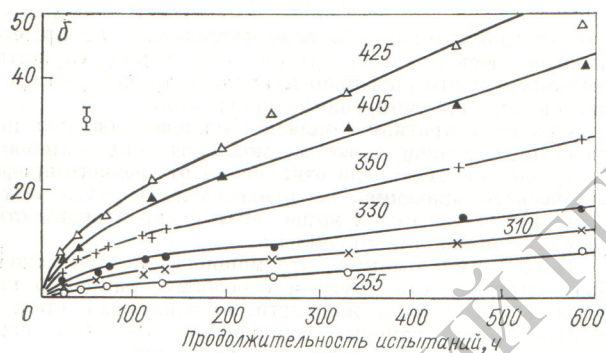
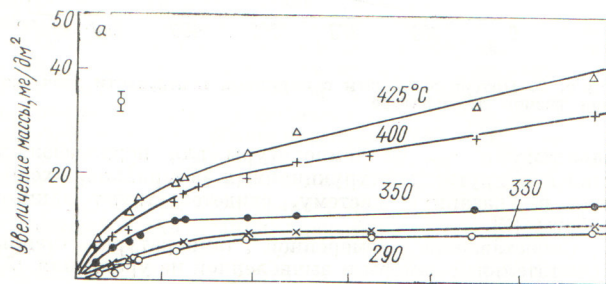


Влияние облучения на кинетику окисления сплава Zr + 2,5% Nb

ГОЛОВАЧЕВ М. Г., КЛЮШИН В. В., ПЕРЕХОЖЕВ В. И.

Исследовано окисление сплава циркония с 2,5 мас. % ниобия в реакторных и вне реакторных условиях в интервале температур 255—425 °С в среде влажного азота (~20 мл Н₂О/м³). Скорость потока газа составляла 0,5 м/с, расход 5—10 л/ч. Плотность нейтронного потока

В процессе испытаний (максимальная продолжительность 590 ч) все образцы покрывались черной, хорошо сцепленной с металлом пленкой. Зависимость кинетики окисления сплава от условий испытаний представлена на рисунке. Результаты математической



Кинетика окисления сплава Zr + 2,5% Nb во влажном азоте без облучения (а) и под облучением (б) при различной температуре

близка к $3,5 \cdot 10^{13}$ нейтр./(см²·с) ($E \geq 1,1$ МэВ). Образцы были экранированы от осколков деления и взвешивались на аналитических весах ВЛАО-100.

Константы кинетики окисления

Условия окисления	Температура, °С	$\Delta m = k_1 1g \tau, k_1$	$(\Delta m)^n = k_2 \tau$	
			k_2	n
Под облучением	255	0,3	—	—
	310	—	0,1	1,70
	330	—	0,2	1,72
	350	—	0,8	1,89
	405	—	1,8	1,91
	425	—	3,5	1,96
Без облучения	290	0,7	—	—
	330	0,7	—	—
	350	1,0	—	—
	400	—	1,3	1,92
	425	—	2,2	1,96

обработки полученных данных обобщены в таблице.

Анализ данных после испытаний свидетельствует о том, что облучение сплава Zr + 2,5 мас. % Nb потоком нейтронов в среде влажного азота увеличивает массу образцов на 20—50%. Этот эффект, по-видимому, можно связать с влиянием облучения нейтронами на строение окисной пленки и на состав среды.

Поступило в Редакцию 19/XII 1975 г.
В окончательной редакции 7/V 1976 г.

Влияние бора на радиационное охрупчивание низколегированной стали

НИКОЛАЕВ В. А., БАДАНИН В. И.

Интерес к изучению влияния бора на свойства феррито-перлитной стали для корпусов водо-водяных энергетических реакторов объясняется следующими факторами. Во-первых, легирование бором в количестве 0,002—0,005% значительно увеличивает прокаливаемость, а следовательно, и прочность стали, не ухудшая существенно ее свариваемости [1]. Кроме того, сведения о сильном радиационном охрупчивании стали,

содержащей бор [2], указывают на необходимость оценить возможную роль этого элемента как примеси в стали (~10⁻³% и менее).

