

ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧНЕНИЕ И ПЛАСТИЧЕСКАЯ НЕСТАБИЛЬНОСТЬ В ОБЛУЧЕННЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ МАТЕРИАЛАХ

Н. В. Камышанченко, В. В. Красильников, Н. А. Чеканов, В. В. Сирота
Белгородский государственный университет

И. М. Неклюдов, В. Н. Воеводин, Л. С. Ожигов, А. А. Пархоменко
НИИ Харьковский физико-технический институт

Целью данной работы был анализ результатов исследований влияния облучения на деформационное упрочнение и возникновение пластической нестабильности в облученных деформируемых материалах с различным типом кристаллической структуры.

На облученных нейтронами образцах нержавеющей аустенитных сталей [3,4], ниобии [2], на образцах меди, облученных высокоэнергетическими протонами (600 МэВ) [5]; на облученных высокоэнергетическими электронами (225 МэВ) образцах хрома, ванадия, нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ, легированной РЗМ [1]; Ni-Sc – сплавах [6] обнаружено, что в интервале температур проявления низкотемпературного радиационного охрупчивания (20-350 С) все изученные материалы в независимости от типа кристаллической структуры (и вида кривой деформации до облучения) показывают возникновение пластической нестабильности типа Чернова - Людерса уже при флюенсах $10^{-3} - 10^{-1}$ сна. При этом в материалах с ОЦК - решеткой, имеющих «площадки Людерса» в исходном состоянии, облучение приводит к увеличению ее протяженности, а следовательно, к задержке (подавлению) параболического деформационного упрочнения, связанного с поперечным скольжением дислокаций. Поскольку подавление (затруднение) поперечного скольжения связано с уменьшением энергии дефектов упаковки, то полученные результаты могут быть объяснены снижением энергии дефектов упаковки материалов при облучении [1].

Электронно-микроскопический анализ, проведенный в работах [2-4], обнаружил, что в облученных образцах наблюдается эффект дислокационного каналирования, то есть неоднородного развития пластиче-

ской деформации, когда она распределяется не равномерно по всему объему, а сосредоточена в отдельных дислокационных каналах, в которых имеет место множественное движение дислокаций, сопровождающееся разрушением радиационных дефектов уже на начальных стадиях пластической деформации. При этом большая часть объема материала в начале остается недеформированной, и лишь позднее, если позволит запас пластичности, заполняется дислокациями [4].

Следует отметить, что возникновение дислокационных каналов не есть прерогатива области температур проявления низкотемпературного радиационного охрупчивания ($< 0,3 T_{пл}$). Как было показано в работах, выполненных в ФЭИ (Россия), HEDL (США), КФК (Карлсруе, Германия), в аустенитных нержавеющей сталей, облученных при температурах $> 0,4 T_{пл}$, может иметь место локализация скольжения (каналирование) по гелиевым порам, расположенным как в теле, так и по границам зерен. Однако, в отличие от низких температур, поры в каналах не устраняются дислокациями. Как показано в работе [7], они разрезаются, сдвигаются, но не исчезают даже при больших степенях пластической деформации локализованной в каналах (100 %). По мнению ряда авторов, каналирование по порам является главным вкладом в разрушение деформированных образцов, подверженных распуханию. [8]

Каналы локализованной деформации, встречаясь друг с другом или с поверхностями раздела, могут явиться причиной резкой концентрации напряжений, пропорциональной общей величине дислокационного «заряда», и способствовать образованию микротрещин, как это имело место, напри-

мер, в [2]. В области температур ВТРО, где как известно решающую роль играют границы зерен, каналирование может приводить к зернограничному разрушению уже при деформациях менее 1% [9].

В настоящее время предложено несколько теоретических моделей формирования дислокационных каналов. Одна из таких моделей предложена в работах [10,11]. В ее основе лежит взаимодействие скользящих дислокаций с дислокационными петлями, в результате чего и формируются грубые линии скольжения (так называемые бездефектные каналы). Кинетика данного явления была рассмотрена на основе нелинейного эволюционного уравнения для плотности дислокаций, включающего в себя процессы размножения, аннигиляции, диффузии дислокаций и заметание дислокациями петель, возникающих под облучением. Были определены ширина канала и среднее расстояние между каналами. Кроме того, найдена форма движущегося по каналу аннигиляционного фронта. В [11] проанализированы экспериментальные данные и произведен теоретический расчет критических условий возникновения каналов в зависимости от дозы облучения, определяющей объемную плотность дислокационных петель.

В работах [12,13] предложен новый подход к описанию механизма образования дислокационных каналов на основе рассмотрения коллективных процессов взаимодействия ансамблей дислокаций с радиационными дефектами. При этом, на основе экспериментальных фактов полагается, что в облученном деформированном материале дислокации в ансамбле движутся со скоростями, близкими к 0,1 скорости звука, то есть в динамическом (псевдорелятивистском) режиме. На основе общего кинетического подхода к эволюции ансамбля дислокаций, взаимодействующих с препятствиями, получено выражение для доли дислокаций, преодолевающих препятствия в режиме дислокационного каналирования:

$$q = \exp\left(\frac{-|v|^{m-1}}{2 A |a(m+1)|}\right),$$

где v - начальная скорость дислокаций, проходящих сквозь препятствия; a - ускорение, приобретаемое дислокацией под действием внешней нагрузки; $m < -1$ величина A пропорциональна степени радиационного упрочнения. При $|v| > 0$ эта доля становится бесконечно малой, а при $|v| > ?$ (или возрастании $|a|$) она стремится к единице. Последнее означает, что с увеличением скорости (энергии) дислокации начинают «про скакивать» препятствия без остановок. Таким образом, в облученных деформированных материалах может наблюдаться эффект резкого возрастания доли дислокаций, преодолевающих препятствия в динамическом режиме. При этом с увеличением степени упрочнения (концентрации дефектов, возникающих под облучением) данный эффект может достигаться при более низких скоростях деформации.

