

УДК 669.15:539.4(07)

И. Н. БУДИЛОВ, Ю. В. ЛУКАШУК

## АНАЛИЗ ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ТИТАНА ПРИ РАВНОКАНАЛЬНОМ УГЛОВОМ ПРЕССОВАНИИ И ВЛИЯНИЕ МНОГОПРОХОДНОСТИ

Приводятся результаты численного макро моделирования полей пластических деформаций при многопроходном равноканальном угловом прессовании (РКУП) в зависимости от маршрута деформирования. С использованием исходной изотропной модели материала установлено наличие в заготовке зон с разным уровнем эквивалентной пластической деформации, образующихся вследствие неоднородного пластического течения материала в канале. Показано, что неоднородность деформирования зависит от маршрута РКУП, конструкции оснастки и количества проходов. *Равноканальное угловое прессование; наноструктура; численные методы механики деформируемого твердого тела*

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы большое число работ посвящено исследованию наноструктурных материалов вследствие их уникальных свойств. Металлы с измельченными до наноразмеров зернами обладают физико-механическими свойствами, существенно отличающимися от крупнокристаллических материалов. Результаты экспериментальных исследований свидетельствуют о существенном повышении характеристик статической и циклической прочности, а также высокоскоростной сверхпластичности, что представляет значительный практический интерес [1].

Получение наноструктурных материалов осуществляется с использованием методов интенсивной пластической деформации, среди которых значительное распространение получило равноканальное угловое прессование (РКУП), позволяющее производить многопроходное деформирование по различным маршрутам с высоким уровнем пластических деформаций.

Экспериментальное исследование РКУП требует значительных финансовых затрат даже при наличии необходимого оборудования. В этой связи использование методов компьютерного моделирования, основанных на численных методах механики деформируемого твердого тела, позволяет произвести предварительный анализ напряженно-деформированного состояния и рационализировать как процесс создания оснастки, так и выбор схемы деформирования [2, 3].

В настоящей работе представлены некоторые результаты численного моделирования многопроходного процесса РКУП заготовок из коммерчески чистого титана с использованием вычислительного комплекса DEFORM-3D v.5.1.

### 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ

Задача расчета пластического деформирования материала при РКУП в условиях больших пластических деформаций решалась на основе теории течения. Полная система уравнений вязкопластического неадиабатического течения металла включала в себя: уравнения движения, кинематические соотношения, уравнение несжимаемости, уравнение теплопровод-

ности, реологическое уравнение, механические и тепловые граничные и начальные условия и определяющие соотношения, связывающие девиаторы тензоров скоростей деформации и напряжений.

В качестве модели материала была использована одна из распространенных зависимостей, описывающих изотропное упрочнение материала заготовки в виде:

$$\sigma_y = A(\varepsilon_0 + \bar{\varepsilon})^m + B\dot{\varepsilon}^n, \quad (1)$$

где  $\sigma_y$  – напряжение текучести;  $\dot{\varepsilon}$  – скорость эквивалентной пластической деформации;  $\bar{\varepsilon}$  – эквивалентная пластическая деформация;  $\varepsilon_0 = (\sigma/A)^{1/m-1}$ ;  $n, m$  – константы материала ( $m=0,122$ ;  $A=204,6$ ).

Распределение эквивалентной пластической деформации в зависимости от времени процесса осуществлялось по формуле:

$$\varepsilon_i^p = (2/3 \cdot \varepsilon_{ij}^p \cdot \varepsilon_{ij}^p)^{1/2}. \quad (2)$$

где  $\varepsilon_i^p$  – величина пластических деформаций;  $\varepsilon_{ij}^p$  – девиаторная часть тензора деформаций.

Величина  $\varepsilon_i^p$  определялась в точках интегрирования конечного элемента и автоматически пересчитывалась в узловое значение, что позволило оценить ее распределение в пределах объема заготовки.

Для расчетов РКУП были выбраны следующие параметры: внутренний радиус канала  $r=1$  мм; внешний радиус канала  $R=1$  мм; коэффициент трения  $f=0,1$ ; скорость деформирования – 6 мм/с; поперечное сечение заготовки квадратное  $8 \times 8$  мм; длина заготовки 60 мм; число конечных элементов в КЭМ заготовки в исходном состоянии – 20320 (до реализации алгоритма автоматического измельчения сетки).