В связи с этим предпринята попытка изучить радиационное охрупчивание стали 15Х2МФА с добавкой ~0,004% бора, причем для выяснения причины наблюдаемых эффектов использован бор различного изотопного состава.

Методика. Исследование проведено на металле лабораторной индукционной плавки массой 100 кг. При разливке на слитки массой 16 кг в ковш добавляли лигатуру Fe + 10% В с естественной смесью изотопов $^{10}\text{В}$ и $^{11}\text{В}$ (18,4 и 18,6%), а также с обогащением по $^{10}\text{В}$ и $^{11}\text{В}$ до 95% каждого изотопа.

Для приготовления лигатуры с обогащенным бором смешивали элементарный бор с порошкообразным карбоильным железом, из смеси прессовали таблетки, которые затем спекали в вакууме. Плавку вели с использованием в качестве шихты железа армко. Химический состав стали приведен в табл. 1.

Химический состав исследованных материалов Таблица 1

Содержание бора, мас.%	Прочие элементы, %
0,004 $^{11}\text{В}$ 0,003 В 0,005 $^{10}\text{В}$ 0,0005 В	— 0,14 С; 1,72 Cr 0,2 Ni; 0,81 Мо; 0,32 V; 0,2 Cu 0,009 P

Полученные слитки ковали и затем прокатывали в листы толщиной 10 мм. Листы подвергали закалке от температуры 960° С в масле с последующим отпуском при 690° С. После термической обработки материал имел структуру мелкодисперсного сорбита с размером первичного аустенитного зерна 4—5 баллов.

Механические свойства определяли на ударных образцах размером 5×5×27,5 мм с V-образным надрезом глубиной 1 мм и радиусом 0,25 мм, а также на пятикратных разрывных образцах диаметром 3 мм. Склонность к радиационному охрупчиванию оценивали [3] по различию критической температуры хрупкости (T_K) стали в исходном состоянии и после нейтронного облучения.

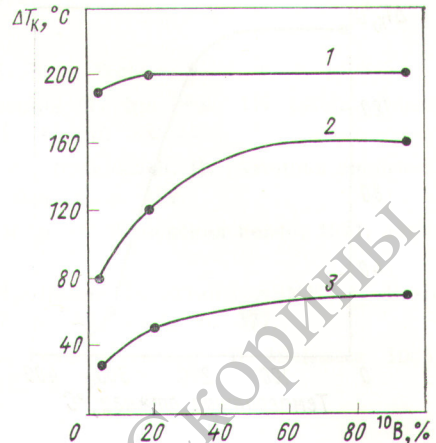
Облучение материалов проводили в активной зоне и отражателе реактора ВВР-М при соотношении плотности потока быстрых ($E > 0,5$ МэВ) и тепловых нейтронов ~ 1 : 1 и 1 : 10 соответственно. Подробнее методики описаны в работе [3].

Результаты экспериментов. На рис. 1 представлена зависимость повышения T_K стали от изотопного состава бора и флюенса при облучении в активной зоне. После облучения при температуре ~50° С флюенсом $5 \cdot 10^{19}$ нейтр./см² изменение T_K стали оказывается тем

Влияние облучения флюенсом $5 \cdot 10$ нейтр./см² при 50° С на предел текучести стали * Таблица 2

Содержание бора, мас.%	$\sigma_{0,2}$, кг/мм ²	
	до облучения	после облучения
0,004 $^{11}\text{В}$	75	96
0,003 В	75	95
0,005 $^{10}\text{В}$	76	97

* Испытание при 20° С.

