

РОЛЬ ВЫСОКОЧИСТЫХ МЕТАЛЛОВ В СОЗДАНИИ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ АЭС

Н.Н. Пилипенко

*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
г.Харьков, Украина; E-mail: azhazha@kipt.kharkov.ua*

Представлена информация о современном состоянии ядерной энергетики, ее преимуществах и перспективности для нашей страны. Показано, что дальнейшее развитие атомной энергетики в значительной степени зависит от разработок новых перспективных конструкционных материалов для реакторов нового поколения и усовершенствования материалов эксплуатируемых ядерно-энергетических установок.

Значительный рост мирового энергопотребления является неизбежным в двадцать первом веке. По оценкам многих мировых организаций и аналитиков глобальное потребление энергии в мире в последние 30 лет увеличивалось со скоростью более 3% в год. Рост населения планеты (до 2% в год) и укрепление устойчивого развития мировой экономики приведут к повышению мирового производства в 3...5 раз к 2050 г. и в 10...15 раз к 2100 г., что вместе со стремлением к более справедливому и равномерному распределению энергии по регионам мира потребуют увеличения энергопотребления соответственно в 3...5 раз [1].

Исследования ряда зарубежных ученых [2-4] позволяют проследить динамику развития и смены основных энерготехнологий: древесина, уголь, нефть, газ, ядерная энергия (рис.1). Эти зависимости

получены, опираясь на информацию о вкладе различных энерготехнологий в мировое производство энергии.

Органическое топливо будет продолжать служить главным источником энергии в ближайшие десятилетия [5]. До 2020 г. его доля в потреблении первичных ресурсов останется на уровне 90%, потому что на него рассчитана вся инфраструктура современного производства и потребления энергии. Однако освоенные месторождения углеводородного топлива исчерпываются, а введение в оборот новых запасов требует все больших инвестиционных затрат. Следствием этого должны стать постепенные изменения в инфраструктуре энергопроизводства, обусловленные как экономическими, так и экологическими факторами.

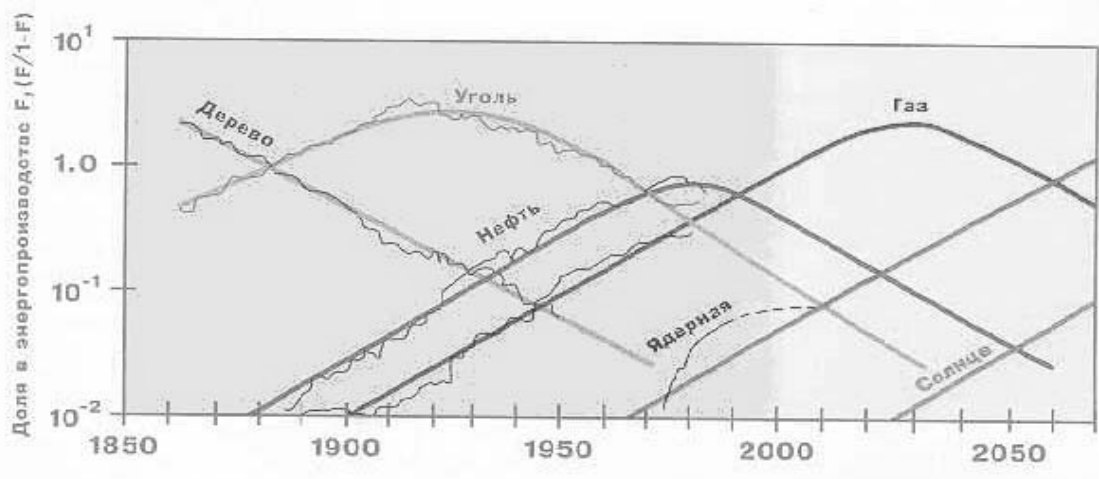


Рис.1. Динамика основных энерготехнологий

Преимущества ядерной электроэнергетики в первую очередь связаны с уникальными особенностями источника энергии – ядерного топлива. Основной его особенностью является высокая энергоемкость. При полном делении 1 кг ^{235}U высвобождается энергия, равная $8 \cdot 10^{13}$ Дж, а при сгорании 1 кг органического топлива выделяется энергия порядка $(3 \dots 5) \cdot 10^7$ Дж. Так, 1 г ядерного топлива эквивалентен 2,8 т условного органического топлива, т.е. одна тепловыделяющая сборка, содержащая 114 кг ядерного топлива, «заменяет» шесть вагонов по 60 т угля.