При моделировании заготовки из титана были использованы следующие механические характеристики: модуль Юнга  $E=1,15 \times 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu=0,34$ ; предел текучести  $\sigma_{0,2}=280$  МПа; предел прочности  $\sigma_b=300$  МПа при температуре 450 °С. Кривые деформирования титана представлены на рис. 1.

Выбор моделей обусловлен вычислительными возможностями применяемого кода Deform 3D. Стенки канала считались абсолютно жесткими. Давление прикладывалось к верхней части заготовки. В качестве привода был выбран гидравлический пресс с максимальным усилием  $P_{\max}=100,0$  кН.

Общий вид твердотельных моделей РКУП для маршрутов С и Вс РКУП представлен на рис. 2.

## 2. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Основной интерес для разработки технологии РКУП представляет анализ напряженно-деформированного состояния заготовок из коммерчески чистого титана в зависимости от числа проходов и маршрута деформирования.

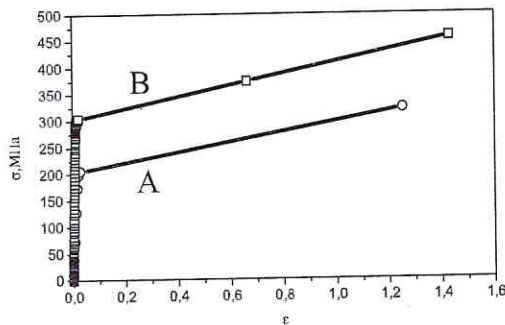


Рис. 1. Кривые деформирования коммерчески чистого титана в исходном состоянии при  $T=450^\circ$  (А) и после второго и более проходов (В) при  $T=450^\circ\text{C}$

На рис. 3 представлены результаты расчета полей эффективных пластических деформаций  $\epsilon_{eff}^{pl}$  после первого прохода и после шестого прохода при деформировании по маршрутам С и Вс.

Приведенные результаты свидетельствуют о существенном влиянии маршрута деформирования на величину и распределение эффективной пластической деформации по объему заготовки.

Более детальное представление о характере протекающих пластических деформаций дают графики эффективной пластической деформации  $\epsilon_{eff}^{pl}$ , построенные по линиям АВ, CD, EF (рис. 4).

