ВЛИЯНИЕ НИЗКОДОЗНОГО НЕЙТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИТОЙ СТАЛИ CF8

С.Б. Кислицин, О.П. Максимкин, А.С. Диков, М.С. Мережко,
О.В. Рофман, Л.Г. Турубарова, Н.С. Сильнягина
Институт ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,
ул. Ибрагимова 1, 050032 Алма-Ата, Казахстан, skislitsin@inp.kz

Исследовано влияние низкодозного нейтронного облучения на структуру и физико-механические свойства сталей CF-8 несостаренной и CF-8 состаренной. Показано, что облучение до флюенса $6.2\cdot10^{19}$ н/см$^{-2}$ по быстрым нейтронам приводит к появлению в структуре скоплений точечных дефектов (black dots) и образованию вторичных фаз нитридов хрома. Облучение приводит к значительному упрочнению несостаренной и состаренной сталей CF-8 и снижению пластичности на ~ 60% несостаренной стали CF-8 и ~ 35% состаренной стали CF-8.

Введение

Литые аустенитные нержавеющие стали широко применяются для изготовления изделий, в которых требуется высокая коррозионная стойкость. Наиболее используемые для этих целей марки американских литых нержавеющих сталей: CF-3, CF-8, CF-3M и CF-8M. Элементный состав стали CF-8 приведен в таблице 1.

Таблица 1. Элементный состав стали CF-8 (вес.%)

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Fe
0.08	1.50	2.00	0.04	0.04	18-21	8-11	основа

По элементному составу сталь CF-8M отличается от стали CF-8 добавкой Mo в количестве 2-3 вес.%. Ближайший аналог литой стали CF-8 - полуфабрикат стали 304, и они близки по составу, но структура и состав этих сталей все-таки различаются. Основное различие состоит в том, что, как правило, литая сталь CF-8 содержит ~ 10% феррита, что улучшает ее обработку и свариваемость. Так, CF-8 содержит большее количество ферритообразующих элементов, в первую очередь, хрома, что ведет к улучшению локальной коррозионной стойкости и коррозионной стойкости под напряжением. Преципитация карбидов хрома на границах зерен имеет место при медленном остывании или выдержке при температурах выше 450°C. Одновременно прилегающие к границе зерен области обедняются хромом, что ведет к усилению межкристаллитной коррозии. Ближайшим советским аналогом стали является сталь Х18Н9.

Интерес к литым сталям вызван возможностью замены дорогостоящих сталей 316, 304, 321 значительно менее дорогими литыми сталями в менее критичных узлах ядерных установок. Исследованию деградации свойств стали американского производства CF-8 после низкодозного нейтронного облучения посвящена данная работа. Образцы для исследования предоставлены Аргонской национальной лабораторией (АНЛ) США.

Образцы для исследований, методы исследования, нейтронное облучение

АНЛ предоставила для исследований образцы стали CF-8 двух видов: CF-8 несостаренная (CF-8 unaged) и CF-8 состаренная (CF-8 aged), т.е. отожженные в течение 10000 ч при температуре 350°C. Изучение структуры и свойств до и после нейтронного облучения выполнялись методами оптической микроскопии (ОМ), измерения микротвердости (ИМ), измерения гидростатической плотности (ГП), просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ), механических испытаний на одноосное растяжение с постоянной скоростью деформации (МИ). Исследования проводились на образцах в состоянии поставки из АНЛ, т.е. без дополнительной термомеханической обработки. Образцы представляли собой: для ОМ и ИМ и ГП - пластины 10 мм × 10 мм × 1 мм; для МИ – плоские в виде двойной лопатки с размерами рабочей части 10 мм × 2 мм × 0.6 мм; для ПЭМ – диски диаметром 3 мм и толщиной 0.6 мм.