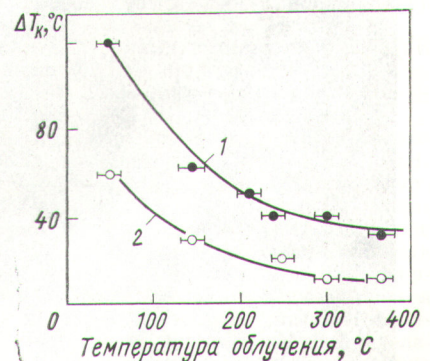


Р и с. 1. Зависимость повышения T_K стали от изотопного состава бора после облучения флюенсом $5 \cdot 10^{20}$ (1), $5 \cdot 10^{19}$ (2) при 50° С и $\sim 1 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² (3) при 300—350° С

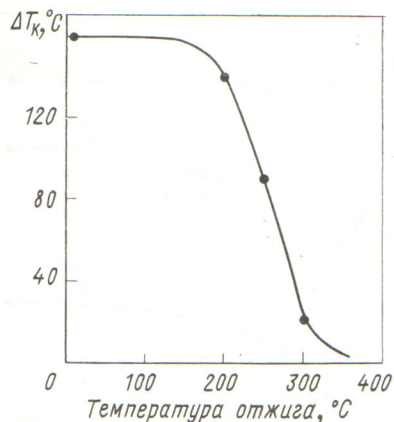
больше, чем выше обогащение изотопом $^{10}\text{В}$. Для крайних пределов содержания $^{10}\text{В}$ (~5 и 95%) сдвиг T_K различается в 2 раза. Сравнение данных по влиянию облучения на предел текучести (табл. 2) показывает, что для радиационного упрочнения стали при том же флюенсе не обнаруживается зависимости от изотопного состава бора.

При увеличении флюенса до $5 \cdot 10^{20}$ нейтр./см² T_K повышается на 190—200° С у материала всех составов. Из полученных данных следует, что для стали с добавкой $^{11}\text{В}$ зависимость изменения T_K от флюенса описывается обычным соотношением $\Delta T_K \approx A F^{1/3}$ (F — флюенс в единицах 10^{18} нейтр./см²) при значении коэффициента $A \sim 24$. Для остальных материалов эта зависимость не выполняется, что свидетельствует о более раннем достижении эффекта насыщения в случае присутствия в стали $^{10}\text{В}$.

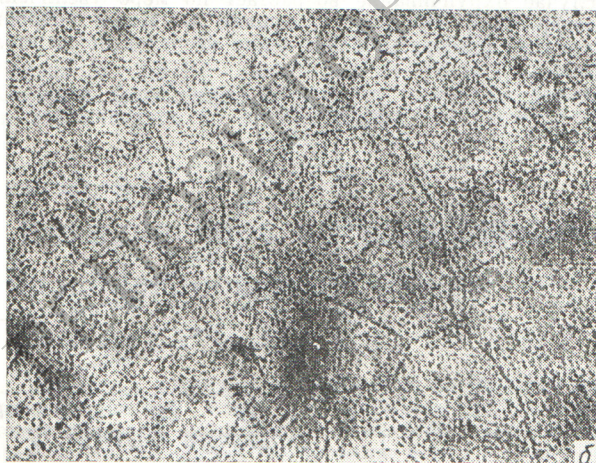
С повышением температуры облучения до 300—350° С смещение T_K существенно уменьшается, но и в этом случае охрупчивание возрастает по мере увеличения содержания $^{10}\text{В}$ (рис. 1, кривая 3). Более подробно влияние температуры облучения исследовано на стали



Р и с. 2. Зависимость повышения T_K стали с добавкой 0,003% бора (1) и без добавки бора (2) от температуры облучения в активной зоне [флюенс $(0,5 \div 1)10^{20}$ нейтр./см²]



Р и с. 3. Влияние температуры отжига на восстановление T_K стали, содержащей ^{10}B , после облучения флюенсом тепловых нейтронов $6,8 \cdot 10^{20}$ нейтр./см 2 при 50°C



Р и с. 4. Микроструктура (а) и автордиограмма распределения бора (б) в стали 15X2MFA

с добавкой природного бора. Полученные данные (рис. 2) сопоставляются с данными по стали близкого химического состава (табл. 1), но содержащей не более 0,0005% В. Усиленное охрупчивание, вызванное присутствием бора, довольно быстро спадает при повышении температуры облучения, особенно в интервале $150\text{--}250^\circ\text{C}$. Отмеченный характер зависимости существенно не отличается от наблюдаемого у сталей без добавок бора [3, 5].