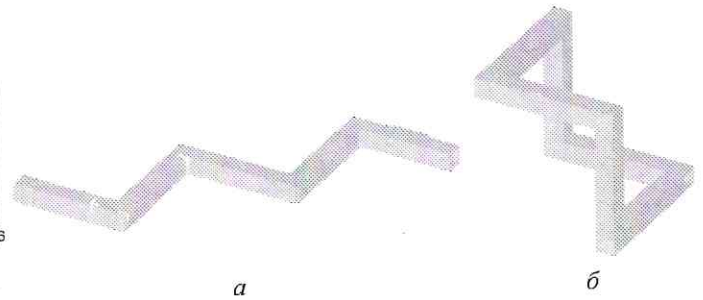


Рис. 2. Расчетные модели для РКУП: а – по маршруту С, б – по маршруту Вс

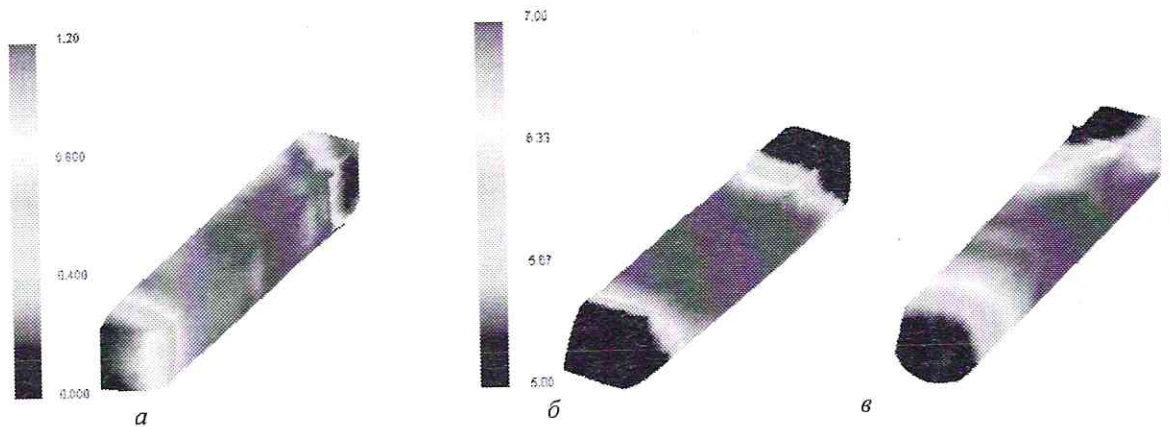


Рис. 3. Распределение полей эффективных пластических деформаций  $\epsilon_{eff}^{pl}$ : а – после первого прохода; б – после шестого прохода при деформировании по маршруту С; в – после шестого прохода при деформировании по маршруту Вс

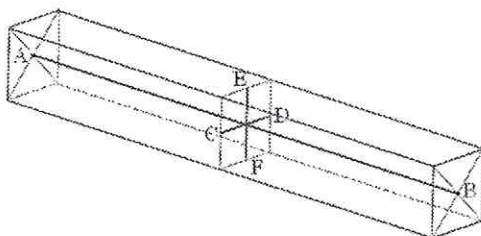


Рис. 4. Линии построения графиков

На рис. 5–7 показано распределение эффективной пластической деформации по срединным линиям заготовки в продольном и поперечном сечении после первого, второго третьего и шестого проходов. При построении графиков концевые области заготовки были исключены (равные размеры с противоположных концов).

На рис. 5,а показано распределение эффективной пластической деформации по срединной продольной линии АВ заготовки после первого и второго проходов по маршрутам С и Вс. Установлено, что равномерность вдоль выбранного направления после маршрута Вс выше, чем после маршрута С. При этом

общая неравномерность деформаций после второго прохода увеличивается. Разброс значений  $\epsilon_{eff}^{pl}$  составляет после первого прохода – от 0,5 до 1,22; после второго прохода по маршруту С – от 1,49 до 2,49; по маршруту Вс – 2,00 – 2,40.

На рис. 5, б, в показаны графики распределения деформаций в поперечных сечениях по линиям CD и EF для первого и второго проходов. Установлено, что после второго прохода неравномерность распределения деформаций возрастает как для маршрута Вс, так и для маршрута С. Причем вдоль одного из направлений наибольшая неравномерность  $\Delta\epsilon_{eff}^{pl}$  фиксируется для маршрута Вс и составляет 0,12.

На рис. 6 показано распределение эффективной пластической деформации по срединным линиям заготовки в продольном и поперечном сечении после третьего прохода. На рис. 6, а показано распределение эффективной пластической деформации по срединной продольной линии АВ заготовки после третьего прохода по маршрутам С и Вс. Установлено, что равномерность вдоль выбранного направления после маршрута Вс выше, чем после маршрута С. Разброс значений  $\epsilon_{eff}^{pl}$  составляет для маршрута С – от 2,10 до 3,65; для маршрута Вс – 2,90– 3,60.

