

доля атомов железа находится в регулярных, не искаженных дефектами областях кристаллической решетки, поэтому при эксперименте обнаруживается синглет матрицы стали (б, в). Уширение этого синглета может быть связано с концентрационной неоднородностью, вызванной образованием радиационных дефектов в облученном аустените. Появление второй сильно уширенной линии (в) указывает, что часть атомов железа входит в новую фазу, образовавшуюся под воздействием нейтронного облучения.

В закаленной стали ЭИ-69, облученной быстрыми нейтронами, образуется значительно больше дефектов, чем в стали, облученной γ -квантами (в данном случае $5 \cdot 10^{20}$ и $1,2 \cdot 10^{17}$ соответственно). Такими дефектами могут быть, например, скопления вакансий [3], которые способствуют появлению частиц выделений в закаленной стали, причем на начальной стадии облучения основным зародышем выделений является атом железа, связанный с двумя атомами углерода [4]. Можно предположить образование указанных выше выделений и в закаленной стали ЭИ-69 под действием нейтронного облучения. Тогда линия с изомерным сдвигом $\delta = 0,62 \pm 0,05$ мм/с может быть вызвана присутствием метастабильной карбидной фазы Me_mC_n , изомерный сдвиг которой близок к Fe_3C_2 [5].

В результате отпуска при температуре 500 °С в течение 30 мин метастабильная карбидная фаза в стали ЭИ-69, облученной быстрыми нейтронами, переходит в устойчивую фазу $Me_{23}C_6$, о чем свидетельствует появление в спектрах линии с изомерным сдвигом $\delta = 0,96 \pm 0,03$ мм/с (з) [6]. В необлученных образцах выделений карбидной фазы $Me_{23}C$ при данной температуре отпуска не наблюдалось.

Поступило в Редакцию 21/1 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вьюник И. М., Конозенко И. Д., Круликовская М. П. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 3, с. 245.
2. Вьюник И. М., Круликовская М. П. Препринт КИЯИ-74-18, Киев, 1974.
3. Раецкий В. М., Вотинов С. Н. «Физ. металлов и металловедение», 1970, т. 29, с. 284.
4. Damask A. e.a. «Philos. Mag.», 1970, v. 22, p. 549.
5. Химические применения мессбауэровской спектроскопии. М., «Мир», 1970, с. 164.
6. Вознюк П. О., Вьюник И. М., Дубинин В. Н. «Физ. металлов и металловедение», 1973, т. 36, с. 1310.

УДК 621.039.14

Влияние температуры на пористость в никеле при облучении ионами никеля

ЛЕБЕДЕВ С. Я., ПАНИН С. Д.

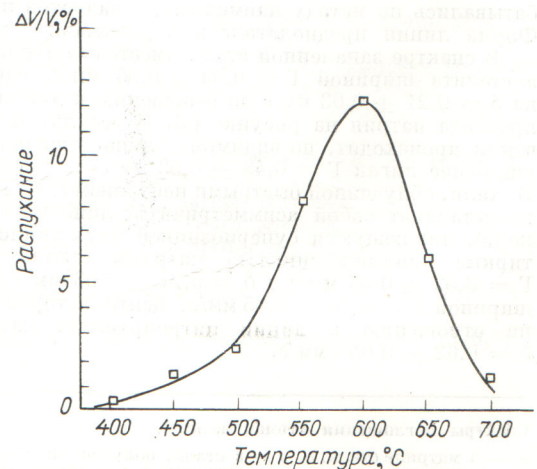
В работах [1,2] исследовались влияние гелия на процесс образования пор в никеле и зависимость радиационной пористости от дозы облучения ионами никеля при постоянной температуре образца (500 °С).

В настоящем сообщении рассматривается развитие пористости при различной температуре мишени. Методика приготовления образцов и методика облучения аналогичны применявшимся ранее. Образцы технического чистого никеля толщиной 0,15 мм предварительно отжигали в вакууме при температуре 800 °С в течение 1 ч. Облучение ионами никеля с энергией 46 кэВ проводилось при плотности тока 3 мкА/см² до дозы $1,6 \cdot 10^{17}$ ион/см², соответствующей примерно 40 смещениям на атом [3]. Средняя продолжительность облучения составляла 2,3 ч. Температура образцов изменялась в интервале 350—700 °С.