В последнее десятилетие большое внимание уделяется экологическим последствиям использования органического топлива. И электроэнергетика, и транспорт производят очень существенные атмосферные выбросы, которые приводят к локальной (например, смог), региональной (например, кислотные дожди) и глобальной (например, изменение климата) деградации окружающей среды и ухудшению здоровья людей. Введение глобальных ограничений на выбросы парниковых газов и региональные ограничения на другие загрязнители атмосферы серьезно повлияют на структуру развивающейся мировой энергетики и, вероятно, потребуют значи-

тельных дополнительных инвестиций для сдерживания темпов увеличения выбросов, оказывающих влияние на окружающую среду. Масштабы этой проблемы огромны. Например, для того чтобы сохранить выбросы окиси углерода от электроэнергетики на уровне середины прошлого – начала нынешнего века, потребуется увеличение на порядок источников электроэнергии, не производящих выбросов углерода.

Глобальные выбросы CO₂ от сжигания органического топлива составляют, приблизительно, 25 млрд. т в год. Из них, примерно, 45 % от сжигания угля и 40 % от нефти. Каждая электростанция мощностью 1000 МВт, работающая на каменном угле, выбрасывает в атмосферу, приблизительно, 7 млн. т CO₂ в год. Если используется бурый уголь, то количество выбросов намного большее. Выбросы CO₂ также происходят при сгорании и других видов органического топлива (нефти или газа) [6, 7]. Сравнение величин выбросов парниковых газов, приходящихся на единицу произведенной электроэнергии для полного топливного цикла при использовании различных энергоисточников по данным МАГАТЭ, приведены в табл. 1 [8].

Таблица 1

Выбросы CO₂ для полного топливного цикла различных энергоисточников (при нормальной эксплуатации объектов) [8]

Энергоисточник	Выбросы, гC _{eq} /кВт·ч
Уголь	265...357
Нефть	219...264
Природный газ	120...188
Солнечные фотоэлементы	27...76
Гидроэнергетика	6...65
Биомассы	3...13
Энергия ветра	3...13
Ядерная энергетика	2...6

Для ядерных источников характерна компактная форма отходов и отсутствие выбросов продуктов сгорания. Суммарная масса ядерных отходов отличается от массы отходов при сжигании органики пропорционально калорийности топлива, т.е. в миллионы раз [9]. И это несомненное преимущество ядерной энергии.

Экологические сопоставления энергетики, работающей на органическом топливе, и атомной энергетики говорит, несомненно, в пользу атомных электростанций как экологически наиболее приемлемых в ближайшие десятилетия и сотни лет.

Помимо экологического основным фактором, обуславливающим преимущества ядерной энергетики, является низкая цена вырабатываемой продукции. Действительно, в настоящее время на энергорынке многих государств ядерная энергия – самая дешевая. К примеру, в Германии она стоит \$0,015 за киловатт-час, тогда как продукция работающих на газе станций продается по \$0,031...0,038 за киловатт-час, а на угле – \$0,038...0,044 за киловатт-час. В США, где не применяются штрафы за углеводородные выбросы, стоимость ядерной энергии составляет \$0,017 за ки-

ловатт-час, а произведенной на газе и угле – соответственно \$0,057 и \$0,02 за киловатт-час [10].

Стоимость производства электроэнергии на АЭС остается довольно стабильной в течение долгого периода времени [11], кроме того, нужно также отметить, что затраты ядерного топливного цикла остаются довольно низкими, несмотря на резкое увеличение цены на уран: почти на 200% за период с 2001 по 2004 гг. Подобное резкое увеличение цены на природный газ, которое может произойти в любое время, если принять во внимание недавнее изменение цены на углеводород, увеличит стоимость электроэнергии, произведенной газовыми электростанциями, на 70...90%.