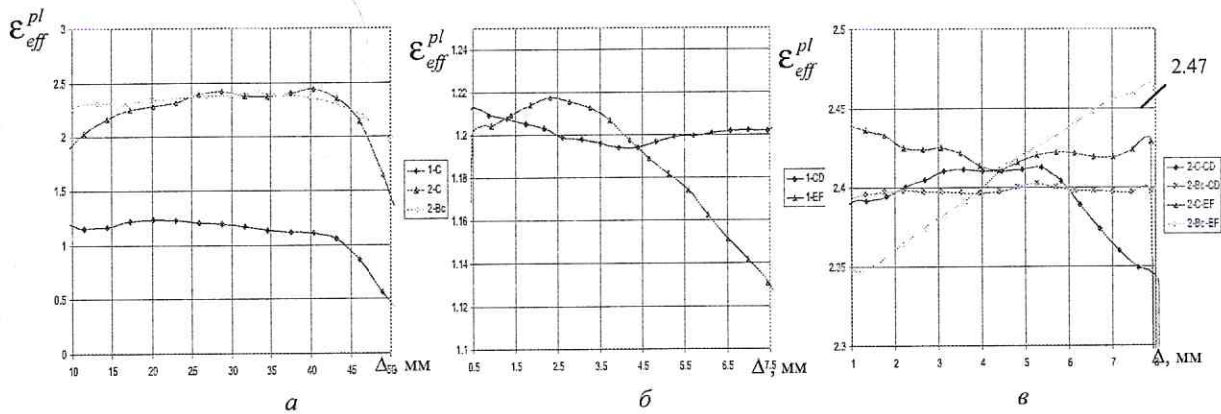


Рис. 5. Распределение эффективной пластической деформации при РКУП титана: а – по линии АВ; б – по линии CD и EF после первого прохода; в – по линии CD и EF после 2 прохода

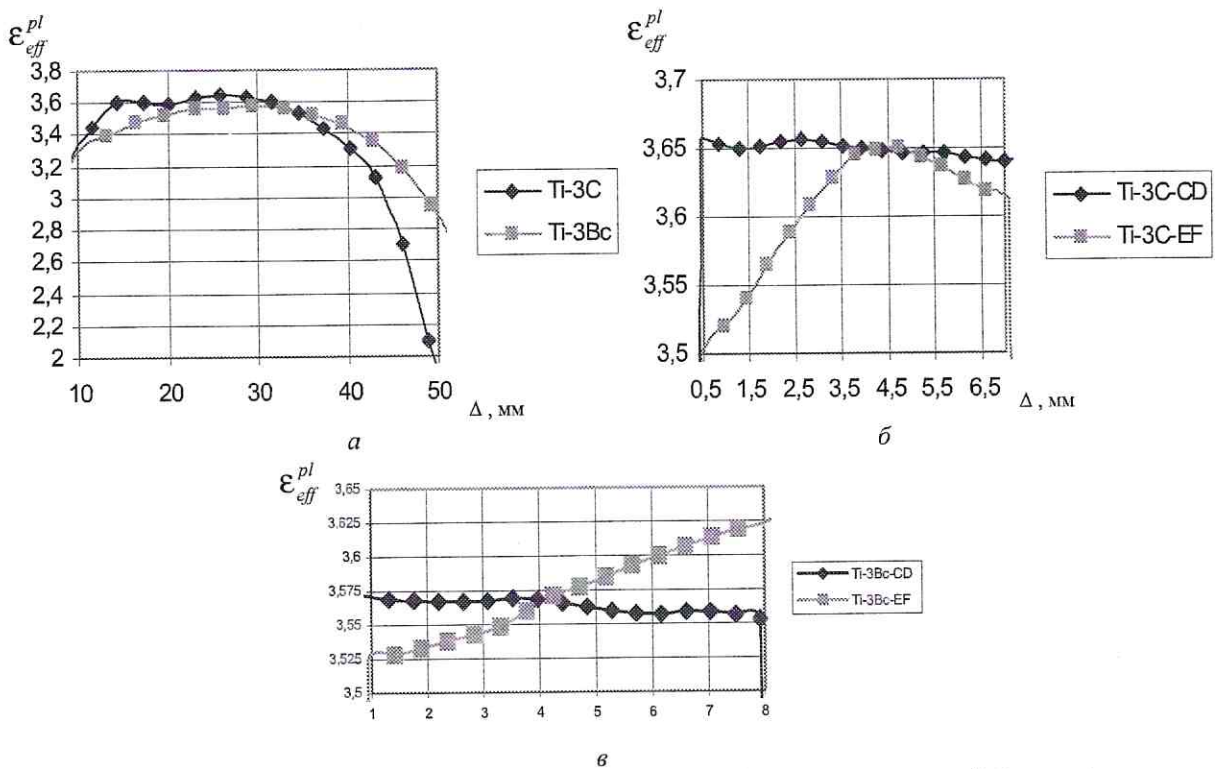


Рис. 6. Распределение эффективной пластической деформации при РКУП титана (3-й проход): а – по линии АВ; б – по линии CD; в – по линии EF

