

## ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СТАЛИ ЧС-68(Х.Д.) ПОСЛЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ В РЕАКТОРЕ БН-600 ДО МАКСИМАЛЬНОЙ ПОВРЕЖДАЮЩЕЙ ДОЗЫ

Е.А. Кинев,  
А.В. Агопьян,  
С.А. Аверин  
(НИКИЭТ, г. Заречный,  
Свердловской обл.)

Аустенитная хромо-никелевая сталь класса 16-15 марки ЧС-68 в холоднодеформированном (20%) состоянии широко используется в качестве материала для изготовления оболочек твэлов реакторов на быстрых нейтронах. Вопрос о ресурсных возможностях данного материала в реальных условиях эксплуатации (применительно к конкретному реактору) является достаточно актуальным. В частности, до настоящего времени остается открытым вопрос о способности стали ЧС-68(х.д.) обеспечить выгорание 12 % т.а. при дозах порядка 90-100 с.н.а. в условиях реактора БН-600.

Решающее значение для оценки служебных свойств материала оболочек твэлов имеют послереакторные исследования. Данная работа основана на результатах исследования штатной ТВС реактора БН-600, имевшей наибольший срок эксплуатации в активной зоне.

*Материал исследования.* Исследовалось состояние материала оболочек (сталь марки ЧС-68 х.д.) твэлов ТВС 917137489 реактора БН-600 после достижения максимальной повреждающей дозы 93,7 сна.

ТВС 917137489 эксплуатировалась в течение 24-27 микрокампаний в составе АЗ реактора БН-600. Суммарная наработка ТВС составила 660 эффективных суток. При этом максимальное выгорание топливной композиции (двуокись урана) составило 11,2 % т. а.

В процессе эксплуатации твэлы сборки сохранили герметичность. Однако, при разделке ТВС в "горячей камере" БН-600 (по штатной технологии) произошло их массовое разрушение.

Объектом последующих исследований в СФ НИКИЭТ являлись твэлы №9(герметичный по газу), №55(негерметичный по газу), №66 (визуально наблюдаемый дефект оболочки в районе ЦАЗ при первичном осмотре, разрушение по дефекту при транспортировке).

Теплофизические параметры эксплуатации отобранных твэлов были близки между собой. Максимальная линейная тепловая нагрузка составляла порядка 37 квт/м, максимальное выгорание -10,9% т. а. , максимальная повреждающая доза - 91,3 с.н.а., температура теплоносителя на выходе - 580-600 °С.

*Результаты исследования.* Исследования проводились методами профилометрии, металлограффии, макрофотосъемки, кратковременных механических испытаний, измерения гидростатической плотности.

В процессе разделки были отмечены крайне низкие прочностные и пластические свойства оболочек. Наблюдалось разрушение кольцевых образцов и растрескивание оболочек в центральной части АЗ.

ТВЭЛ 66 при транспортировке разрушился на участке длиной 130 мм ниже ЦАЗ на 160-290 мм.

Разрушение произошло в осевом направлении и носило хрупкий характер, явных следов пластической деформации оболочки не наблюдалось.

Исследование данного типа разрушения при высоком разрешении методами фрактографии показывает, что разрушение имеет транскристаллитный квазихрупкий характер. При этом наблюдается большое количество плоских участков с мелкочашечным рельефом, связанным с высокой радиационной пористостью материала.

Профилометрия твэлов показала, что максимальное формоизменение оболочек твэлов 9 и 55 произошло ниже ЦАЗ на 120 мм. При этом формоизменение твэлов достигло 9,0% и 7,5% соответственно (табл. 1).

Максимальное формоизменение твэла 66 имело место ниже ЦАЗ на 200 мм и составляло 9,4% от исходного значения диаметра оболочки.

Таблица 1. Формоизменение оболочек твэлов, %

№ ТВЭЛ	Относительная координата, Хотн						
	-0,2	0,18	0,28	0,38	0,48	0,58	0,68
9	0	6,1	8,8	9,0	7,2	2,9	0,8
55	0	4,8	6,8	7,5	6,9	3,1	1,0
66	0	4,2	9,4	8,2	8,4	6,2	3,1

Примечание: Хотн =  $l/L$ , где  $l$  - координата от низа активной зоны;  $L$  - длина активной зоны.

Известно, что основной вклад в формоизменение оболочек твэлов реактора БН-600 при высокодозном облучении дает радиационное распухание аустенитной стали. Значения плотности и распухания материала оболочки твэла 9 приведены в табл.2.

Таблица 2. Плотность и распухание материала оболочки твэла 9

	Относительная координата, Хотн						
	-0,2	0,18	0,28	0,38	0,48	0,58	0,68
плотность, г/см <sup>3</sup>	7,41	6,40	6,01	5,98	6,21	6,72	7,31
распухание, %	0	15,8	23,3	23,9	19,3	10,3	1,4

Определение кратковременных механических свойств оболочек твэлов проводили на дистанционной разрывной машине 1236р/1500 при температурах 20 °С и 650 °С в вакууме.

