

4. Herring C. Surface tension as a motivation for sintering // *J. Applied Phys.* 1950. – Vol.22. – P.437-441.
5. Nabarro F.R.N. Report of Conference of the Strength of Solids. – London, 1948. – 75 p.
6. Лифшиц И.М., Слезов В.В. О теории коаллценции твердых растворов // *ФТТ.* – 1959. – Т.1. – № 9. – С. 479-485.
7. Гегузин Я.Е., Кононенко В.Г. Дислокационный механизм изменения объема поры в монокристалле под влиянием всестороннего давления // *ФТТ.* – 1973. – Т.15. – С. 355-357.
8. Бетехтин В.И., Владимиров В.И., Петров А.И., Кадомцев А.Г. Микротрещины в приповерхностных слоях деформированных кристаллов // *Поверхность. Физика, химия, механика.* – 1984. – №7. – С. 144-151.
9. Черемской П.Г., Слезов В.В., Бетехтин В.И. Поры в твердом теле. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 373 с.
10. Evans A.G., Charles S.A. Strength Recovery by Diffusive Crack Healing // *Acta Met.*, 1977. – Vol. 25. – P.917-919.
11. Бетехтин В.И., Петров А.И., Ажимуратов У.Н., Кадомцев А.Г., Разуваева М.В., Скленичка В. Залечивание зернограничных пор при одноосном сжатии кристаллических материалов // *ФММ.* – 1989. 68, 1. – С.138-142.
12. Бетехтин В.И., Петров А.И., Кадомцев А.Г. и др. Влияние гидростатического давления на залечивание зернограничных микропор // *ФММ.* – 1990. 5. – С.175-180.
13. Бетехтин В.И., Перегуд Б.П., Петров А.И., Разуваева М.В. Особенности импульсного МГД воздействия на микронесплошности в меди // *ЖТФ.* – 1989. 59, 6. – С.136-139.
14. Аристова В.Н., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г., Петров А.И. Особенности воздействия статических и динамических давлений на микронесплошности в металлах // *Металловедение и прочность материалов: Сб.* – Волгоград: ВПИ, 1990. – С.49-54.
15. Петров А.И., Разуваева М.В., Бетехтин В.И. Залечивание зернограничных пор в цинке под давлением при повышенных температурах // *Прогнозирование механического поведения материалов: Сб.* – Новгород. 1991. – С. 129-132.
16. Петров А.И., Разуваева М.В., Синани А.Б., Бетехтин В.И. Влияние всестороннего давления на залечивание пор в ПТФЭ // *Механика композиционных материалов.* – 1989. 6. – С.1121-1125.
17. Петров А.И., Разуваева М.В., Синани А.Б., Егоров В.М., Бетехтин В.И. Отжиг растянутых аморфно-кристаллических полимеров с микронесплошностями // *Механика композиционных материалов.* – 1990. 2. – С.273-279.
18. Бетехтин В.И., Глезер А.М., Кадомцев А.Г., Кипяткова А.Ю. Избыточный свободный объем и механические свойства аморфных сплавов // *ФТТ.* – 1998. – Т.40. – №1. – С.85-89.
19. Бетехтин В.И., Гюлиханов Е.Л., Кадомцев А.Г., Кипяткова А.Ю., Толочко О.В. Влияние отжига на избыточный свободный объем и прочность аморфных сплавов // *ФТТ.* – 2000. Принято к печати.
20. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. и др. Концентрация микропор в цементном камне и их распределение по размерам // *Цемент.* – 1989. – 10. – С.8-10.
21. Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. и др. Влияние гидростатического давления на пористость и прочностные свойства цементного камня // *Цемент.* – 1991. – 5-6. – С.16-20.
22. Веселков С.Ю., Даль Ю.М., Бетехтин В.И., Кадомцев А.Г. Теоретическое и экспериментальное исследование залечивания пор в твердых телах под действием гидростатического давления // *Сб. трудов XXXVI Международ. семинара «Актуальные проблемы прочности».* – Витебск: Изд-во ВПИ, 2000. – С.569-574.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект №99-02-18287.