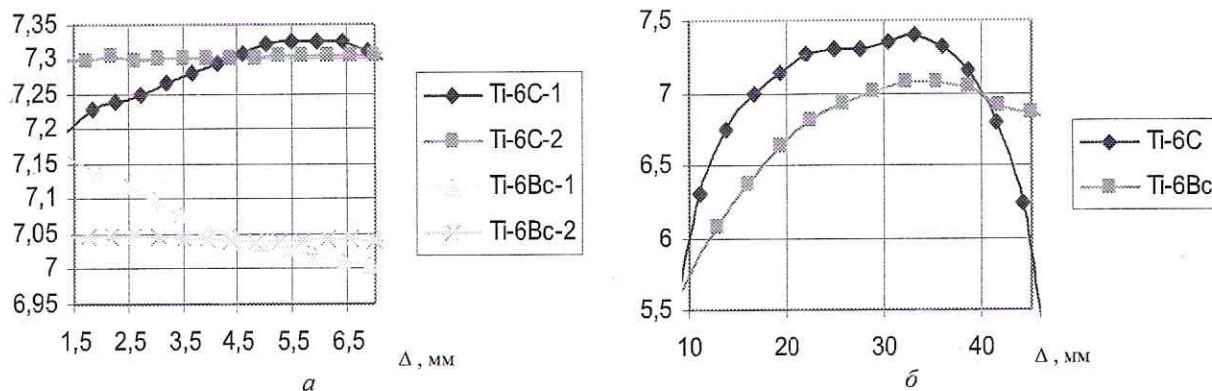


Рис. 7. Распределение эффективной пластической деформации при РКУП титана (шестой проход): а – по линиям CD и EF; б – по линии AB

На рис. 6, б в показаны графики распределения деформаций в поперечных сечениях по линиям CD и EF после третьего прохода РКУП по маршрутам С (рис. 3, б) и Вс (рис. 3, в).

Установлено, что после третьего прохода в основном сохраняется характер распределения пластических деформаций по сечению заготовки. В одном из направлений (CD) поперечного сечения наблюдается высокий уровень равномерности с колебаниями, не превышающими 0,01. В другом ортогональном направлении (EF) неравномерность на порядок выше и составляет 0,1, что связано наличием нижнего непроработанного участка заготовки.

На рис. 7 показаны графики распределения деформаций в поперечных сечениях по линиям CD (1) и EF (2) для шестого прохода по маршрутам С и Вс.

После шестого прохода распределение деформаций в поперечных сечениях для маршрута С стало более равномерным.

Общее изменение величины деформации в продольном направлении составило: для маршрута С – 6,3–7,4; для маршрута Вс – 6,1–7,1.

### ВЫВОДЫ

Рассмотрено распределение полей эффективных пластических деформаций в объеме заготовки из коммерчески чистого титана на основе использования численных методов (МКЭ) механики деформируемого твердого тела при реализации многопроходного равноканального углового прессования по двум различным маршрутам деформирования.

Установлено, что при многопроходном процессе уровень максимальных накопленных пластических деформаций практически линейно зависят от числа проходов. Кроме того, после трех и более проходов

изменение маршрута РКУП с Вс на С приводит к незначительному изменению уровня максимальных эквивалентных пластических деформаций.

Неоднородность пластического течения материала заготовки обуславливается наличием контактного трения между заготовкой и оснасткой. Выявлено, что конфигурация зон неоднородности распределения пластических деформаций в объеме заготовки существенно зависит от маршрута РКУП, конструкции оснастки и количества проходов.

Использование компьютерного моделирования при анализе процесса РКУП позволяет рационализировать параметры оснастки и выбор маршрута деформирования для достижения оптимальной наноструктуры материала заготовки.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Валиев, Р. З.** Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р. З. Валиев, И. В. Александров. М.: Логос, 1999. 320 с.
2. **Александров, И. В.** Анализ протекания пластических деформаций в наноструктурных материалах при равноканальном угловом прессовании / И. В. Александров, И. Н. Будилов // Труды международного конгресса по конечно-элементным технологиям. Германия, Подсдам, 2002. С. 506–512.
3. **Рааб, Г. И.** Влияние технологических факторов на деформированное состояние при равноканальном угловом прессовании / Г. И. Рааб, И. В. Александров, И. Н. Будилов, Л. О. Шестакова // Перспективы технологии физико-химической размерной обработки и формирования эксплуатационных свойств металлов и сплавов: тр. конф. Уфа, 2001. С. 295–301.