

му материаловедению. Димитровград, 27—31 мая 2019 г., с. 37—39.

8. Гринчук П.П., Голованов В.Н., Солонин М.И. и др. Радиационная и коррозионная стойкость сплава ХНМ-1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2005, вып. 1 (64), с. 273—280.

9. Шишин В.Ю., Шельдяков А.А., Власов Ю.А. и др. Результаты термических испытаний опытных твэлов с оболочками из хромоникелевого сплава. — В сб.: Труды АО «ГНЦ НИИАР». Димитровград, 2019, вып. 3, с. 48—53.

Поступила в Редакцию 24.07.20

УДК 621.039.524:691.714.018.8

СПЛАВ 42ХНМ И КАРБИД КРЕМНИЯ КАК МАТЕРИАЛ ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ, УСТОЙЧИВЫХ К АВАРИЯМ

Карпюк Л.А., Новиков В.В., Кулаков Г.В., Коновалов Ю.В., Леонтьева-Смирнова М.В., Голубничий А.А., Иванов С.И., Макаров Ф.В., Глебов А.В. (АО «ВНИИНМ», г. Москва)
e-mail: lakarpyuk@bochvar.ru

В настоящей статье приведены результаты исследования способов получения и оптимизации свойств таких материалов, как хромоникелевый сплав 42ХНМ и карбид кремния, предназначенных для изготовления оболочек твэлов, устойчивых к аварии.

Сплав 42ХНМ. Сплав содержит 42% по массе хрома, 1,5% по массе молибдена, остальное никель, обладает высокой коррозионной и радиационной стойкостью при облучении. В нашей стране накоплен большой опыт его использования в качестве конструкционного материала оболочек твэлов активных зон атомных ледоколов и транспортных реакторов, поглощающих элементов системы управления и защиты ВВЭР [1—3]. За время эксплуатации случаев разгерметизации оболочки не зафиксировано. Промышленный выпуск оболочек налажен в ПАО «МСЗ».

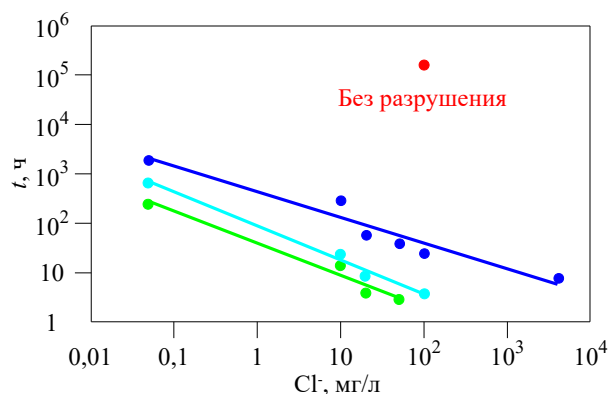
К преимуществам сплава 42ХНМ можно отнести отсутствие пароводяной реакции в аварийных условиях, радиационную стойкость, высокую коррозионную стойкость в среде теплоносителя, высокие прочностные и пластические характеристики, хорошую свариваемость, отсутствие склонности к межкристаллитному коррозионному растрескиванию при эксплуатации, а также необходимости создания нового промышленного производства.

Сплав имеет относительно невысокую в сравнении с циркониевыми температуру плавления 1350 °С, образующаяся при значительном повышении температуры оксидная пленка повышает ее незначительно. Однако наиболее

важным фактором при выборе оболочки топлива, устойчивого к аварии, является коррозионная стойкость до 1200 °С. Сплав 42ХНМ по сравнению с аустенитной сталью достиг во много раз большего времени выдержки в широком диапазоне коррозионно-активных сред окислительного и восстановительного характера [2]. За счет высокого содержания хрома он имеет способность к самопроизвольной пассивации.

В исследованиях АО «ВНИИНМ» образцы сплава 42ХНМ размером 9,1×8,24 и 9,5×8,64 мм были подвергнуты коррозионным испытаниям при 1200 °С в течение 500 с. Удельный привес образца в среднем составил 0,5 мг/см², что значительно ниже удельного привеса образцов сплава Э-110 в исходном состоянии (12 мг/см²) и образцов сплава Э-110 с хромовым покрытием, нанесенным по технологии АО «ВНИИНМ» (6,4 мг/см²) в аналогичных условиях. В результате исследований был сделан вывод о том, что сплав 42ХНМ почти не окисляется при 1200 °С в течение 500 с.

