

Температурная зависимость эрозии нержавеющей стали при ионном облучении

ГУРОВ А. Д., КАЛИН Б. А., КИРИЛИН Н. М., ПИСАРЕВ А. А., СКОРОВ Д. М.,
ТЕЛЬГОВСКИЙ В. Г., ФЕДЯЕВ С. К., ШИШКИН Г. Н.

Нержавеющие стали считают перспективными материалами для первых термоядерных установок [1]. В связи с этим интересно изучить поведение нержавеющей стали при ионном облучении. Цель настоящей работы — исследование температурной зависимости эрозии сталей X18H9T и 0X16H15M3B при облучении ионами гелия и водорода энергией 20 и 25 кэВ соответственно при температуре 300—1000 К и дозе облучения $(4 \div 50)10^{21}$ ион·м⁻².

Техника эксперимента. Образцы стали обеих марок были приготовлены электрополировкой из фольги толщиной $(1 \div 2)10^{-4}$ м. Сталь 0X16H15M3B прошла предварительную аустенизацию при 900 К в течение 30 мин, а сталь X18H9T была исследована в прокатанном состоянии. Облучение образцов ионами проведено на масс-монохроматоре при условиях, описанных ранее [2]. Топография облученных сталей исследована с помощью угольных реплик на электронном микроскопе УЭМВ-100К. Оценка эрозии проведена по электронно-микроскопическим снимкам путем измерения геометрических размеров разрушенных вздутий (блистеров) и подсчета числа атомов в отщепленных куполах стали по формуле

$$n = N_A (\rho V / A),$$

где N_A — число Авогадро; ρ — плотность; V — объем отщепленных куполов; A — атомный вес материала. Общая ошибка при определении коэффициента эрозии ~ 50%.

Результаты и их обсуждение. Типичные электронно-микроскопические снимки реплик с поверхности сталей, облученных ионами гелия, представлены на рис. 1—4. Анализ результатов исследования образования вздутий показал, что поведение сталей существенно зависит от температуры облучения и интегральной дозы ионов гелия. Для стали X18H9T характерно образование

куполообразных неразрушенных газонаполненных полостей-вздутий в широком интервале температуры. Установлено, что с ростом температуры облучения возрастает критическая доза ионов гелия, т. е. доза, при которой наблюдается разрушение вздутий, вызывающее шелушение стали путем отрыва их куполов. Для температуры 300—400 К доза $2 \cdot 10^{22}$ ион·м⁻² (см. рис. 1) является критической, причем в этом интервале наблюдается максимальная эрозия стали. Коэффициент эрозии стали X18H9T при температуре 300 К равен $0,08 \pm 0,04$ атом/ион. Увеличение температуры облучения приводит к резкому уменьшению шелушения стали. При облучении в интервале 650—900 К неразрушенные вздутия наблюдаются при дозах выше 8×10^{21} ион·м⁻² (см. рис. 2). С ростом температуры облучения (выше 900 К) количество вздутий на единице поверхности уменьшается, а поверхность приобретает рельеф, характерный для катодного травления.

Для стали 0X16H15M3B важным явилось наличие широкого температурного интервала (300—800 К), в котором при облучении происходила интенсивная эрозия из-за разрушения вздутий путем отрыва куполов (см. рис. 3). Максимальная эрозия обнаружена в интервале 550—750 К при дозе $1 \cdot 10^{22}$ ион·м⁻² и выше. Коэффициент эрозии стали 0X16H15M3B при температуре 670 К и дозе $1,1 \cdot 10^{22}$ ион·м⁻² равен $0,65 \pm 0,32$ атом/ион, а при 300 К — $0,40 \pm 0,20$ атом/ион. Уменьшение и увеличение температуры облучения стали 0X16H15M3B вне критического интервала (550—750 К), как и уменьшение дозы облучения, сопровождалось снижением эрозии стали. При сравнительно низких дозах $[(4 \div 5)10^{21}$ ион·м⁻²] вздутия сохраняют куполообразную форму во всем исследованном интервале температуры (см. рис. 4). При достаточно больших дозах (более 10^{22} ион·м⁻²) увеличение температуры облучения до 950—1000 К приводит к уменьшению количества раз-



Рис. 1. Электронно-микроскопический снимок угольной реплики с поверхности стали X18H9T, облученной ионами гелия дозой $3 \cdot 10^{22}$ ион·м⁻² при 375 К

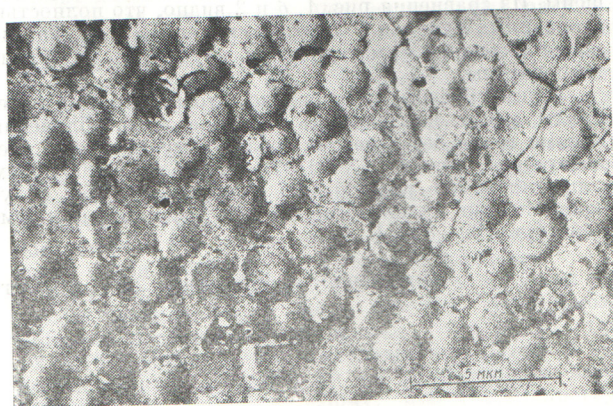


Рис. 2. Вздутия на поверхности стали X18H9T, облученной ионами гелия дозой $8 \cdot 10^{21}$ ион·м⁻² при 675 К