Библиографический список

1. Пархоменко А.А. К вопросу о влиянии облучения на энергию дефекта упаковки // Научные Ведомости. – БелГУ, 1998. – №1(6). – С.75
2. Tucker R. P., Ohr S. M., Wechsler M. S. Radiation Damage in Reactor Materials. Vienna 1969. Vol. 1. P. 215.
3. Abe F., Garner F. A., Kayano H. Effect of carbon on irradiation hardening of reduced activation 10Cr-30Mn austenitic steels.// J. Nucl. Mater. 1994. Vol. 212-215. P. 716-765.
4. De Vries M. I., Elen J. D., Tjoa G. J., Masterbroek A.// British Nucl. Energ. Soc. 1973. Vol. 2, P. 47.
5. Dai Y., Gavillet D., Pashoud F., Victoria M. Mechanical properties and microstructure of 600 Mev proton irradiated copper single crystals. // J. Nucl. Mater. 1994. Vol. 212-215. P. 395-398.
6. Волобуев А.В., Ожигов Л. С., Пархоменко А.А. Роль вакансионной пересыщенности в радиационном упрочнении и пластической нестабильности никеля и №-8с сплавов / ВАНТ. Сер.; ФРПИРМ. 1996. Вып.1 (64). С.3.
7. Bosek M. and Ehrlich K. // J. Nucl. Mater. 1975. Vol. 58. P. 247
8. Grossbesk M.L., Stiegler J.O., Holmes J.J., in Radiation Effects in Breeder Structural Materials, Bleiber and J.W, Bennet, Eds., Scottsdale, 1977, P.95.
9. Sklad P.S., Clausing R.E., and Bloom E.E. in Irrad. Effects on microstructure and properties of metals. ASTM STP611 .1976, P. 139.
10. Малыгин Г. А. Распределение призматических дислокационных петель по сечению аннигиляционных каналов в деформированных после облуче-

- ния нейтронами кристаллах // ФТТ. – 1992. – Т. 34. – №11. С. 3605-3607.
11. Малыгин Г.А. Кинетический механизм образования бездефектных каналов при пластической деформации облученных и закаленных кристаллов. – ФТТ. – 1991. – Т. 33. – №4 – С.1069-1076.
12. Камышанченко Н.В., Красильников В.В., Неклюдов И.М., Пархоменко А.А. Каналирование дислокаций в облученных материалах. // Научные ведомости. – Белгород. Изд-во БелГУ, 1998. №1(6). – С. 123-131.
13. Камышанченко Н.В., Красильников В.В., Неклюдов И.М., Пархоменко А.А. Кинетика дислокационных ансамблей в деформируемых облученных материалах // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т.23. – №18. – С.51-54.

УДК 539.4

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ В СВЯЗИ С ОСОБЕННОСТЯМИ СТРУКТУРНЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В СТАЛЯХ И СПЛАВАХ

А. М. Паршин, Н. Б. Кириллов, Р. Н. Кикичев

Санкт-Петербургский государственный технический университет

1. Структурно-кинетическая концепция и работоспособность конструкций. Изменение механических свойств металлов определяется не только характером взаимодействия дислокаций и других несовершенств кристаллического строения, плотностью и равномерностью их распределения, изменяющихся в процессе температурно-временных условий нагруженных конструкций, но и структурными превращениями, также изменяющимися во времени в зависимости от температуры, с учетом дилатации на границе раздела «формирующаяся избыточная фаза – матрица».

При этом нужно учитывать и взаимодействие несовершенств кристаллического строения и структурных превращений на различных этапах распада твердых растворов. Особенно важна величина и интенсивность распределения структурных напряжений, возникающих на ранних стадиях распада, то есть в так называемом инкубационном, латентном периоде распада. Процессы предвыделения – зарождения и развития избыточной фазы – еще в маточном твердом растворе оказывают определяющее влияние на прочность и пластичность [1–4].

При этом необходимо учитывать, что работоспособность изделий в значительной мере определяется их пластичностью, необходимой для снятия пиков напряжений. Известно, что в большинстве случаев обычные

характеристики кратковременных механических свойств не характеризуют работоспособность материала в инженерном понимании этого явления. Необходимость предотвращения преждевременного хрупкого разрушения, вероятность которого повышается в современных конструкциях, предусматривает сохранение в материале во времени необходимого запаса пластичности, позволяющего осуществить релаксацию полей напряжений от скоплений дислокаций и других несовершенств путем передачи деформации в соседний объем, а не путем образования зародыша хрупкой трещины. Чтобы сохранить работоспособность конструкционного сплава, и особенно в условиях нейтронного облучения, необходимо создать в нем определенный запас пластичности. Нами показано, что материал должен иметь 1–2% равномерного удлинения [1].

В таком случае преждевременное (нерасчетное) хрупкое разрушение свидетельствует о недопустимом при определенных температурно-временных и температурно-деформационных условиях снижении пластичности, когда металл конструкции уже не может более снимать пики перенапряжений, и они становятся соизмеримыми с прочностью.

Изотропность механических свойств при этом, уменьшая локализацию повреждаемости, будет способствовать повышению сопротивляемости развитию трещины [1, 2, 4].