Облучение проводилось в «мокром» канале реактора ВВР-К (ИЯФ, Алматы, Казахстан), плотность потока по тепловым нейтронам составила $4.8\cdot10^{13}$ н/см^{2}с и $2.8\cdot10^{12}$ н/см^{2}с по быстрым нейтронам. Облучены две партии образцов сталей CF-8 unaged и CF-8 aged. Суммарный нейтронный поток для образцов первой партии составил: $2.3\cdot10^{19}$ н/см$^{-2}$ по быстрым нейтронам и $4\cdot10^{20}$ н/см$^{-2}$ по тепловым нейтронам. Для второй партии образцов суммарный поток составил $6.2\cdot10^{19}$ н/см$^{-2}$ по быстрым нейтронам и $7\cdot10^{20}$ н/см$^{-2}$ по тепловым нейтронам. Температура облучения составляла ~ 90°C.

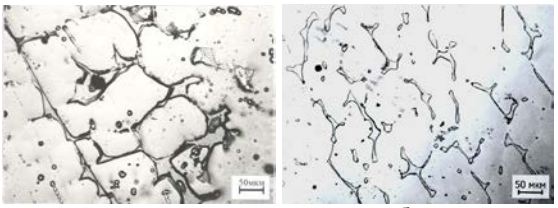
Результаты исследований и их обсуждение

Структура

Выполненные до облучения исследования структуры показали, что CF-8 unaged представляет собой нестабильную сталь с содержанием δ - ферритной фазы ~ 10 % в форме дендритов. В структуре также присутствуют включения карбидов хрома ($Me_{23}C_6$). Нет ярко выраженных границ зерен (рис. 1 а). В δ-феррите наблюдаются выделения σ-фазы, кристаллизирующейся на границах зерен аустенит – феррит.

Микроструктура образца стали CF-8 unaged после облучения практически не изменилась и представляет собой дендриты феррита в аустенитной матрице (рис. 1 б). По-прежнему в структуре присутствуют различные выделениями карбидов и σ-фазы. Можно отметить уменьшение

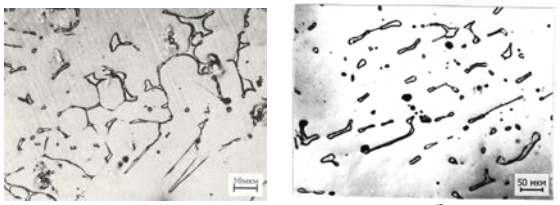
содержания феррита до ~ 8%. По-видимому, при флюенсе облучения быстрых нейтронов ~ $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 начинается распад ферритной фазы.



а б

Рис. 1. Дендриты δ-феррита в аустенитной матрице стали CF-8 unaged: а – до облучения б – после облучения флюенсом $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 по быстрым нейтронам

Структура стали CF-8 aged в целом соответствует структуре стали CF-8 unaged, однако старение привело к тому, что сохранилось незначительное количество ферритной фазы (~ 2%). Мелкие включения переходят в твердый раствор аустенита, а более крупные уменьшаются в размере (рис. 2 а). Отметим, что результаты по исследованию структуры и физико-механических свойств необлученной стали CF-8 aged согласуются с литературными данными [1].



а б

Рис. 2. Структура стали CF-8 aged: а – до облучения; б – после облучения флюенсом $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 по быстрым нейтронам

Облучение до флюенса $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 также не привело к кардинальным изменениям структуры - содержание ферритной фазы не изменилось. Отличия от необлученного состоят в появлении выделений нитридов хрома CrN, Cr_2N.

Результаты исследований ПЭМ методом согласуются с результатами металлографических исследований. Также установлено, что плотность дислокаций в обеих сталях CF-8 unaged и CF-8 aged осталась на том же уровне, что и до облучения: в стали CF-8 unaged ~ 10^8 см$^{-2}$, и в стали CF-8 aged ~ $13 \cdot 10^8$ см$^{-2}$. Существенным является формирование в теле зерна мелких кластеров точечных дефектов (black dots), размерами 2 - 8 нм в стали CF-8 unaged и размерами 2 - 10 нм в стали CF-8 aged (рис. 3).

