

ОСТАТОЧНЫЕ МЕЗОНАПРЯЖЕНИЯ И ИХ АНАЛИЗ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДВУХУРОВНЕВОЙ МОДЕЛИ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ

Е.И.ОВЧИННИКОВ, П.С.ВОЛЕГОВ

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: efm620@gmail.com

Исследование остаточных напряжений, возникающих в процессах термомеханической обработки поликристаллических материалов, является непростой задачей, поскольку такое исследование сопряжено с необходимостью изучения внутренней структуры материала [1]. Существует большое количество экспериментальных методов исследования остаточных напряжений, однако подавляющее большинство из них обладают существенными недостатками (например, высокой трудоемкостью, стоимостью, необходимостью полного или частичного разрушения образца и др.), а также не позволяют решать задачу наведения заданных, заранее известных, остаточных напряжений, поэтому использование таких методов для создания т.н. «функциональных материалов» является невозможным. Альтернативой проведению натуральных экспериментов является построение математических моделей неупругого деформирования металлов, позволяющих, в том числе, исследовать остаточные напряжения. Необходимость описания внутренней структуры в математических моделях обусловлена спецификой задачи, а именно, необходимостью описания остаточных напряжений, которые возникают в отдельных структурных элементах – кристаллитах.

В работе исследуется возможность изучения остаточных напряжений в рамках двухуровневой статистической модели неупругого деформирования поликристаллического агрегата, построенной на базе физических теорий пластичности [2]. Особое внимание уделяется определению влияния дополнительных механизмов деформирования, таких как развороты (ротации) кристаллических решеток и упрочнение, на образование остаточных напряжений, а также зависимости возникающих остаточных напряжений от используемой статистической гипотезы связи масштабных уровней.

В работе рассматриваются две статистические гипотезы, позволяющие передавать воздействие с макро- на мезоуровень двухуровневой математической модели. Первой из рассмотренных гипотез является гипотеза Фойгта:

$$\zeta = \mathbf{Z}, \quad (1)$$

где \mathbf{Z} – мера скорости деформаций на макроуровне, ζ – мера скорости деформаций на мезоуровне.

Вторая рассмотренная гипотеза – гипотеза Крёнера:

$$\langle \mathbf{s} \rangle - \mathbf{s}^{(i)} = m^{(i)} (\mathbf{e}^{(i)in} - \langle \mathbf{e}^{in} \rangle), \quad (2)$$

где $\mathbf{s}^{(i)}, \mathbf{e}^{(i)in}$ – девиаторы мер напряжений и неупругих деформаций i -ого зерна, $\langle \mathbf{s} \rangle, \langle \mathbf{e}^{in} \rangle$ – осредненные с мезоуровня значения девиаторов мер напряжений и неупругих деформаций, $m^{(i)}$ – константа материала для i -ого зерна.

Первая часть численных экспериментов посвящена определению влияния механизмов упрочнения и ротаций кристаллических решеток на образование остаточных напряжений. Для этого были проведены численные эксперименты, имитирующие одноосное растяжение и последующую упругую разгрузку представительного объема поликристалла, содержащего 1000 зерен, обладающего характеристиками, соответствующими параметрам чистой меди, без учета механизмов упрочнения и ротаций, а также с учетом этих механизмов. Подробное описание подмоделей ротаций и упрочнения приведено, например, в работах [3–4]. Полученные распределения относительной доли кристаллитов по средней величине параметра Надаи-Лоде приведены на рис. 1, а.

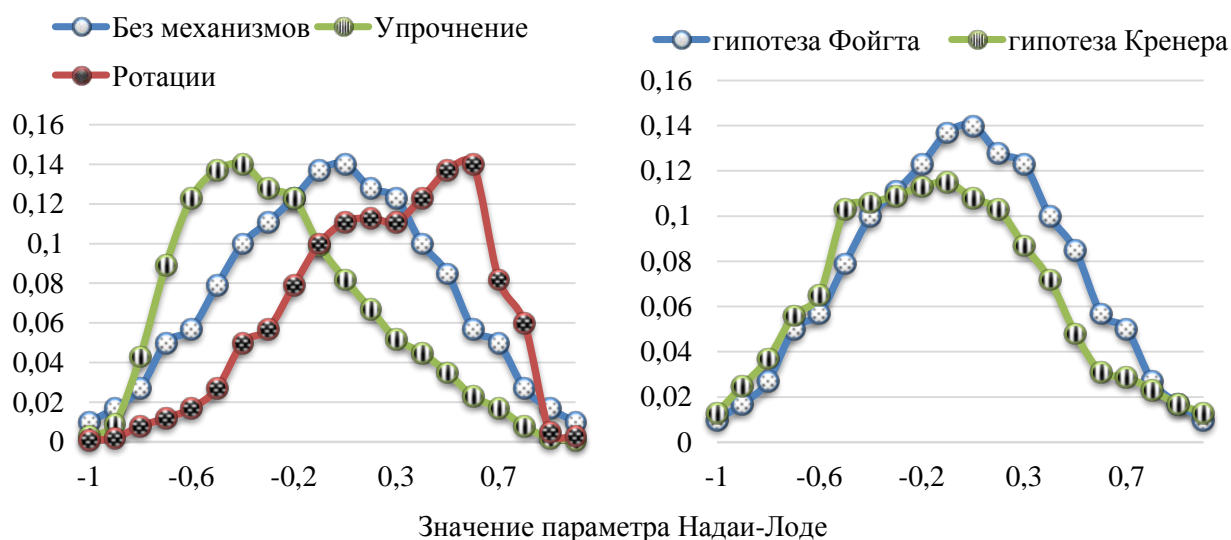


Рисунок 1 – Распределения относительной доли кристаллитов по значению параметра Надаи-Лоде: а – в случае учета различных механизмов деформирования, б – в случае использования различных гипотез

Анализируя результаты, представленные на рис. 1 а., можно заметить, что в случае, если механизмы ротаций и упрочнения не рассматриваются, после разгрузки большая часть зерен находится в напряженном состоянии сдвига (среднее значение распределения близко к 0), что можно объяснить тем, что единственный рассматриваемый механизм деформаций в этом случае – сдвиговой (скольжение краевых дислокаций). При учете механизма ротаций распределение смещается ближе к значению 1, что говорит о том, что напряженное состояние зерен стремится к одноосному напряженному состоянию как к наиболее энергетически выгодному. При учете механизма упрочнения распределение смещается в сторону значения -1, то есть предпочтительным типом напряженного состояния в этом случае является плоское напряженное состояние (ПНС).

На рис. 1, б продемонстрированы аналогичные результаты для эксперимента с использованием различных статистических гипотез. Из анализа рис. 1. б можно сделать вывод о том, что остаточные напряжения, исследуемые в рамках используемой модели, не являются прямым следствием применения гипотезы Фойгта, так как возникают и при использовании гипотезы Кренера, а значит дальнейшее описание остаточных напряжений в рамках двухуровневой модели неупругого деформирования является корректным.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ №МК-1298.2017.1.

Список литературы

1. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Сварные конструкции. Прочность сварных соединений и деформации конструкций. – М.: Высшая школа, 1982. – 272 с.
2. Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. – 244 с.
3. Тельканов М.А., Волегов П.С. Описание ротаций кристаллических решеток и фрагментации зерен при интенсивных неупругих деформациях поликристаллов// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 3. – С. 1338-1341.
4. Озерных В.С., Волегов П.С. Описание механизмов упрочнения при неупругом деформировании поликристаллов// Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. – 2016. – Т. 21, № 3. – С. 1203-1206.