УДК 539.125.5:669.14.018.8

ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ПАДЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ СТАЛИ ЧС-68 х.д. ПРИ ДОЗАХ НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НИЖЕ 40 с.н.а

Е.А. Кинев, С.В. Брюшкова, А.В. Козлов, С.А. Аверин, И.А. Портных
г. Заречный Свердловской области, ГУДП "Свердловский филиал НИКИЭТ"

Ранее в работах по исследованию стали ЧС-68 (20 % х.д.) после облучения в реакторе БН-600 в качестве материала оболочек твэлов приводились данные по механическим свойствам материала, облученного до повреждающих доз более 50 с.н.а [1-4]. В этих работах было показано, что данный

материал подвержен катастрофическому охрупчиванию при повреждающих дозах выше 70 с.н.а. Результатов исследований поведения стали ЧС-68 при небольших повреждающих дозах в литературе приведено недостаточно. В то же время изменения структуры, протекающие на ранних стадиях

облучения, в значительной мере определяют свойства стали на более поздних стадиях. В работе приводятся данные изучения механических свойств и микроструктуры стали ЧС-68 х.д. после облучения в реакторе БН-600 до повреждающих доз 10-40 с.н.а.

Материал и методика исследований. Материалом исследования являлась сталь марки ЧС-68 (20 % х.д.) после эксплуатации в реакторе БН-600 в качестве оболочек твэлов (табл.1).

Характер распределения повреждающей дозы нейтронного облучения и температуры внутренней поверхности оболочки исследованных твэлов по высоте активной зоны реактора приведен на рис.1.

Механические испытания оболочек твэлов проводились при температурах от 20 до 700 °С методом растяжения кольцевых образцов высотой ~3 мм. Точность определения нагрузки составляла ± 10 МПа. Характеристики пластичности определяли с точностью $\pm 0,1$ %.

Исследование микроструктуры стали проводили методом просвечивающей микроскопии на электронном микроскопе JEM-2000EX.

Химический состав стали ЧС-68
(ТУ 14-3-1511-87)

Элемент	% вес.	Элемент	% вес.
Fe	Основа	Ti	0,2-0,5
Cr	15,5-17,0	V	0,10-0,30
Ni	14,0-15,5	Co	<0,02
C	0,05-0,08	B	0,001-0,003
Mo	1,9-2,5	N	<0,02
Mn	1,3-2,0	P	<0,020
Si	0,3-0,6	S	<0,012

Результаты испытаний. Исследования кратковременных механических свойств стали ЧС-68 (20 % х.д.), облученной до 10-20 с.н.а, показали, что в диапазоне температур испытания материал сохраняет характеристики прочности на уровне исходных значений либо выше ($\sigma_b^{20} = 870-1200$ МПа, $\sigma_b^{650} = 480-620$ МПа).

Увеличение повреждающей дозы до 37 с.н.а лишь незначительно снижет предел прочности материала при температурах испытаний 20-550 °С, но при более высокой температуре 600-700 °С наблюдается заметное разупрочнение образцов