Для выяснения особенностей влияния бора на охрупчивание была изучена возможность восстановления T_K облученной стали в процессе послерадиационного отжига. Опыты были выполнены на стали с добавкой ^{10}B , причем для увеличения вклада этого изотопа в охрупчивание образцы были облучены преимущественно тепловыми нейтронами (в отражателе).

Рис. 3 показывает, что после отжига продолжительностью 1 ч частичное восстановление T_K происходит уже при температуре 200°C , а при 300°C оно достигает 85—90%. Температурный интервал восстановления T_K у стали с бором типичен для большинства сталей ферритно-перлитного класса [4, 5].

Рассмотренные данные свидетельствуют о том, что наличие бора лишь усиливает обычное охрупчивание, внешние проявления которого хорошо известны.

Увеличение охрупчивания под влиянием бора, по-видимому, происходит в результате образования по реакции $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ осколочных ядер с высокой кинетической энергией ($\sim 1,8$ и $0,6$ МэВ). При их торможении в матрице образуются дополнительные дефекты кристаллической решетки. Вследствие большого сечения реакции ^{10}B довольно быстро выгорает (при флюенсе тепловых нейтронов $5 \cdot 10^{20}$ нейтр./см 2 выгорание составляет $\sim 90\%$). Поэтому его влияние проявляется при сравнительно небольших дозах и мало заметно в условиях эффекта насыщения.

Радиационное упрочнение стали не зависит от содержания ^{10}B . Причина этого заключается, очевидно, в характере распределения бора, выявляемом методом трековой автордиографии [6].

Для изучения распределения бора * были использованы образцы стали с добавкой ^{10}B . Для получения крупного зерна образцы при термической обработке были нагреты под закалку до температуры 1200°C , последующий отпуск, как и в остальных случаях, осуществлялся при 690°C . Полученные автордиограммы и сравнение их с микроструктурой показывают (рис. 4), что плотность треков весьма неоднородна и максимальна на границах бывших аустенитных зерен, которые и являются, следовательно, участками преимущественной концентрации бора. Распределение на автордиограммах треков, оставляемых α -частицами, одновременно отражает и характер расположения зон, в которых торможение α -частиц и ионов лития приводит к увеличению числа атомных смещений. Естественно, что на такую макроскопическую характеристику, как предел текучести, определяющийся сопротивлением деформации всего объема металла, не может повлиять столь локальное повышение концентрации дефектов. Поэтому величина предела текучести практически полностью зависит от равномерно распределенных дефектов, возникающих под действием быстрых нейтронов. В то же время наиболее поврежденные зоны кристалли-

* Опыты по трековой автордиографии выполнены Н. В. Мишиной и Н. Б. Одинцовым.

ческой решетки, примыкающие к границам зерен, по-видимому, могут служить участками предпочтительного образования зародышевых трещин и, следовательно, появление таких участков может повлиять на сопротивление стали разрушению.

Таким образом, роль бора в охрупчивании стали, по существу, равнозначна увеличению флюенса. Известно, что с увеличением флюенса T_K возрастает практически линейно по мере повышения содержания в стали Ni, Cu, P [3]. Поэтому можно ожидать, что присутствие бора должно проявляться тем значительней, чем выше в стали содержание указанных элементов. Это означает, что при легировании стали никелем, например, может возникнуть необходимость ограничения и контроля содержания примесного бора в целях обеспечения высокой радиационной стойкости.

Поступило в Редакцию 6/1 1976 г.

УДК 539.173.4:621.039.9

Измерение отношения $\sigma_f(^{239}\text{Pu})/\sigma_f(^{235}\text{U})$ в интервале энергии нейтронов 0,27—9,85 МэВ

ФОМУШКИН Э. Ф., НОВОСЕЛОВ Г. Ф., ВИНОГРАДОВ Ю. И., ГАВРИЛОВ В. В.

Энергетическая зависимость отношения сечений деления ^{239}Pu и ^{235}U нейтронами изучалась многими исследователями с помощью различных методик. Однако и в настоящее время расхождения между результатами довольно велики. Даже в оцененных данных, приводимых в компиляциях Дэйви [1], Байера [2], Грина и др. [3], Соурби и др. [4], Коньшина и др. [5], они достигают 7—8%. Причем кривые, характеризующие это отношение, заметно различаются по форме особенно в интервале энергий нейтронов ~1—10 МэВ. Для уточнения структуры зависимости $\sigma_f(^{239}\text{Pu})/\sigma_f(^{235}\text{U})$ целесообразно проведение исследований в широком интервале энергии нейтронов по единой методике.