Физико-механические свойства

Эффекты воздействия низкодозного нейтронного облучения на физико-механические свойства сталей CF-8 unaged и CF-8 aged показаны на рис. 4 и 5, где приведены зависимости микротвердости, пластичности и прочности этих сталей от флюенса быстрых нейтронов. Отметим, что

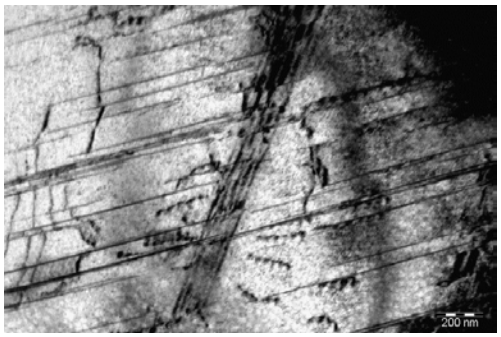


Рис. 3. Дислокационная структура и мелкодисперсные выделения в стали CF-8 aged после облучения флюенсом $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 по быстрым нейтронам

измеренные нами характеристики микротвердости, прочности и пластичности до нейтронного облучения согласуются с литературными данными [1] (таблица 2).

Таблица 2. Механические свойства стали CF-8 aged до нейтронного облучения

CF-8 aged	Hμ, кг/мм^2	P, г/см^3	$\sigma_{0,2}$, МПа	σв, МПа	δ, %
В данной работе	191	7.87	295	515	72 %
Ссылка [1]	-	-	255	530	55%

Зависимости Hμ от флюенса быстрых нейтронов для сталей CF-8 unaged и CF-8 aged показаны на рис 4.

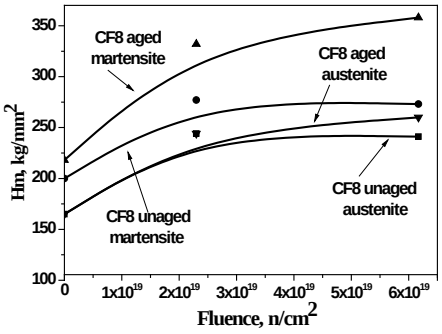
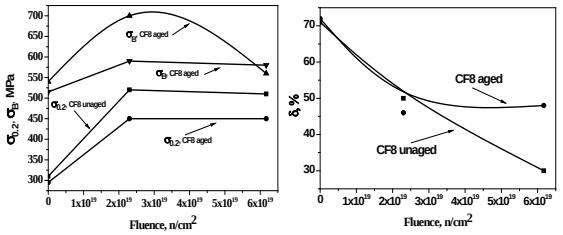


Рис. 4. Микротвердость аустенитной и ферритной фаз в сталях CF-8 unaged и CF-8 aged в зависимости от флюенса быстрых нейтронов

Как видно из рис.4, Hμ ферритной фазы выше микротвердости аустенитной фазы. Для зависимостей величины Hμ от флюенса как для стали CF-8 unaged, так и CF-8 aged характерно резкое увеличение до флюенса $2.3 \cdot 10^{19}$ н/см^2. Далее с увеличением флюенса до $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 прирост Hμ для стали CF-8 aged снижается, в то время как для стали CF-8 unaged Hμ практически не изменяется по сравнению микротвердостью при флюенсе $2.3 \cdot 10^{19}$ н/см^2. Поскольку механические свойства, в конечном счете, определяются структурой материала, то практически одинаковые значения микротвердости при флюенсах $2.3 \cdot 10^{19}$ н/см^2 и $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 свидетельствуют о неболь-

ших различиях в структуре сталей CF-8 unaged и CF-8 aged при этих флюенсах.

Изменение механических свойств сталей CF-8 unaged и CF-8 aged после низкодозного нейтронного облучения нейтронам показаны на рис. 5 а, б.