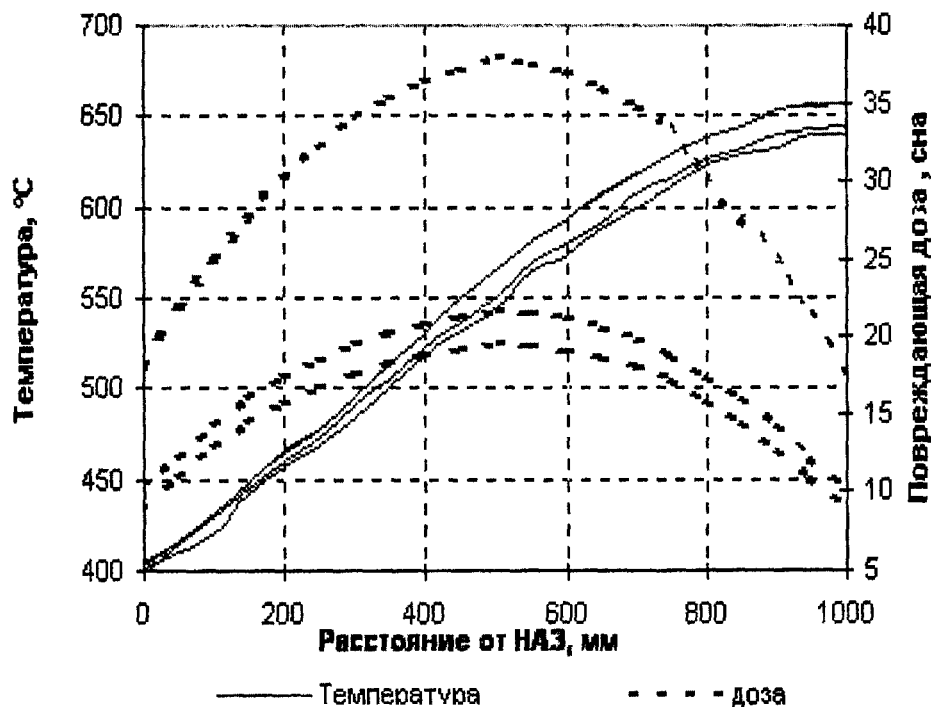
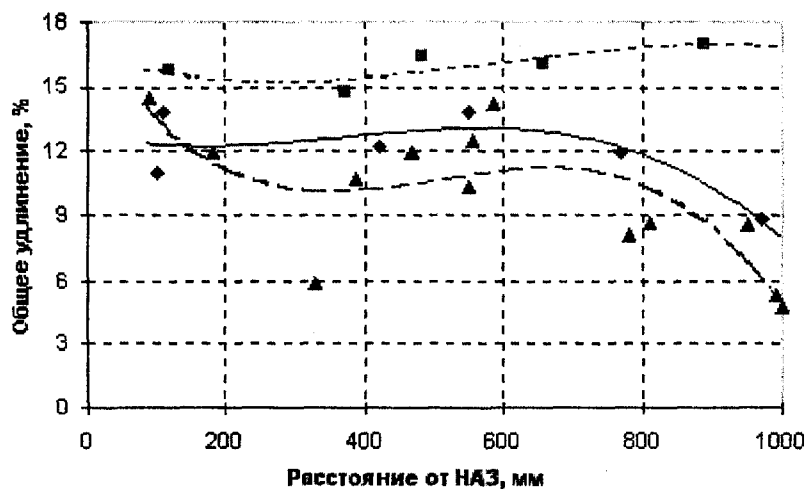


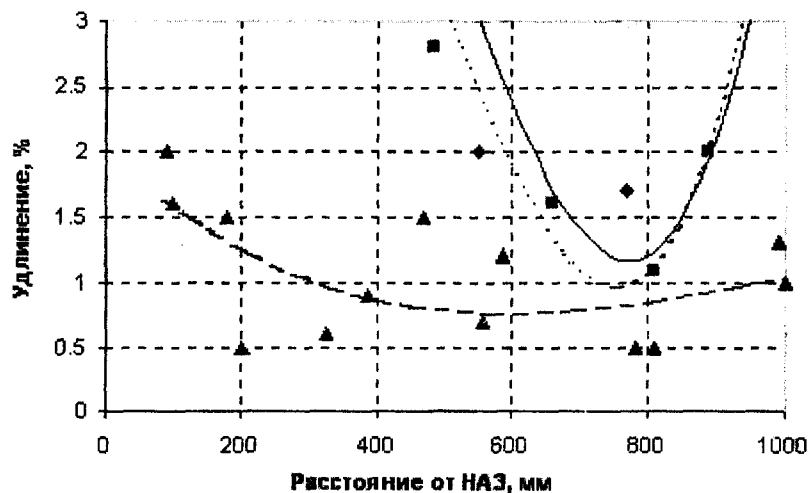
Рис.1. Условия эксплуатации стали ЧС-68 х.д. в реакторе БН-600 (каждая кривая соответствует разному твэлу).

