

Поведение микротрещин при нейтронном облучении молибдена

ЛАРИКОВ Л. Н., МАКСИМЕНКО Е. А.

Низкотемпературное радиационное охрупчивание, в отличие от высокотемпературного (при $T > 0,5T_{пл}$ [1]), изучено значительно менее подробно в основном из-за сложности учета влияния образующихся пузырьков гелия по границам зерен [2]. Для исследования возможных механизмов низкотемпературного охрупчивания целесообразно использовать монокристаллические материалы, в которых устраняется зернограничный механизм охрупчивания и, в частности, изучить возможности заживления микротрещин, возникающих в процессе изготовления изделий. Известны [3] теоретические предпосылки заживления микротрещин при термической активации, однако роль нейтронного облучения при этом осталась невыясненной.

В качестве объектов исследования были выбраны полученные электронно-лучевой зонной плавкой монокристаллы молибдена с ориентацией поверхности {100}. Изучаемые образцы разрезали электроискровым способом. Термические напряжения, возникающие в поверхностных слоях при электроискровой резке, превышают предел прочности монокристаллов, в результате чего в этих слоях образуются микротрещины скола вдоль плоскости куба, простирающиеся на глубину 60—65 мкм. Образцы облучали при 200—300°С до достижения флюенса $5 \cdot 10^{19}$ нейтр./см². Исходные и облученные образцы, а также отожженные при $T = 0,95 T_{пл}$ до или после облучения, исследовали последовательно методом металлографического анализа и рентгеновскими методами. Толщину поврежденного слоя с микротрещинами определяли взвешиванием образцов на микроаналитических весах до и после снятия слоя полированием, или прямыми измерениями на оптиметре.

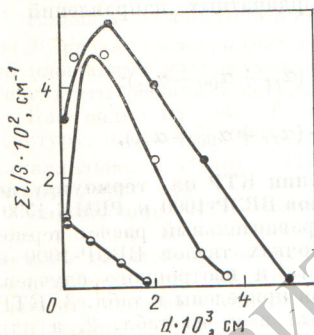


Рис. 1. Зависимость суммарной длины микротрещин от глубины снятого слоя для монокристалла молибдена: ○ — исходное состояние; ● — после отжига при 2500°С в течение 3 ч; ● — после нейтронного облучения

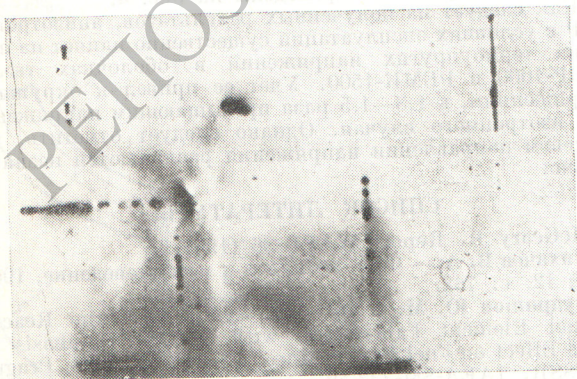


Рис. 2. Микроструктура монокристалла молибдена после отжига при 2500°С (×200)

На рис. 1 приведены статистические кривые зависимости суммарной длины микротрещин, отнесенной к единице площади шлифа, от расстояния до поверхности для облученных нейтронами монокристаллов молибдена. Высокотемпературный отжиг вызывает практически полное заживление микротрещин в объеме; нейтронное облучение, наоборот, способствует раскрытию имеющихся микротрещин.

На рис. 2 показана возникшая на глубине ~20 мкм микроструктура монокристалла молибдена, отжигавшегося при 2500°С в течение 3 ч. На месте залечившихся исходных микротрещин видны ямки травления, соответствующие стенкам дислокаций. Это дает основание предположить, что при отжиге реализуется механизм заживления микротрещин путем распада их на подгональные стенки краевых дислокаций за счет диффузии по поверхности трещин [3].

Приближенный расчет времени заживления проводили по известной [3] формуле

$$\tau_{зал} = \frac{15N^2 R T b^2}{4\epsilon \mu D_s \Delta v c_0 N_A}$$

где N — число дислокаций в стенке; N_A — число Авогадро; R — газовая постоянная; b — вектор Бюргера; μ — модуль сдвига; D_s — коэффициент поверхностной самодиффузии; Δv — эффективная разница объема атомов и вакансий; c_0 — концентрация вакансий. При $N = 1,2 \cdot 10^2$; $T = (2773 \pm 323)$ °К; $D_s = 0,1 \exp\left(-\frac{69000}{RT}\right)$ и $c_0 = 10^{-2}$ вычисленное время заживления микротрещин удовлетворительно согласуется с найденным экспериментально. Заполняющий микротрещину материал представляет собой двустороннее скопление переползающих краевых дислокаций. Равновесие всех дислокаций с учетом их взаимодействия и внешнего нормального напряжения эквивалентно равновесию трещин [4]. Если при высокотемпературной обработке наблюдается процесс активного заживления микротрещин, то при нейтронном облучении происходит обратный процесс — раскрытие трещин. Отжиг облученных монокристаллов также не приводит к заметному заживлению существующих трещин.

Полученные результаты подтверждают целесообразность более тщательного выбора реакторных материалов, в частности, в отношении их склонности к растрескиванию при обработке, когда возникающие микротрещины не обнаруживаются методами дефектоскопии. Поэтому становится актуальной разработка приемов механико-термической обработки, направленной на заживление технологических микротрещин в готовых изделиях до начала их эксплуатации в реакторе. Возможность такого предварительного заживления микротрещин в высокопрочной стали была доказана прямыми экспериментами [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зеленский В. Ф. и др. — Атомная энергия, 1978, т. 45, вып. 4, с. 251.
2. Ибрагимов Ш. Ш. — В кн.: Радиационные дефекты в металлических кристаллах. Алма-Ата, Наука, 1978, с. 3.
3. Любов Б. Я., Соловьев В. А. — Физика твердого тела, 1966, т. 8, вып. 6, с. 1683.
4. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М., Атомиздат, 1972.
5. Гнучев В. С. и др. — Металлофизика, 1975, вып. 61, с. 64.

Поступило в Редакцию 06.02.80