Предварительные результаты измерений отношения сечений деления ^{239}Pu и ^{235}U , приведенные в данной работе, получены методом времени пролета с использованием подземного ядерного взрыва в качестве импульсного источника нейтронов. Подобные измерения сравнительно хорошо изученной характеристики позволяют, кроме того, оценить возможности применяемой методики для других ядерно-физических исследований.

Методика измерений описана в [6], отметим лишь ее особенности. В качестве детектора осколков деления использовалась пленка из поликарбоната молекулярной массой 90 000. Развертка по времени пролета осуществлялась электромеханической установкой, один из узлов этой установки — барабан с наклеенной поликарбонатной пленкой — вращался в момент нейтронного импульса с частотой ~10⁴ об./мин. Слои делящихся изотопов располагались вблизи пленки в нейтронном потоке, между каждым слоем и пленкой размещался щелевой коллиматор осколков деления.

Временное разрешение при такой методике измерения определяется частотой вращения барабана, пролетным расстоянием и шириной щели коллиматора осколков

$$\Delta t/L = \Delta x/vL,$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cottrell C. «J. Brit. Weld.», 1954, v. 1, p. 315.
2. Myers H., Grounes M. In: Proc. III Intern. Conf., Geneva, 1964, A/conf. 28/P/420.
3. Николаев В. А., Баданин В. И. «Атомная энергия», 1974, т. 37, вып. 6, с. 491.
4. Амаев А. Д. и др. IV Женевская конф., 1974, докл. № 705.
5. Serpan C., Hawthorne J. «Trans. ASME. J. Basic Engng», 1967, v. 89, № 4, p. 877.
6. Fleischer R., Price P., Walker R. «Science», 1965, v. 149, № 3682, p. 383.

где L — пролетное состояние; v — линейная скорость перемещения пленки относительно коллиматора; Δx — ширина щели коллиматора.

В данных измерениях временное разрешение составило 7,5 нс/м (полная ширина на полувысоте). Влияние рассеянных нейтронов вне прямого потока учитывалось дополнительными коллиматорами со слоями ^{235}U и ^{239}Pu .

Калибровка слоев, т. е. измерение отношения эффективных чисел делящихся ядер в слоях (с учетом вероятности прохождения осколков через коллиматор), проводилась по делению тепловыми нейтронами. Узел экспериментальной установки, включающий слой ^{239}Pu и ^{235}U , коллиматоры и небольшой участок детектирующей пленки, помещался в графитовую призму габаритами 100×100×100 см. Призма облучалась быстрыми нейтронами критической сборки из ^{235}U [7]. Температура тепловых нейтронов в месте, где устанавливались исследуемые образцы, составляла 309 ± 18 К.

Сечения деления нейтронами с энергией 0,0253 ЭВ принимались равными $742,5 \pm 3,0$ б для ^{239}Pu и $582,2 \pm 1,3$ б для ^{235}U [8]. Значения g -факторов $1,066 \pm 0,014$ [9] и $0,973 \pm 0,003$ [10] соответственно.

Детектирующие поликарбонатные пленки обрабатывались в одинаковых условиях 6,25 N раствором NaOH. Просмотр пленок и счет треков по интервалам осуществлялись с помощью оптического микроскопа. Как показали данные, суммарный фон рассеянных нейтронов в интервале измеренного времени пролета не превышал 1,5%. В результаты были внесены поправки на содержание в образцах ^{239}Pu , ^{235}U и других делящихся изотопов. Поскольку вероятность прохождения осколков через коллиматор зависит от углового распределения, вводилась также поправка (~1%) на различие в энергетической зависимости угловой анизотропии деления исследуемых ядер. Результаты измерения отношения $\sigma_f(^{239}\text{Pu})/\sigma_f(^{235}\text{U})$ для 20 интервалов энергии