(до $\sigma_{\text{в}}^{650} = 250-320$ МПа) по сравнению с исходным состоянием, за которое принимается район нижней газовой полости твэлов (ГП).

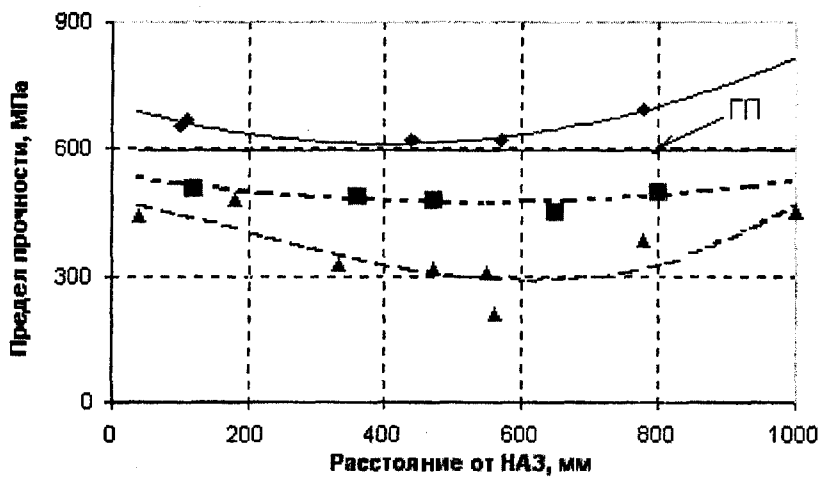
Поведение пластичности стали ЧС-68 х.д. под облучением оказывается значительно более чувствительным к параметрам эксплуатации.



а



б



◆ Dmax-22 сна ■ Dmax-20 сна ▲ Dmax-37 сна

в

Рис. 2. Механические свойства материала оболочек твэлов реактора БН-600: а – $T_{\text{исп}} = 20^\circ\text{C}$; б, в – $T_{\text{исп}} = 600-650^\circ\text{C}$.

При комнатной температуре испытаний общее относительное удлинение большей части образцов при дозах до 37 с.н.а находится в пределах 8-17 %, имея слабую тенденцию уменьшения значений с ростом дозы (рис. 2, а).

Повышенные температуры испытаний приводят к резкому падению пластичности стали уже после доз 19-20 с.н.а. Наиболее сильный эффект наблюдали для материала, облученного при температурах 560-640 °С. На рис. 2, б показано, что при повреждающей дозе 20-22 с.н.а минимальные значения $\delta_{\text{общ}}$ после эксплуатации в указанном интервале температур уже не превышают значений 1-1,7 %.

В то же время при температуре эксплуатации 400-450 °С и дозе 22 с.н.а $\delta_{\text{общ}}^{650} = 5-7,5 \%$.

При достижении повреждающей дозы 37 с.н.а пониженная пластичность (2 %) при высоких температурах испытаний отмечена в стали ЧС-68 х.д. даже после облучения при 400 °С, а минимальные значения $\delta_{\text{общ}}^{600-650}$ при более высоких температурах облучения составляют 0,5-0,7 % (рис. 2, б).

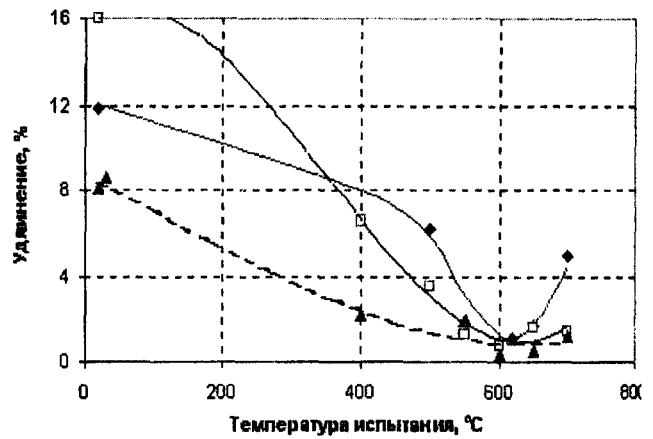
Высокотемпературное падение пластичности материала оболочек сопровождается заметным разупрочнением, которое наиболее существенно при дозах облучения 30-37 с.н.а. (рис. 2, в).