Межкристаллитное коррозионное растрескивание сплава 42ХНМ в сравнении с аустенитной сталью определяли по разработанной в АО «ВНИИНМ» ампульной методике (рис. 1) [4—6]. Установлено, что аустенитная сталь разных марок по времени до разрушения уступает сплаву 42ХНМ более чем в 100 раз. Следует отметить, что при времени выдержки 100 000 ч разрушение ампул из сплава 42ХНМ не зафиксировано. Такая сопротивляемость воздействию агрессивных сред исключает возможность взаимодействия оболочки твэла с теплоносителем



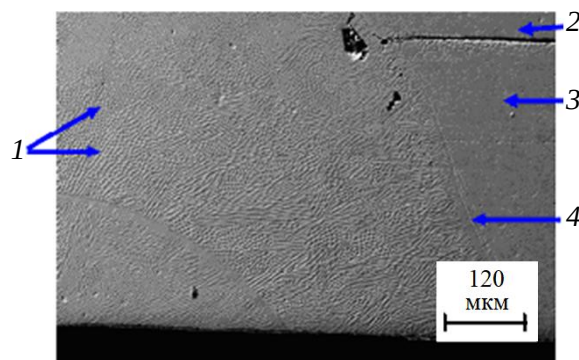
Р и с. 1. Время до разрушения аустенитной коррозионно-стойкой стали (●), стали марки 316LN (●) и 316Ti (●), сплава 42ХНМ (●) при температуре испытаний 300 °С и растягивающих напряжениях 80 МПа

при температуре, не превышающей 1200 °С, тем самым повышая безопасность работы реактора.

Использование сплава 42ХНМ в качестве материала для оболочек твэлов активной зоны ВВЭР возможно благодаря стабильности его структуры при облучении, которая объясняется склонностью к упорядочению [1]. На образование упорядоченного твердого раствора (сверхструктуры) влияют температура, легирование и способы обработки материала. На структурно-фазовые изменения в твердом растворе также будет оказывать существенное влияние интенсивность потока нейтронов. Поэтому определение оптимального состава и режима обработки сплавов, предназначенных для работы в специфических температурных и радиационных условиях, является предметом специального исследования.

Механические свойства сплава 42ХНМ в исходном состоянии находятся на уровне стали перлитного (прочностные) и аустенитного (пластические) класса. Увеличение температуры испытаний показывает уменьшение относительного удлинения при температуре более 600 °С, вызванное высокотемпературным радиационным охрупчиванием.

В АО «ВНИИНМ» отработана технология контактно-стыковой сварки методом КСС-2, при которой сварное соединение формируется в условиях всестороннего обжатия ее зоны кольцевой оправкой. При исследовании микроструктуры сварного соединения установлено отсутствие трещин и пор (рис. 2). Сварные соединения образцов-имитаторов твэла выдержали механические испытания на разрыв при комнатной



Р и с. 2. Микроструктура сварного соединения сплава 42ХНМ, полученного методом КСС-2: 1 — сварной шов; 2 — заглушка; 3 — труба; 4 — участок с оплавленными границами зерен

температуре, разрушалась оболочка. Разрушений сварных соединений не отмечено, т.е. они выдержали испытания на прочность. Поэтому способ сварки КСС-2 рекомендован для герметизации твэлов с оболочкой из сплава 42ХНМ.

Недостатком сплава является более высокое, чем у циркониевых сплавов, сечение захвата в тепловом спектре 4 б, что приводит к наработке короткоживущих радиоактивных изотопов хрома, радиоактивного кобальта и молибдена. Нежелательный захват нейтронов можно снизить путем уменьшения толщины оболочки, что допустимо с учетом высокой прочности и пластичности сплава. По результатам исследований [7] разница нейтронных потерь в оболочках из циркониевых сплавов и сплава 42ХНМ не превысит 3%. При этом, возможно, потребуется использовать топливо обогащением ²³⁵U выше 5%. Таким образом, сплав 42ХНМ за время эксплуатации показал высокую радиационную стойкость, сопротивление коррозии и механические свойства. Однако указанные характеристики были получены в условиях, исключающих аварию с потерей теплоносителя. Эксперименты, которые были инициированы необходимостью создания топлива, устойчивого к такой аварии, показали преимущества сплава 42ХНМ. Так, коррозионные испытания при 1200 °С в течение 500 с показали сопротивление коррозии даже в таких экстремальных условиях. Тем не менее снижение механических свойств в диапазоне 600—900 °С, связанное с распадом твердого раствора γ-Ni, показывает необходимость поиска путей подавления указанного фазового превращения.