Таким образом, истощение традиционных запасов органического топлива, остро стоящие экологические проблемы, отсутствие альтернативных источников необходимой энергоёмкости способствуют повышению роли ядерной энергетики в энергообеспечении мировой экономики. Сегодня вклад атомной энергетики в мировое энергообеспечение составляет около 6 %, а в выработку электроэнергии – более 16% (2618,6 ТВт·ч) [12]. В 31-й стране мира функционирует 440 реакторов и ведется строительство еще 26 [12,13]. Эксплуатируются также исследовательские, транспортные и другие промышленные реакторы. Доля ядерной энергетики в балансе многих стран остается высокой. Так, по статистике почти 20 государств более чем на 1/4 зависят от генерирования электроэнергии атомными станциями, а в ряде стран ядерная энергетика занимает доминирующее положение, вырабатывая свыше половины необходимой электроэнергии. Передовые позиции среди них занимают Франция (ядерная электроэнергия в энергобалансе страны составляет 78,1%), Литва (72,1%), Бельгия (55,1%), Швеция (51,8), Украина (51,1%). Первая десятка стран в мире по общему производству энергии на АЭС приведена на рис.2.

В Украине ядерная энергетика стала одной из главных энергопроизводящих источников и является важным фактором обеспечения энергетической независимости государства. Доля АЭС в общем объеме производства электроэнергии в 2004 г. составила 48,0% (в 2003 г. – 45,3%), ТЭС – 40,4% (44,6%), ГЭС – 6,5% (5,2%), коммунальных ТЭЦ и блок-станций – 5,1% (4,9%) [14]. На фоне критического положения в традиционной энергетике из-за дефицита органического топлива (газ и нефть в основном импортируется из России), физического и морального старения оборудования тепловых электростанций ядерная энергетика работает достаточно стабильно и при соблюдении всех мер безопасности является самым экологически чистым источником энергии.

За счёт оптимизации и совершенствования топлива, внедрения современных методов диагностики состояния оборудования и оптимизации проведения ремонтных компаний в последние годы удалось существенно повысить коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) АЭС и достигнуть рекордных показателей (81,4%) [15]. Повышение по сравнению с 2003 г. на 2,9% КИУМ позволи-

ло компенсировать мощность выведенной в конце 2000 г. из эксплуатации Чернобыльской АЭС.



Рис.2. Первая десятка стран по производству энергии на АЭС [12]

После ввода в 2004 г. 2-го блока на Хмельницкой АЭС и 4-го – на Ровенской АЭС в Украине действуют 15 атомных энергоблоков, в том числе 13 реакторов ВВЭР-1000 и 2 – ВВЭР-440.

Украина, унаследовавшая от СССР значительную часть атомно-энергетического комплекса, кроме генерирующих атомных мощностей располагает также значительным сырьевым и машиностроительным потенциалом. Наша страна занимает 9-е место в мире и 1-е в Европе (исключая Россию) по добыче урана – более 800 т ежегодно [16], владеет уникальными запасами урана и циркона [17], перерабатывающими производствами, машиностроительными предприятиями, развитой опытно-промышленной и технологической базой, а также значительным научно-техническим потенциалом.

Анализ перспектив развития мировой ядерной энергетики показывает, что в ближайшем будущем ее основу будут составлять реакторы на тепловых нейтронах, охлаждаемые водой под давлением (PWR и ВВЭР), доля которых в настоящее время составляет более 50% [18]. В течение следующих приблизительно 15...20 лет вряд ли возможны существенные изменения либо в объеме производимой ядерными станциями электроэнергии, либо в характере технологий ее производства. В течение этого периода будут разрабатываться и вводиться в эксплуатацию проекты усовершенствованных тепловых реакторов, которые должны стать основой последующего периода наращивания ядерных мощностей. Наиболее рациональным для Украины в этот период будет повышение эффективности использования работающих АЭС (повышение безопасности эксплуатации, рост КИУМ, повышение выгорания топлива, снижение эксплуатационной составляющей стоимости электроэнергии) и продление проектных сроков службы основного оборудования энергоблоков.

Дальнейшее повышение безопасности, обеспечение экономичности ядерной энергетики требуют по-

вышения энергонапряженности, мощности единичных блоков ядерно-энергетических установок, увеличения длительности кампаний, более эффективно сжигания топлива, в том числе за счет повышения качества конструкционных материалов. Это, в свою очередь, приводит к возрастанию требований к свойствам материалов, их геометрии, величине и количеству допускаемых дефектов элементов конструкций [19, 20].