Температурная зависимость механических свойств образцов, вырезанных из оболочек твэлов с температурой наружной поверхности во время эксплуатации 590-640 °С, представлена на рис. 3. Данные показывают резкий провал пластичности у стали при температурах испытаний 600-650 °С как при дозах 19-21 с.н.а, так и при 30 с.н.а. Удлинение образцов при $T_{\text{исп}} = 700 \text{ °С}$ незначительно возрастает.

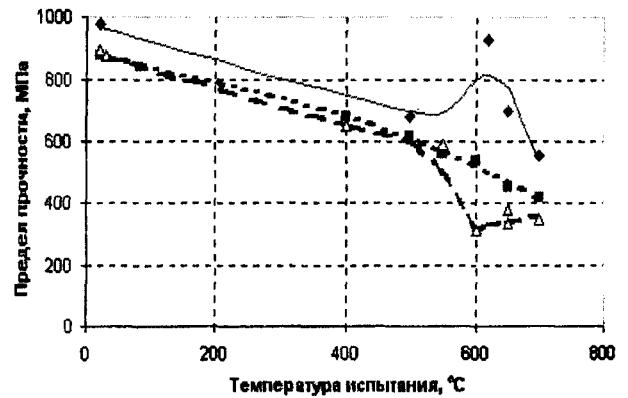
Низкотемпературное облучение (при 400-500 °С) не сопровождается существенным ($\delta_{\text{общ}}^{600-650}$ менее 5 %) снижением пластичности стали ЧС-68х.д., по крайней мере ниже повреждающей дозы 15 с.н.а.

Предел прочности материала оболочек после высокотемпературного облучения характеризуется провалом в области температуры испытания 600-650 °С, но только по-

сле облучения дозами нейтронов выше 30 с.н.а (рис.3).



а



◆ D= 19 сна (Тобл-620 °С) ■ D= 21 сна (Тобл-590 °С) ▲ D=30 сна (Тобл-640 °С)

б

Р и с. 3. Влияние температуры испытаний на пластичность и прочность образцов оболочек твэлов.

В процессе микроструктурных исследований стали ЧС-68 х.д. изучены дислокационная структура, характер и распределение выделений и радиационных пор. Для состояния материала в районе ГП твэлов характерна ячеистая дислокационная структура с плотностью дислокаций $(1,3-2,6) \cdot 10^{14} \text{ м}^{-2}$. Выделения фаз (типа $M_{23}C_6$, M_6C , MC) наблюдаются внутри и на границах зерен. Размер основной массы выделений составляет 0,02-0,2 мкм. Доля границ, занятая выделениями, составляет 3-6 %.

Структура стали после облучения при 565 °С примерно до 20 с.н.а показана на рис. 4. Характерным является высокая концентрация внутризеренных мелкодисперс-

ных (размером 2-10 нм) выделений типа МС на уровне $(0,7-6) \cdot 10^{21} \text{ м}^{-3}$. При температурах выше 620 °С мелкодисперсная фаза не обнаружена.

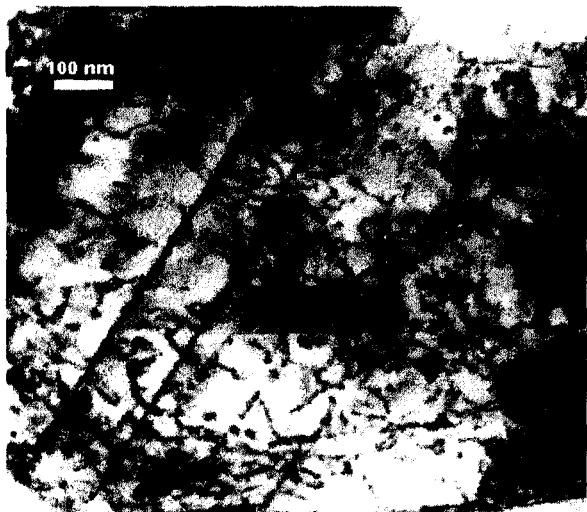


Рис. 4. Мелкодисперсные выделения МС, выпавшие в стали ЧС-68 (20 % хд) при облучении при температуре 565 °С до 19.5 с.н.а.