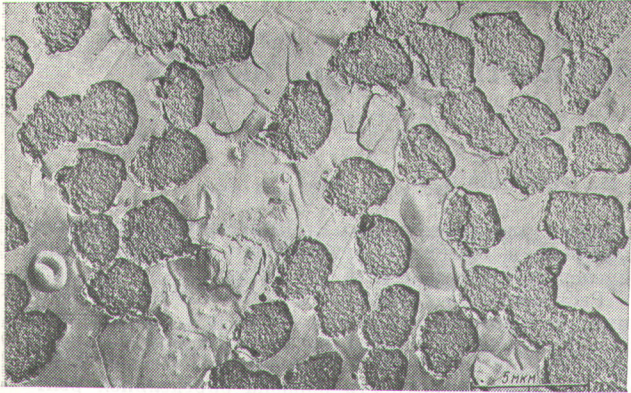


Рис. 3. Поверхность стали 0X16N15M3B с разрушенными вздутиями после облучения ионами гелия дозой $4,3 \cdot 10^{22}$ ион·м⁻² при 375 К

рушенных вздутий; поверхность облученной стали 0X16N15M3B приобретает рельеф, характерный для катодного травления. Таким образом, показано, что при облучении ионами гелия в сопоставимых условиях поведение сталей X18N9T и 0X16N15M3B существенно различается: у стали 0X16N15M3B весьма большая величина эрозии при температуре от 300 до 800 К, а эрозия стали X18N9T наблюдается только в интервале температур 300—400 К. Различие в поведении сталей, в частности склонность вздутий на стали 0X16N15M3B к хрупкому разрушению отрывом куполов в широком интервале температуры, можно объяснить в основном разницей физико-механических свойств материалов, например пластичности, и изменением этих свойств в зависимости от температуры [3, 4]. Сталь X18N9T, как наиболее пластичная, меньше подвержена эрозии в результате разрушения газонаполненных полостей. В связи с этим после облучения ионами гелия до $5 \cdot 10^{22}$ ион·м⁻² предпочтительнее, с точки зрения использования сталей в качестве материала первой стенки термоядерных установок, следует отдать стали X18N9T.

Анализ результатов электронно-микроскопического исследования стали X18N9T, облученной ионами гелия и протонами при температуре 300 К, позволил также выявить ряд закономерностей. Облучение стали только протонами приводило к образованию вздутий при дозе выше $6 \cdot 10^{21}$ ион·м⁻². При этом замечено, что на механически полированных образцах образование вздутий происходит предпочтительнее на царапинах и их пересечении.

Совместное последовательное облучение стали X18N9T ионами гелия и протонами показало, что вспучивание стали не наблюдается до суммарных доз облучения порядка $1 \cdot 10^{21}$ ион·м⁻². Отжиг при 1000 К после облучения также не привел к появлению вздутий. Увеличение суммарной дозы облучения до $1,5 \cdot 10^{21}$ ион·м⁻² мало изменяет топографию облученной поверхности, однако отжиг после облучения в течение 30 мин приводит к образованию вздутий с достаточно

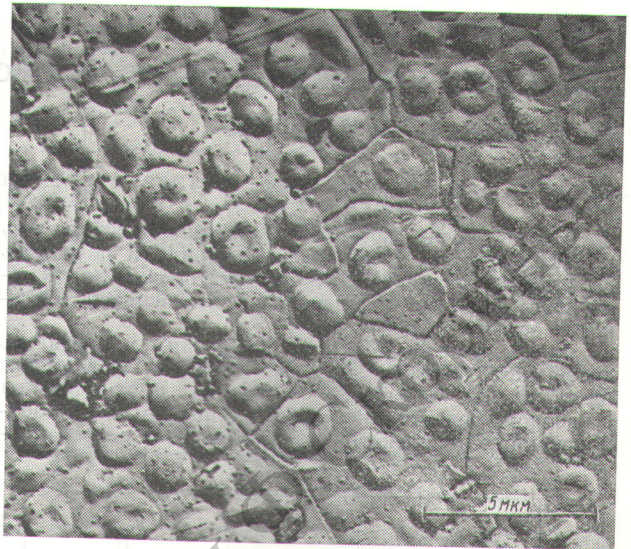


Рис. 4. Вздутия на поверхности стали 0X16N15M3B, облученной ионами гелия дозой $5,2 \cdot 10^{21}$ ион·м⁻² при 775 К

высокой плотностью (10^{12} м⁻²). Для сравнения проведено облучение сталей только ионами гелия при дозе $5 \cdot 10^{20}$ ион·м⁻² с последующим отжигом в аналогичных условиях. Установлено, что плотность вздутий при совместном облучении в два раза выше, чем при облучении только гелием. По-видимому, это связано с тем, что газовые полости на глубине проникновения ионов гелия являются ловушками для атомов водорода, диффундирующих к поверхности с большей глубиной. Захват водорода в области скопления атомов гелия, вероятно, приводит к увеличению суммарного газового давления в пузырьках и, следовательно, к образованию вздутий при достижении критической суммарной дозы облучения.

Таким образом, установлено, что совместное облучение стали протонами и ионами гелия усиливает процесс образования вздутий.

Поступило в Редакцию 29/V 1975 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kulcinski G. e. a. «Nucl. Technol.», 1974, v. 22, p. 20.
2. Тельковский В. Г. и др. В сб.: Тезисы докладов Всесоюзного совещания по инженерным проблемам управляемого термоядерного синтеза. Л., 1974, изд. НИИЭФА, с. 272.
3. Химушин Ф. Ф. Жаропрочные стали и сплавы. М., «Металлургия», 1969, с. 660.
4. Нормы расчета на прочность элементов реакторов, парогенераторов, сосудов и трубопроводов атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. М., «Металлургия», 1973, с. 49.