

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕУПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОФАЗНЫХ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ УПРОЧНЕНИЯ И НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

В.С. Озерных

Научный руководитель: доцент, к.ф.-м.н. П.С. Волегов
Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Россия, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, 614990
E-mail: ozernykh@yandex.ru

При исследовании интенсивных неупругих деформаций поликристаллических материалов важно учитывать эволюцию внутренней структуры материала, в том числе его дефектной подсистемы. Описание эволюции дислокационной структуры в физических теориях пластичности [1] вводят через соотношения, определяющие зависимость изменения критических сдвиговых напряжений на каждой из систем скольжения в зависимости от различных параметров (внутренних переменных). Кроме того, в результате взаимодействия решеточных дислокаций с границами зерен могут возникать внутренние поля напряжений, препятствующие, или наоборот, способствующие движению решеточных дислокаций и, таким образом, приводящие к активизации или блокировке систем скольжения.

Наибольший интерес в исследовании может представлять изучение структуры и поведения при деформировании многофазных материалов, поскольку такие материалы имеют широкое применение в промышленности. Существенное влияние на улучшение физико-механических свойств многофазных материалов (как и однофазных) оказывают внутренние границы, в том числе межфазные.

На макроуровне (уровне образца или конструкции) под упрочнением обычно понимают увеличение предела текучести или сопротивления деформации. Существует множество физических причин, приводящих к упрочнению: упрочнение связывают с взаимодействием дислокаций между собой, со скоплениями дислокаций [1], также существенное влияние на величину предела текучести материала оказывает наличие границ зерен (или фаз) в поликристалле [2], 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 эффектов, связанных с взаимодействием дислокаций друг с другом, а также с границами зерен [3].

При переходе решеточной дислокации из одного зерна в другое сквозь границу, в последней остается т.н. дислокация ориентационного несоответствия (ДОН). ДОНы в свою очередь создают поля напряжений, препятствующие (или способствующие) дальнейшему движению дислокаций в данной системе скольжения [4]. Чем больше дислокаций прошло через границу, тем более высокие поля напряжений создаются ДОНами вблизи этой границы. Увеличение напряжений, необходимых для движения дислокации в направлении границы зерна, приводит к возникновению зернограницного упрочнения.

В рамках работы рассматривается также механизм т.н. межзеренного накопления поврежденности (некоторой меры, характеризующей количество специальных дефектов (микротрещин или микропор) в рассматриваемом материале в данный момент деформирования), для которого характерно образование и развитие дефектов в приграничной области зерен. По достижению этой мерой некоторого критического значения можно предсказать момент разрушения материала. 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, но при этом более подвержен появлению микротрещин вблизи границ зерен или фаз.

Показано, что поврежденность материала (как мера плотности микроповреждений) в процессе неупругого 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.

Проведено сравнение кривых деформирования модельных материалов, соответствующих по характеристикам отдельным фазам дуплекс стали, и собственно дуплекс стали, характеристики фаз которой приведены в работе [5]. Основываясь на данных, представленных в работе [5], отнесение кристаллита к той или иной фазе определялось случайно по равномерному закону.

На рис. 1 представлены результаты моделирования неупругого деформирования многофазного материала (дуплекс стали) и отдельных модельных материалов, соответствующих по характеристикам отдельным фазам дуплекс стали. Численные эксперименты проводились с учетом «обратных» напряжений, создаваемых ДОНами.

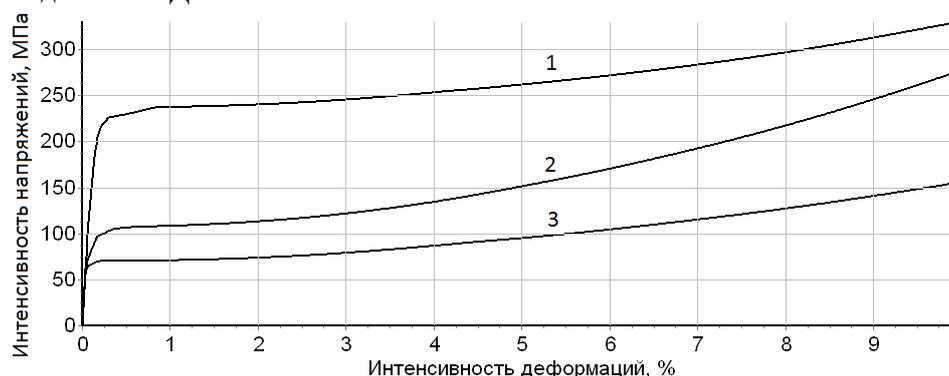


Рис. 1. Кривые деформирования для дуплекс стали (1) и модельных материалов, соответствующих по характеристикам отдельным фазам дуплекс стали: (2) – ОЦК фаза, (3) – ГЦК фаза

Из кривых деформирования, представленных на рис. 1 можно заметить, что многофазный материал (кривая 1) обладает значительно *большим* пределом текучести, по сравнению с чистым металлом (кривая 2 и 3), что подтверждается большим количеством известных экспериментальных данных. При этом видно, что при интенсивности деформаций примерно 0,5% происходит активизация механизма дополнительного упрочнения за счет внутренних полей напряжений, вызванных формированием ДОНов.

Таким образом, в работе проведена оценка влияния поля внутренних напряжений, создаваемого 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 и эволюцию поврежденности многофазного материала.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 17-19-01292.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трусов П.В., Волегов П.С., Кондратьев Н.С. Физические теории пластичности: учебное пособие. – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2013. – 244 с.
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. 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.
4. 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.
5. Трусов П.В., Кондратьев Н.С. Описание неупругого деформирования двухфазных поликристаллических материалов// Деформация и разрушение материалов. – 2013.–№6.–С.8-15.