Испытания проводили на кольцевых образцах высотой 3 мм. Скорость движения активного захвата при одностороннем растяжении колец составляла 1,0 мм/мин.

Характер изменения прочностных и пластических свойств оболочек всех исследованных твэлов по длине АЗ был подобен.

В районе ГП материал оболочек сохранял высокую пластичность ( $\delta$  общ=13-18%), одновременно наблюдался эффект радиационного упрочнения ( $\delta$  в=950-1000 МПа).

В то же время, практически на большей части длины АЗ, материал оболочек твэлов утратил запас прочностных и пластических свойств. Это проявилось на участке с координатами Хотн=0,2-0,6 (ниже ЦАЗ на 300 мм - выше ЦАЗ на 100 мм).

Предел прочности кольцевых образцов из центральной части активной зоны твэлов не превышал 10-15 МПа. Механические свойства оболочек твэлов, в ряде случаев, характеризовались отсутствием температурной зависимости в диапазоне температур испытаний 20-650 °С.

Среди исследованных твэлов наиболее низкие значения кратковременных мехсвойств были отмечены на твэле бб с максимальным формоизменением (табл. 3).

Таблица 3. Кратковременные мехсвойства оболочки твэла бб

	Относительная координата, Хотн						
	-0,2	0,20	0,30	0,34	0,42	0,52	0,62
$\sigma$ в, МПа	950/440	30/60	место разрыва	20/40	15/15	30/25	70/50
$\delta$ общ, %	14/11	0/0,3	-	0/0	0/0	0/0	0/0

Примечание: числитель - Тисп = 20°С, знаменатель - Тисп = 650°С

Сопоставление профилограмм и диаграмм кратковременных мехсвойств оболочек твэлов свидетельствовало о корреляции кратковременных механических свойств материала оболочек с величиной его набухания.

Для исследования состояния оболочек твэлов металлографическими методами производилось изготовление торцевых шлифов образцов оболочек.

Исследование состояния внутренней поверхности образцов на полированных шлифах и после травления зеренной структуры показало, что внутритвэльная поверхность оболочек поражена коррозионным растрескиванием (КР) и межкристаллитной коррозией (МКК). Коррозионное растрескивание оболочек протекало интеркристаллитно под влияни-

ем воздействия внутритвэльного давления и агрессивного воздействия продуктов деления топливной композиции. Глубина интеркристаллитных трещин на твэлах 9 и 66 достигала 45-75 мкм. В центре АЗ (при дозе порядка 91 с.н.а. и температурах 500-530°C) материал оболочек твэлов, как правило, имел максимальные повреждения КР и МКК.

В местах наиболее сильного развития МКК отмечалось выкрашивание отдельных зерен металла.

Химическое травление образцов также позволило установить наличие слоя фронтальной коррозии (ФК) металла с внутренней стороны оболочек. В нижней части АЗ слой ФК имел плотную структуру и четкую грань перехода к основному металлу. Толщина слоя - 10 мкм. В центральной части АЗ этот слой более рыхлый и толщина его больше (до 15-38 мкм). Наблюдалась тенденция к увеличению степени ФК с ростом температуры оболочки от 400°C до 550°C.

Состояние наружных поверхностей оболочек исследованных твэлов не вызывало опасений ввиду практически полного отсутствия коррозии и взаимодействия с теплоносителем.

Анализ результатов измерения микротвердости показал, что внутренние слои оболочек с признаками фронтальной коррозии обладали крайне низкой твердостью порядка 120-155 кгс/мм<sup>2</sup>. Слой металла (10-20 мкм), непосредственно прилегающий к слою ФК, отличался повышенной твердостью (260-350 кгс/мм<sup>2</sup>), а остальная часть оболочки обладала практически одинаковой по всей толщине до наружной поверхности микротвердостью (220-280 кгс/мм<sup>2</sup>).

Таким образом, методами металлографии показано, что оболочки твэлов после эксплуатации в течение 660 эффективных суток имеют достаточно серьезные повреждения, обусловленные физико-химическими коррозионными процессами. Глубина повреждений достигала порядка 15-17 % от толщины оболочки.

Комплекс проведенных послереакторных исследований твэлов ТВС 917137489 реактора БН-600 свидетельствует о том, что практически достигнут рубеж безопасной эксплуатации такого материала аустенитного класса, каким является сталь ЧС-68(х.д.) в штатном исполнении.

Крайне низкие прочностные свойства, нулевая пластичность, высокие объемные изменения, интенсивные коррозионные процессы свидетельствуют о неблагоприятном состоянии материала оболочек.

Несмотря на то, что реальные условия эксплуатации ТВС 917137489 (напряженно-деформированное состояние, тепловой режим) еще не привели к аварийному разрушению твэлов в активной зоне, такое разрушение можно ожидать в любой момент при дозах более 91-93 с.н.а. Тем более, разрушение можно предвидеть при любых транспортных операциях с подобными сборками.

Использование стали ЧС-68(х.д.) при дозах более 91-93 с.н.а. и выгорании более 11,2% т.а. в условиях реактора БН-600 не отвечает требованиям надежности и эксплуатации.