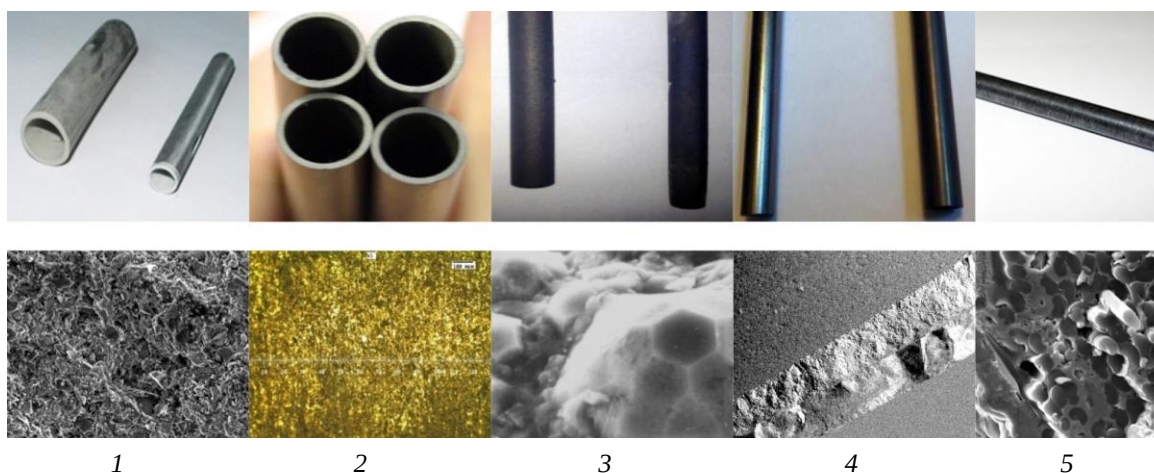
Композитные материалы для оболочек ТВЭЛОВ. Перспективным направлением в разработке топлива, устойчивого к аварии, является использование в качестве материалов оболочек ТВЭЛОВ композитных материала, в первую очередь, карбида кремния, имеющего значительно меньшее сечение захвата $0,13 \text{ б}$ по сравнению с циркониевыми сплавами. Материал не подвержен коррозии в условиях теплоносителя первого контура, не реагирует с водяным паром до 1200°C , температура диссоциации 2545°C в 2 раза превышает температуру оболочки в случае проектной аварии с потерей теплоносителя.

В АО «ВНИИНМ» исследуются методы изготовления экспериментальных образцов тонкостенных оболочечных труб из карбида кремния (рис. 3) [8, 9]. Существенным затруднением при их изготовлении является хрупкость в нормальных условиях. Хрупкость уменьшить, а также улучшить механические характеристики можно путем создания многослойного композита SiC/SiC, где в качестве армирующего элемента выступает прочное и пластичное волокно или нитевидные кристаллы. Термомеханическое моделирование показало, что окружные напряжения твэла с такой оболочкой в течение кампании ВВЭР-1000 не превысят предельных значений 450 МПа , радиальные перемещения оболочки незначительны. Расчеты подтверждают работоспособность оболочки из композита SiC/SiC.

С 2016 г. в АО «ВНИИНМ» совместно с ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС» ведутся исследования, направленные на разработку прекурсоров

и волокна из карбида кремния. Прекурсоры — полуфабрикат, представляющий собой кремнийорганические соединения исходных реагентов. В настоящее время реализована схема получения волокна первого поколения, продолжают исследования по повышению термостабильности и снижению содержания кислорода в структуре волокна путем модифицирования прекурсоров на основе поликарбосилана — полимера, сочетающего органическую составляющую и встроенные атомы кремния, и совершенствования стадии сшивки полимера облучением элементарными частицами. При операции сшивки удаляются ненужные связи C—H и формируются связи Si—C.

