

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ ВБЛИЗИ ГРАНИЦ ЗЕРЕН В ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛАХ

*В.С. ОЗЕРНЫХ, П.С. ВОЛЕГОВ*

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

E-mail: ozernykh@yandex.ru

При интенсивных неупругих деформациях поликристаллических материалов важно учитывать эволюцию внутренней структуры материала. Внутренние поля напряжений, затормаживающие или ускоряющие движение дислокаций, способствуют развитию процессов упрочнения, разупрочнения и накопления поврежденности, наблюдаемых на уровне мезоскопической структуры материала. Особое значение при этом имеют эволюционирующие в процессе деформирования поля напряжений, возникающие вблизи границ зерен в результате формирования сложных дефектных структур в приграничной области.

Под упрочнением на макроуровне (уровне образца или конструкции) обычно понимают увеличение предела текучести материала. Физические причины, приводящие к упрочнению, весьма разнообразны: упрочнение связывают с взаимодействием дислокаций между собой и со скоплениями дислокаций [1]. Существенное влияние на величину предела текучести оказывает наличие границ зерен в поликристалле [2, 3], поскольку границы зерен являются мощным препятствием для движения дислокаций, а, следовательно, и причиной увеличения критических напряжений сдвига дислокаций. В связи с этим, возникает необходимость физически корректного описания различных эффектов, связанных с взаимодействием дислокаций друг с другом, а также с границами зерен [4].

Для описания процессов, приводящих к разрушению материала, удобно ввести понятие «поврежденность». Под поврежденностью понимается некоторая (скалярная или тензорная) мера, характеризующая количество специальных дефектов (типа микротрещин или микропор) в рассматриваемом материале в данный момент деформирования. Изменение меры поврежденности в процессе деформирования происходит непрерывно или скачкообразно. По достижению этой мерой некоторого критического значения можно предсказать момент разрушения материала. По типу механизмов и локализации дефектов поврежденность можно разделить на внутриверненную и межзеренную. В рамках работы рассматривается механизм межзеренного накопления поврежденности, для которого характерно образование и развитие дефектов вблизи границ зерен.

При переходе решеточной дислокации из одного зерна в другое сквозь границу, в границе остается т.н. дислокация ориентационного несоответствия (ДОН). ДОНы создают поля напряжений, препятствующие (или способствующие) дальнейшему движению дислокаций в данной системе скольжения [5]. Увеличение напряжений, необходимых для движения дислокации в направлении границы зерна, приводит к возникновению явления зернограничного упрочнения.

В работе показано, что появление поля внутренних напряжений ДОН может привести к блокировке системы скольжения в направлении «к границе», что в свою очередь, приводит к формированию скоплений дислокаций одного знака вблизи границы. При определенных условиях может произойти слияние головных дислокаций скопления и формирование микротрещины. Предложен способ учета внутренних напряжений через введение «обратных» напряжений в соотношении для скоростей сдвигов дислокаций по системам скольжения. Рассчитаны критические значения эффективных напряжений, достижение которых может привести к появлению микротрещин вблизи границы, получены эволюционные уравнения для плотности такого рода дефектов. Кроме того, явным образом учитывается средний размер зерна в материале; получено, что материал с более мелким зерном обладает повышенными прочностными характеристиками.

Показано, что поврежденность материала (как мера плотности микроповреждений) в процессе деформирования может как увеличиваться, так и уменьшаться. В ходе работы получено, что блокировка системы скольжения в некоторых случаях приводит к активизации

новых, т.н. вторичных систем скольжения, вследствие чего дислокации «обходят» барьер, образованный на системе скольжения, благодаря чему поврежденность материала снижается.

Проведены численные эксперименты по деформированию ОЦК поликристалла, состоящего из 1000 зерен, упругопластические характеристики которого соответствуют стали 45.

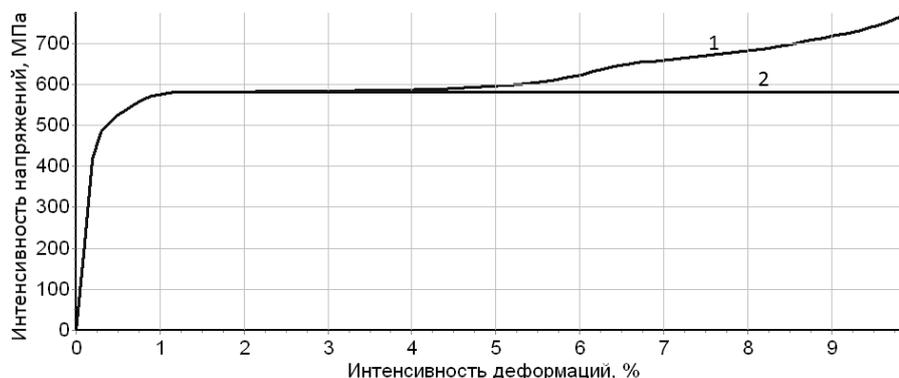


Рисунок 1 – Диаграммы интенсивность напряжения – интенсивность деформации без упрочнения (кривая 2) и с упрочнением (кривая 1)

Анализируя кривые, представленные на рисунке 1, можно заметить, что после достижения интенсивности деформаций порядка 4% необходимо прикладывать все большие усилия для продолжения деформирования (рисунок 1, кривая 1), если моделирование проводится с учетом зернограницного упрочнения. При этом видно, что при интенсивности деформаций в 6,5% происходит активизация механизма дополнительного упрочнения за счет внутренних полей напряжений, вызванных формированием ДОНов.

Таким образом, в работе получено и оценено поле внутренних напряжений, создаваемое ДОНами на подходящие дислокации из зерна к границе. Получено, что такое поле внутренних напряжений может как тормозить, так и разгонять решеточные дислокации, в зависимости от направления движения последних. Изучено влияние полей напряжений, создаваемых ДОН, на процессы накопления поврежденности материала. Исследованы процессы деформирования поликристаллов, приводящие к эволюции плотности микроповреждений.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ 17-19-01292.*

#### Список литературы

1. Трусов П.В., Волегов П.С., Нечаева Е.С. Многоуровневые физические модели пластичности: теория, алгоритмы, приложения// Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4-4. – С. 1808-1810.
2. Trusov P.V., Shveykin A.I., Nechaeva E.S., Volegov P.S. Multilevel models of inelastic deformation of materials and their application for description of internal structure evolution// Physical Mesomechanics. – 2012. – Т. 15, № 3-4. – С. 155-175.
3. Shen Y.F., Lu L., Lu Q.H., Jin Z.H., Lu K. Tensile properties of copper with nano-scale twins// Scripta Materialia. – 2005. – № 52. – С.989–994.
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.
5. Кондратьев Н.С., Трусов П.В. Описание упрочнения систем дислокационного скольжения за счет границ кристаллитов в поликристаллическом агрегате// Вестник ПНИПУ. Механика. – 2012. – № 3. – С. 78-97.