а б

Рис. 5. Изменение пределов текучести $\sigma_{0.2}$, прочности σ_B и полной деформации δ сталей CF-8 unaged и CF-8 aged в зависимости от флюенса быстрых нейтронов; а - $\sigma_{0.2}$ и σ_B; б – δ

Из приведенных на рис. 5 а, б зависимостей видно, что облучение до флюенса $2.3 \cdot 10^{19}$ н/см^2 приводит к существенным увеличению прочностных свойств сталей CF-8 unaged и CF-8 aged и снижению пластичности этих сталей. При дальнейшем росте флюенса до $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 для стали CF-8 aged значения $\sigma_{0.2}$, σ_B, так же, как и δ, остаются неизменными. Зависимости $\sigma_{0.2}$, σ_B и δ от флюенса аналогичны зависимости микротвердости – на начальном этапе облучения наблюдается резкое изменение этих характеристик, а далее с ростом флюенса облучения их величины остаются практически постоянными. Объяснением этого может быть то, что изменения микроструктуры стали CF-8 aged в интервале флюенсов $2.3 \cdot 10^{19}$ - $6.17 \cdot 10^{19}$ н/см^2 минимальны, следовательно и изменения механических свойств также минимально.

Несколько иная картина наблюдается для стали CF-8 unaged. Аналогично тому, что наблюдается для стали CF-8 aged, предел текучести этой стали резко увеличивается при флюенсе быстрых нейтронов $2.3 \cdot 10^{19}$ н/см^2 и не изменятся с увеличением флюенса нейтронов до $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2. В то же время, предел прочности стали CF-8 unaged при облучении до флюенса $2.3 \cdot 10^{19}$ н/см^2 также возрастает, но далее при флюенсе нейтронов $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см^2 уменьшается до уровня необлученной стали (рис. 5 а). Пластичность стали CF-8 unaged монотонно уменьшается во всем интервале флюенсов нейтронов. Это может следствием того, что литая сталь CF-8 unaged находится в нестабильном состоянии, и облучение способствует ее переходу в более стабильное состояние.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

Исследовано влияние низкодозного нейтронного облучения на структуру и физико-механические свойства литой стали CF-8. Облучение быстрыми нейтронами до флюенса $6.2 \cdot 10^{19}$ н/см$^{-2}$ приводит к появлению в структуре скоплений точечных дефектов (black dots) и образованию вторичных фаз нитридов хрома. Это ведет к значительному упрочнению несостаренной и состаренной сталей CF-8 и снижению пластичности на ~ 60% несостаренной стали CF-8 и ~ 35% состаренной стали CF-8. При этом деградация физико-механических свойств стали CF-8 сопоставима с деградацией механических свойств конструкционной стали 12Х18Н10Т, облученной до тех же повреждающих доз [2].

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ К-1198.

Список литературы

1. ttp://www.stainless-steel-world.net/pdf/11022.pdf.
2. *Kadyrzhanov K.K., Kislitsin S.B., Maksimkin O.P., Romanenko O.G.* Degradation in Mechanical Properties of Stainless steel 12Cr18Ni10Ti and 08X16H4M3 – materials for hexagonal Ducts of Spent fuel assemblies from the BN-350 Fast Reactor. // Material of Safety Related issues of Spent Nuclear Fuel storage. NATO sciences Series. 2007. P. 329-349.

INFLUENCE OF LOW-DOZE NEUTRON IRRADIATION ON STRUCTURE AND PHYSICAL MECHANICAL PROPERTIES OF CAST STEEL CF8

S.B. Kislitsin, O.P. Maksimkin, A.S. Dikov, M.S. Merezhko,
O.V. Rofman, L.G. Turubarova, N.S. Sil'nagina
Institute of Nuclear Physics of the Ministry of Energy of Republic Kazakhstan,
1 Ibragimov str., 050032 Alma-Ata, Kazakhstan, skislitsin@inp.kz

Effects of low-dose neutron irradiation on the structure and physical-mechanical properties of CF-8 unaged and CF-8 aged steels were studied. It is shown that irradiation by fast neutrons to a fluence of $6.2 \cdot 10^{19}$ n/cm^{-2} leads to the appearance in the structure small clusters of point defects (black dots) and the formation of secondary phases of chromium nitrides. Irradiation results in a significant hardening of unaged and aged CF-8 steels and a decrease in plasticity by ~ 60% of the unaged CF-8 steel and by ~ 35% of the aged CF-8 steel.