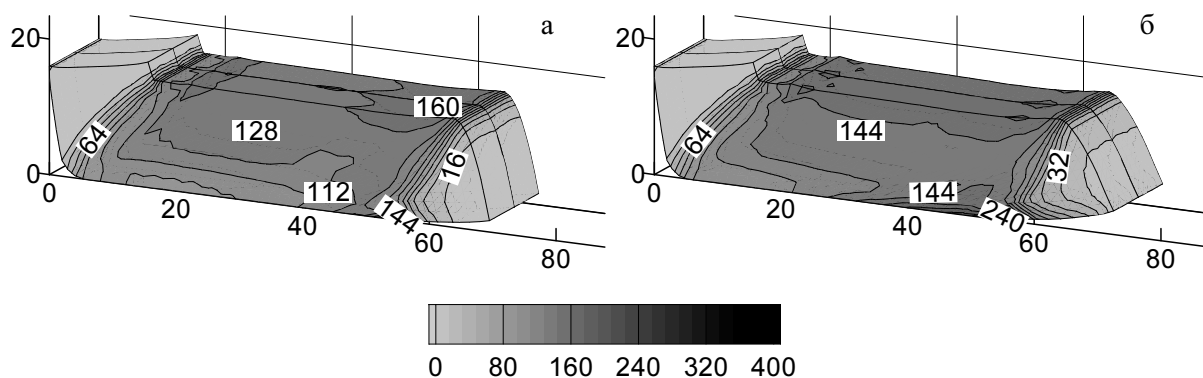


Рис. 2. Распределение удельной энергии сдвиговых деформаций (кДж/кг) в образце в момент окончания процесса ДКУП при нагрузке  $P = 0,55$  ГПа: а)  $H = 4$  мм,  $t = 1235$  мкс; б)  $H = 10$  мм,  $t = 638$  мкс. Размеры даны в мм.

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 кон-

такта со стенками каналов. Образец с увеличением скорости сильнее растягивается в направлении продольной оси, а в верхней части образца наблюдается увеличение области, содержащей микроповреждения (рис. 2-3).

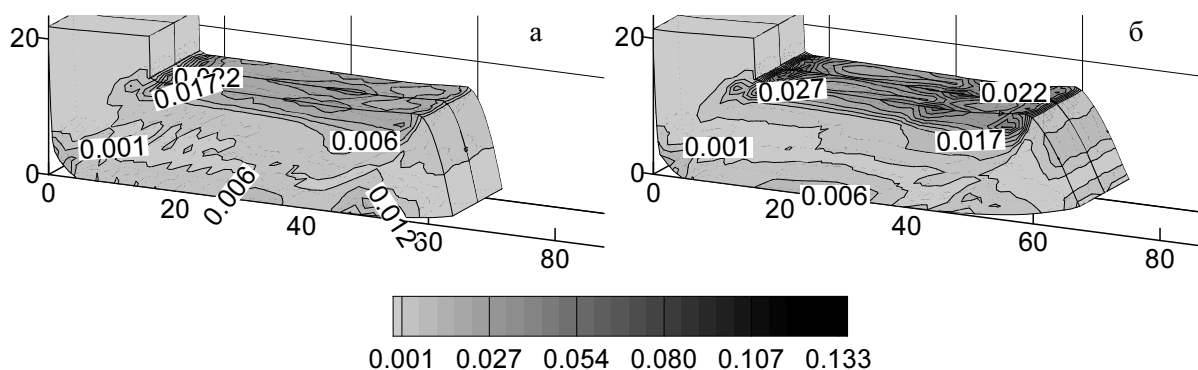


Рис. 3. Удельный объем микроповреждений ( $\text{см}^3/\text{г}$ ) в образце при нагрузке  $P = 0,55$  ГПа: а)  $H = 4$  мм,  $t = 1050$  мкс; б)  $H = 10$  мм,  $t = 550$  мкс. Размеры даны в мм.

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. При низких значениях  $P$  отмечается существенное различие времени полного прохождения образца через пересекающиеся каналы при изменении  $H$ , что обусловлено заметным влиянием начальной скорости образца в этой области. С ростом нагрузки влияние начального положения образца в вертикальном канале (иначе говоря, влияние начальной скорости образца) ослабевает, а дальнейшее уменьшение времени процесса обусловлено ускорением образца уже действием нагрузки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания №2014/223 (код проекта 1943).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Н. Шипачев, И.К. Суглобова, Е.В. Ильина, С.А. Зелепугин. Выбор параметров нагружения титановых образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2011. – № 2(14), с. 111-116.
2. А.Н. Шипачев, А.С. Зелепугин, Е.В. Ильина, С.А. Зелепугин. Моделирование динамического канально-углового прессования титановых образцов по двухпоршневой схеме нагружения // Деформация и разрушение материалов. 2012. – № 10, с. 7-11.
3. С.А. Зелепугин, А.С. Зелепугин, А.С. Бодров, Н.В. Олимпиева. Трехмерное моделирование процессов пластического деформирования металлических образцов при динамическом канально-угловом прессовании // Изв. вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 7/3. С.50–52.
4. А.С. Бодров, Н.В. Олимпиева, А.С. Зелепугин, С.А. Зелепугин. Численное моделирование процессов динамического канально-углового прессования титановых образцов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. 2015. №5(37). С. 56-63.
5. А.С. Бодров, А.С. Зелепугин. Влияние давления и скорости на процесс ДКУП титанового образца // Перспективы развития фундаментальных наук: сборник трудов XII Международной конференции студентов и молодых ученых. Национальный исследовательский Томский политехнический университет. Томск, 2015. С. 70-72.

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия

<sup>2</sup>Томский научный центр СО РАН, г. Томск, Россия

E-mail: [alex.bodrov@mail.ru](mailto:alex.bodrov@mail.ru)

Бодров Александр Станиславович, аспирант

Зелепугин Алексей Сергеевич, к.ф. -м.н.

Зелепугин Сергей Алексеевич, д.ф.-м.н., с.н.с.