Также в условиях высоких температур при дозах 20-37 сн.а происходит резкое увеличение (до 50-90 %) доли границ, занятых выделениями (рис.5). Облучение при более низких температурах тоже сопровождается выпадением фаз на границах зерен, но даже при дозе около 30 с.н.а доля границ с выделениями не превышает 20-40 %.

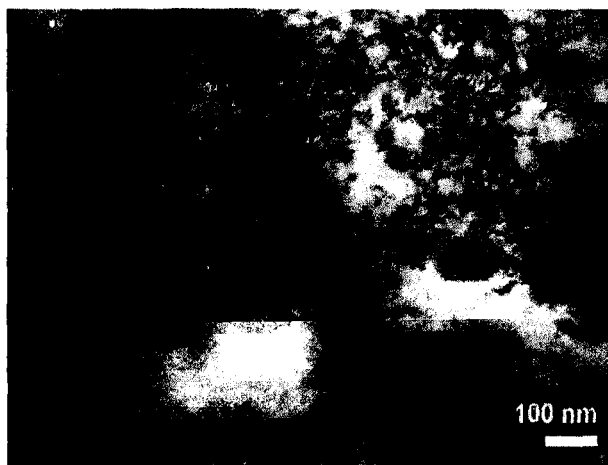


Рис. 5. Выделения $M_{23}C_6$ на границе после облучения при 565 °С до 21 с.н.а.

Повышение температуры эксплуатации стали ЧС-68 х.д. от 400 °С до 650 °С для интервала доз 11-37 с.н.а отражается в практически монотонном росте размера относительно крупных выделений с 30 до 80 нм.

В стали, облученной при 430 °С до 13 с.н.а обнаружены радиационные поры средним размером 10 нм и концентрацией $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

При повреждающей дозе 30 с.н.а и температуре эксплуатации 465 °С концентрация пор достигает $6,3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, а средний размер – 17 нм (рис.6). В то же время при температурах облучения выше 515 °С в интервале доз 20-37 с.н.а концентрация пор находится на уровне $1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. Средний размер пор при повышенных температурах достигает 30 нм.

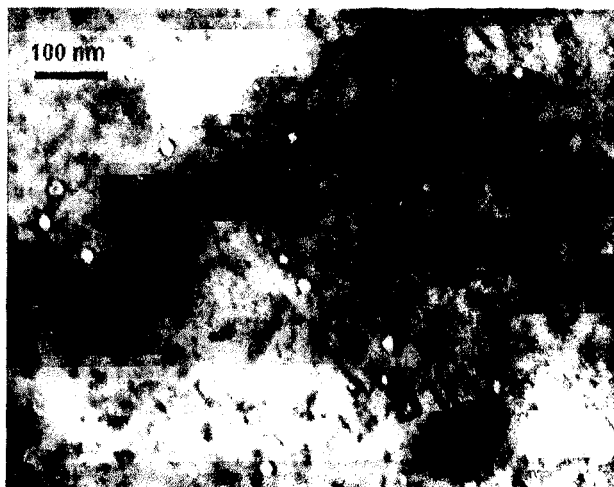


Рис. 6. Поры в образце оболочки, облученном при 465 °С до 30 с.н.а.

Обсуждение результатов. Использование стали марки ЧС-68 в холоднодеформированном (20%) состоянии для оболочек быстрых реакторов позволило обеспечить достижение повреждающей дозы в условиях реактора БН-600 порядка 90 с.н.а без разгерметизации [1], что позволяет рассматривать данный материал аустенитного класса приемлемым для эксплуатации до достижения повреждающей дозы ~80 с.н.а.