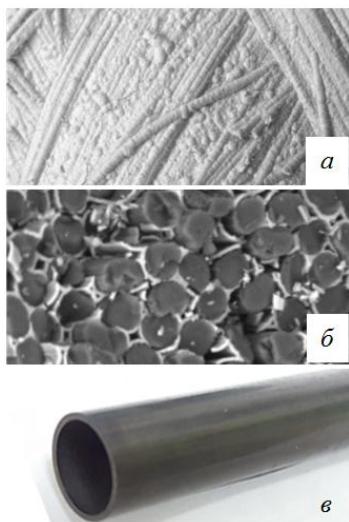
Разрабатывается технология изготовления оболочек с приваренными заглушками из карбида кремния нового поколения. Изготовлена опытная партия оболочек из композита SiC/SiC, в которых в качестве армирующих элементов применялись волокна и нитевидные кристаллы из карбида кремния (рис. 4). Испытания по определению газопроницаемости оболочек из композита SiC/SiC на основе непрерывных волокон и нитевидных кристаллов карбида кремния показали высокую степень герметичности. Дальнейшие исследования направлены на усовершенствование оболочек, в частности, повышение термостабильности, коррозионной стойкости, механической прочности, герметичности, а также на разработку новых конструкций. Рассматривается возможность применения многослойной композитной оболочки с метал-



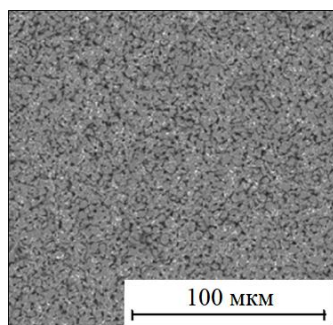
Р и с. 3. Образцы и микроструктура труб из карбида кремния, изготовленные методом шликерного литья (1), изостатического прессования (2), осаждения из газовой фазы (3), изостатического прессования с нанесенным дополнительным слоем карбида кремния (4), пропитки волокнистого каркаса кремнийорганическими прекурсорами (5)

лической герметизирующей капсулой из тугоплавких металлов. Изготавливаются заглушки методом горячего прессования из смеси порошков β -SiC различного фракционного состава со спекающими добавками Al_2O_3 , Y_2O_3 . Такая схема позволяет варьировать их закрытую пористость и свойства (рис. 5).

Перспективной является высокотемпературная вакуумная пайка, преимуществами которой являются возможность герметизации твэлов при более низкой температуре 1000—1200 °С без приложения давления на заглушку, относительно малое время выдержки, а также возможность регулировать прочность паяного соединения. Разработаны припои на основе титана и циркония, исследованы способы пайки к титановым и циркониевым пластинам, а также способы соединения изделий из карбида кремния.



Р и с. 4. Микроструктура образцов труб-оболочек на основе композитных материалов SiC/SiC: микроструктура поверхности (а) и поперечного сечения (б) композита с волокном из карбида кремния, образец трубы с нитевидными кристаллами (в)



Р и с. 5. Микроструктура образцов заглушек на основе β -SiC, Al_2O_3 , Y_2O_3

С 2020 г. проводятся работы по синтезу формовочных смесей безусадочных дисперсионно-армированных керамических материалов на основе карбида кремния и аддитивному формованию изделий сложной геометрии. Найденные решения позволят решать задачи, связанные с созданием дистанционирующих решеток, ТВС и других изделий реактора.

В АО «ВНИИНМ» изготовлена опытная партия прекурсоров и волокна. Волокно имеет прочность 2,7 ГПа, модуль упругости 240 ГПа, способно эксплуатироваться в условиях температуры свыше 1200 °С в среде теплоносителя ВВЭР при облучении.

В настоящее время в АО «ВНИИНМ» создается опытный участок по производству и исследованию трубчатых изделий на основе карбида кремния, изготовлению волокна карбида кремния, волокнистых каркасов для операций газо- и жидкофазного формирования матрицы композита, механической обработки, герметизации композиционных оболочек и изготовления заглушек. Также создается центр компьютерного моделирования.

Заключение. Таким образом, использование сплава 42ХНМ и/или керамических композиционных материалов на основе карбида кремния в качестве оболочки твэлов ВВЭР может значительно повысить технико-экономические показатели и безопасность эксплуатации АЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колотушкин В.П., Кондратьев В.П., Речицкий В.Н. Сплавы системы Ni—Cr—Mo как перспективные материалы реакторов с водным теплоносителем. — Перспективные материалы, 2004, № 1, с. 36—45.
2. Ватулин А.В., Кондратьев В.П., Речицкий В.Н. и др. Исследование коррозионной и радиационной стойкости никель-хромового сплава «Бочвалой». — Металловедение и термическая обработка металлов, 2004, № 11 (593), с. 19—24.
3. Речицкий В.Н., Лаушкин А.В., Медков В.В. О влиянии азота на свойства сплава «Бочвалой» (42ХНМ) в диапазоне рабочих и повышенных температур. — Там же, 2009, № 6 (648), с. 15—23.
4. Гринчук П.П., Голованов В.Н., Солонин М.И. и др. Радиационная и коррозионная стойкость сплава ХНМ-1. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2005, № 1 (64), с. 273—280.
5. Solonin M.I., Kondrat'ev V.P., Rechitsky V.N. et al. XNM-1 alloy as a promising structural material for water-