Результаты исследования облученных образцов

Температура, °С	Концентрация пор, см ⁻³	Размер пор, Å	Распухание, %
400	$4,5 \cdot 10^{17}$	20	0,22
450	$1,85 \cdot 10^{16}$	70	1,25
500	$1,46 \cdot 10^{16}$	100	2,45
550	$1,05 \cdot 10^{16}$	165	8,2
600	$3 \cdot 10^{15}$	340	12,1
650	$7 \cdot 10^{13}$	550	5,6
700	$5,75 \cdot 10^{12}$	1600	1,25

Электронно-микроскопические исследования облученных образцов показали, что вакансионная пористость наблюдается при температуре образца ≥ 400 °С. Результаты обработки микрофотографий даны в таблице. Для температуры 400 °С и выше обнаружено большое количество мелких пор, средний размер которых составляет $\langle d_p \rangle > 20$ Å. Кроме того, наблюдается большое число мелких темных пятен, которые



Р и с. 1. Зависимость распухания никеля от температуры при облучении его ионами Ni^+ дозой $1,6 \cdot 10^{17}$ ион/см²

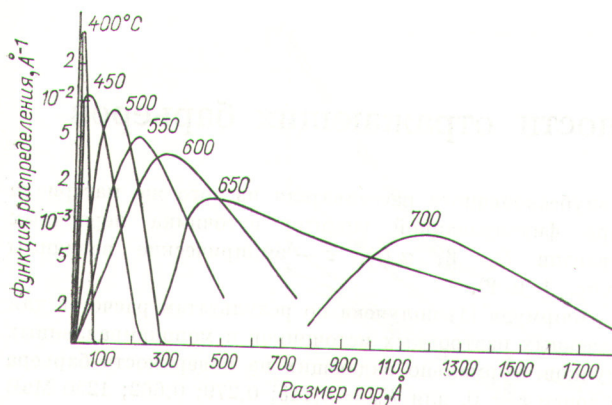


Рис. 2. Функция распределения пор по размерам в никеле для различных температур при облучении ионами Ni^{+} дозой $1,6 \cdot 10^{17}$ ион/см²

так же как и поры, равномерно распределены по просматриваемой площади образца. По мере увеличения температуры происходит рост пор и при 700 °C $\langle d_v \rangle > 1600$ Å. В то же время концентрация пор $\langle N_v \rangle$ с увеличением температуры резко снижается. Это указывает, что на низкотемпературной границе образования пористости в условиях облучения постоянным потоком бомбардирующих частиц зарождающиеся кластеры вакансий, по-видимому, термически стабильны. Вследствие малой подвижности вакансий в матрице возникает большая концентрация мелких пор. По мере увеличения температуры подвижность вакансий возрастает и они более энергично образуют поры. Полученные экспериментальные данные согласуются с гомогенной теорией зарождения и развития вакансионной пористости в облученных металлах [4].

На рис. 1 представлена температурная зависимость распухания ($\Delta V/V$) никеля. Довольно узкий пик распухания имеет максимум при температуре 600 °C.

Максимальное изменение объема соответствует 0,5 $T_{пл.К}$. Наблюдаемый максимум распухания при 600 °C хорошо согласуется с данными облучения никеля ионами никеля с энергией 500 кэВ [3]. Заметное распухание при температуре ниже 500 °C, можно объяснить высокой концентрацией мелких пор.

На рис. 2 приведены функции распределения пор по размерам, полученные в результате обработки гистограмм для различных температур. Видно, что с ростом температуры функция уширяется и ее максимум сдвигается в сторону больших размеров. При этом обнаруживается некоторая несимметричность кривых, указывающая, что рост пор происходит за счет слияния мелких пор. Подобная зависимость согласуется с наблюдаемой для холоднообработанной нержавеющей стали М-316, облученной в реакторе DFR [5].

Функция распределения показывает, что по мере увеличения температуры облучения размер пор увеличивается, а концентрация их становится меньше. Это подтверждает предположение о том, что не происходит зарождения новых пор, а продолжается рост пор, образовавшихся на начальной стадии облучения.

Поступило в Редакцию 9/III 1976 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев С. Я., Панин С. Д., Руднев С. И. «Атомная энергия», 1975, т. 38, вып. 6, с. 426.
2. Лебедев С. Я., Панин С. Д., Руднев С. И. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 5, с. 362.
3. Delaplace J., Aram N., Le Naour L. «J. Nucl. Mater.», 1973, v. 47, № 3, p. 278.
4. Конобеев Ю. В., Печенкин В. А. В сб.: Вопросы атомной науки и техники. Сер. физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. Вып. 1. Атомиздат, 1974, с. 41.
5. Cawthorne C. e. a. In: Proc. Reading Conf. on Voids Formed by Irradiation of Reactor Materials, Harwell, BNES, 1971, p. 35.