В то же время приведенные данные показывают, что механические свойства и структура стали ЧС-68 х.д. существенно изменяются на ранних стадиях облучения и в значительной степени зависят от температуры.

Результаты исследования при дозах ~20 с.н.а показывают, что в области высокотемпературной эксплуатации (590-640 °С) для стали ЧС-68 х.д. развивается ускоренный процесс снижения пластических свойств.

Для умеренных температур эксплуатации (400-556 °С) эффект падения пластичности материала оболочек твэлов до малых значений при высокотемпературных испытаниях наблюдается на более поздней стадии, для доз выше 30 с.н.а.

Общим фактором, ответственным за снижение пластичности конструкционных материалов под облучением, является образование радиационных дефектов. Результаты микроструктурных исследований показывают, что в исследованном диапазоне условий эксплуатации стали ЧС-68 х.д. ухудшение механических свойств, главным образом, может быть связано с образованием и ростом при высоких температурах в матрице материала мелкодисперсных вторичных фаз, а также с ростом доли занятых выделениями границ зерен.

В результате этих процессов при испытаниях увеличивается вероятность локализации механической деформации в приграничных областях матрицы. Прочность границ понижается, и разрушение может происходить в значительной степени интеркристаллитно вдоль границ [3].

Процесс порообразования на этапе облучения стали ЧС-68 х.д. в реакторе БН-600 до 10-37 с.н.а находится в начальной стадии, поэтому вкладом радиационного набухания в деградацию механических свойств материала оболочек, по-видимому, здесь можно пренебречь.

Заключение. Установлено, что после высокотемпературного облучения до 19-21 с.н.а общее относительное удлинение образцов из стали ЧС-68 х.д. при температурах испытаний 600-650 °С составляет 1-1,7 %.

Повышение повреждающей дозы до 37 с.н.а приводит к снижению $\delta_{\text{общ}}^{650}$ до значений 0,5-0,7 %.

Склонность к падению пластичности при высоких температурах испытаний в первую очередь проявляется у материала, облученного в температурном диапазоне 560-640 °С.

Процесс падения пластичности стали ЧС-68 х.д., облученной при температурах 560-640 °С, связан с выпадением внутри зерен мелкодисперсной фазы и ослаблением границ зерен.

Библиографический список

1. Кинев Е.А., Агопьян А.В., Аверин С.А., Калашник Г.В. Состояние твэлов ТВС 917137489 реактора БН-600 после достижения максимальной повреждающей дозы 93,7 с.н.а // Сборник докладов Четвертой межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. – Дмитровград, 1996. – Т. 3. – С.137-147

2. Чуев В.В., Огородов А.Н., Шейнкман А.Г., Ланских В.Н. Служебные свойства конструкционных материалов тепловыделяющих сборок реактора БН-600 при высоких повреждающих дозах // Физика металлов и металловедение. – Т.81. – Вып. 3. – 1996. – С. 133-141

3. Аверин С.А., Кинев Е.А., Барсанов В.И., Панченко В.Л. К вопросу о разупрочнении холоднодеформированных аустенитных сталей после высокодозного облучения // Сборник докладов Третьей межотраслевой конференции по реакторному материаловедению. – Дмитровград, 1994. – Т.2. – С.5-30.

4. Kozlov, A.V., Averin, A.S., Brushkova S.V. "A problem to determine short term mechanical properties changes of ferrite-martensite and austenitic steels as materials of fuel assembly of fast reactors under high dose neutron irradiation", Influence of high dose irradiation on core structural and fuel materials in advanced reactors, Obninsk, 1997, p.211-221.

УДК 539.4

О ПРИРОДЕ КОРРОЗИОННОГО РАСТРЕСКИВАНИЯ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ

К.А. Никишина, Р.Н. Кикичев

С.-Петербург, С.-Петербургский государственный технический университет

Коррозионное растрескивание, или коррозия под напряжением, вызывается совме-

стным действием коррозионной среды и растягивающих напряжений. Общая корро-