- cooled fusion reactor components. — J. Nucl. Mater., 1996, v. 233—237, p. 586—591.
6. Solonin M.I., Kondrat'ev V.P., Rechitsky V.N. et al. Cr—Ni alloys for fusion reactors. — Ibid., 1998, v. 258—263, p. 1762—1766.
7. Гурович Б.А., Фролов А.С., Мальцев Д.А. и др. Фазовые превращения в облученном сплаве 42ХНМ после отжига при повышенных температурах, а также после быстрого отжига, имитирующего условия максимальной проектной аварии. Тезисы докл. XI конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, 27—31 мая 2019 г., с. 30—33.

8. Макаров Ф.В., Пономаренко А.П., Захаров Р.Г. и др. Вопросы разработки технологии изготовления многофиламентного непрерывного волокна на основе β -SiC. Тезисы докл. конф. «Материалы ядерной техники (МАЯТ-2017)». Москва, АО «ВНИИНМ», 28—29 ноября 2017 г., с. 75—76.
9. Макаров Ф.В., Пономаренко А.П., Захаров Р.Г. и др. Создание труб-оболочек твэлов из композиционных материалов на основе карбида кремния. — Наноиндустрия, 2017, № 3 (73), с. 60—67.

Поступила в Редакцию 16.10.20

УДК 624.04.45.001.3

ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ ПОЛЯРНОГО КРАНА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС

*Медведев В.Н., Скоринова М.И., Киселев Александр С., Киселев Алексей С.,
Стрижов В.Ф., Ульянов А.Н. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)
e-mail: skorikova@ibrae.ac.ru*

Защитная оболочка АЭС предназначена для удержания радиоактивных веществ в целях ограничения их распространения в окружающую среду при проектных авариях, предохранения систем и элементов реакторного отделения от внешних природных и техногенных воздействий и биологической защиты от ионизирующего излучения [1, 2].

Одним из факторов, вызывающих неравномерность напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС, является мостовой кран кругового действия (полярный кран). Он установлен под куполом в здании реакторного отделения и перемещается по круговому рельсу на 360° над шахтой реактора, что позволяет совершать транспортные операции в любой точке здания. На стадии строительства кран выполняет основные грузоподъемные и транспортные операции в защитной оболочке, в частности, подъем и транспортирование на монтажные места оборудования первого контура (корпуса реактора, парогенераторов, циркуляционных насосов, трубопроводов), машины перегрузки топлива и иных грузов. На стадии эксплуатации он обслуживает механомонтажные операции в период текущих планово-предупредительных работ, перемещает свежее и отработавшее топливо, при выводе из эксплуатации энергоблока выполняет подъемно-транспортные

операции по демонтажу оборудования герметичной зоны реакторного отделения.

Для анализа напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС на воздействие неравномерно распределенных нагрузок, вызванных работой мостового крана кругового действия, и определения влияния этих нагрузок на эксплуатационные качества сооружения разработаны расчетные модели, позволяющие учитывать не только симметричные варианты нагружения крана по центральной оси оболочки, но и несимметричные при смещении нагрузки вдоль оси крана к стенке защитной оболочки.

В настоящей статье приводятся результаты расчета напряженно-деформированного состояния защитной оболочки на действие нагрузок полярного крана — собственной массы, воздействия при испытаниях и монтаже корпуса реактора.

Расчеты выполнялись с использованием программы CONT, прошедшей аттестацию в Ростехнадзоре РФ (паспорт № 347), обеспечивающей погрешность решения рассматриваемого класса задач менее 5%, т.е. в пределах разброса данных о свойствах материалов.

Расчетная модель. Модель защитной оболочки АЭС с полярным краном имеет одну плоскость симметрии — вдоль оси крана и включает половину ее цилиндрической части.