Основным конструкционным материалом активных зон реакторов на тепловых нейтронах с водным теплоносителем являются циркониевые сплавы, обладающие низким сечением захвата тепловых нейтронов, хорошей радиационной и коррозионной стойкостью. Нержавеющие стали и сплавы на основе никеля и хрома используются в качестве оболочек поглощающих элементов, пружинных элементов ТВЭЛов и ТВС и в ряде случаев для дистанционирующих решеток ТВС.

Одной из составляющих повышения эффективности использования топлива является замена стальных конструктивных элементов ТВС (направляющие трубы и дистанционирующие решетки) на циркониевый сплав с содержанием гафния не более 0,01 мас.%. Такая замена обеспечит многократное уменьшение частоты (вероятности) случаев с временем сброса кластера, превышающем 4 с, и уменьшение величины искривления ТВС в активной зоне, т.е. повысит размерную стабильность ТВС [21]. Ограничение по содержанию гафния (менее 0,01 мас.%) объясняется необходимостью обеспечения минимального содержания в активной зоне реактора материалов с повышенным коэффициентом захвата нейтронов.

Даже очень малые добавки примесей эффективно влияют на физико-механические и физико-химические свойства циркония, что может повлечь за собой изменение механических и коррозионных свойств циркониевых сплавов, а также изменение оптимальных режимов деформационной и термиче-

ской обработки. Кроме того, возможно также влияние совокупного содержания нового состава примесей на свойства циркониевых сплавов.

Энергетической стратегией Украины на период до 2030 года предусматривается создание элементов ядерно-энергетического комплекса, в частности организация в течение 5...10 лет промышленного производства циркониевых сплавов для изготовления оболочек тепловыделяющих элементов и сборок, а также других элементов активной зоны ядерных реакторов ВВЭР-1000 [22]. В настоящее время проводится комплекс материаловедческих и технологических исследований, направленных на обеспечение создания производства циркониевых сплавов и изделий на их основе для ядерного топлива реакторов ВВЭР из отечественного сырья. Организация циркониевого производства предусматривает получение: цирконового концентрата, тетрафторида циркония (ТФЦ), циркония ядерной чистоты и сплавов на его основе, циркониевого проката, комплектующих изделий и тепловыделяющих сборок, удовлетворяющих современным мировым требованиям надёжности и повышенным срокам эксплуатации до 5...6 лет. Решение проблемы циркониевого производства будет способствовать укреплению национальной безопасности Украины и повышению экономической эффективности.

Создаваемая в Украине технология изготовления реакторного сплава Zr +1 мас.% Nb на основе циркония должна обеспечить достижение характеристик, сравнимых с характеристиками штатного российского сплава Э110, а изготовленные комплектующие изделия обеспечить работоспособность ядерного топлива при 4- и 5-летних циклах работы [23]. Предусматривается, что использование новых технологий изготовления сплава обеспечит более высокие характеристики работоспособности и надёжности изделий из него в сравнении с аналогом [24].

С целью усовершенствования технологического процесса получения циркония реакторной чистоты и его сплава с 1% ниобия проведены систематические исследования по очистке циркония от примесей и, в частности, от кислорода. Установлено, что одной из основных операций, что приводит к повышенному содержанию кислорода в цирконии, является процесс сублимации ТФЦ. Исследован процесс дегазации ТФЦ при нагреве в вакууме при температурах в интервале 20...600 °С. Для повышения качества ТФЦ после сублимации нужно усовершенствовать вакуумную систему и конструкцию реторты сублиматора. Одним из источников поступления кислорода в металлический цирконий в процессе восстановления является стружка кальция. В ННЦ ХФТИ разработана конструкция установки для грануляции кальция, внедрение которой в производство позволит получать металл с заданным стабильным содержанием кислорода. Рассмотрен также вопрос улучшения вакуумных условий при электронно-лучевой плавке (ЭЛП) циркония и его сплавов. В случае рафинирования химически активных металлов, даже при очень низком давлении, концентрация газовых примесей и углерода в них может не только уменьшаться, но и расти из-за их поглощения из остаточ-

ной атмосферы вакуумной печи. Улучшения вакуумных условий при плавке можно достичь заменой действующих бустерных насосов на другие типы вакуумных насосов – электроразрядных, гетероионных, титановых сублимационных, сорбционных, криогенных и др. Исследованиями установлено, что для получения качественных слитков циркония и гафния, которые применяются в атомной энергетике с повышенными требованиями по содержанию примесей внедрения, необходимо улучшать вакуумные условия при ЭЛП [24-26].

Благоприятные условия рафинирования в сочетании с оптимальной технологией позволяют достигать при ЭЛП значительного повышения металлургической чистоты циркония. Обобщенные результаты систематических исследований процесса рафинирования йодидного и кальциетермического циркония (КТЦ) методом ЭЛП в установке с комбинированной откачкой характеризуются следующими данными: микротвердость йодидного циркония снижается с 1200 до 800 МПа, происходит существенное уменьшение концентрации металлических и газовых примесей в кальциетермическом цирконии, а также снижается твердость (рис. 3). Причем показатели чистоты двукратного рафинирования циркония методом ЭЛП несколько лучше (см. рис.3).

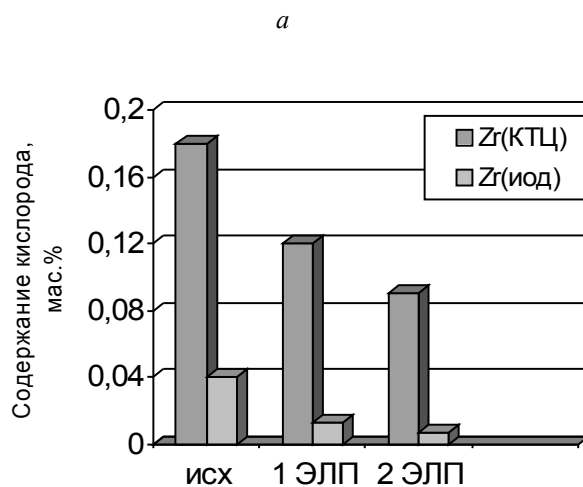
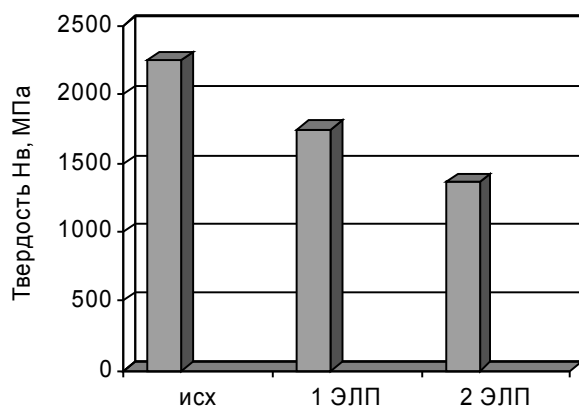


Рис. 3. Изменение твердости по Бринеллю КТЦ (а) и изменение содержания кислорода в КТЦ и йодидном металле (б) в зависимости от числа переплавов

На основе проведенных исследований выработаны рекомендации по улучшению производства циркония и сплава на его основе (ZrNb) для изготовления твэльных труб, лент и других изделий для реакторов ВВЭР-1000. А также позволит выбрать оптимальную технологическую схему промышленного производства слитков сплава ZrNb.

Одной из составных частей производства ядерного топлива и повышения безопасности эксплуатации АЭС является изготовление поглощающих материалов, элементов органов регулирования и защиты ядерных реакторов.

Исследованиями было установлено, что заметное увеличение срока службы кластерныхборок систем управления и защиты АЭС (СУЗ) может быть достигнуто в случае использования в поглощающих элементах СУЗ реакторов с водой под давлением комбинированного (n,α)-(n,γ)-поглотителя. Гафний относится к числу (n,γ)-поглотителей, и масштабы его производства на настоящий момент уже удовлетворяют потребности атомной энергетики. По своим свойствам гафний имеет несомненные преимущества, и в перспективе он может одновременно выполнять функции и поглотителя нейтронов, и конструкционного материала [27]. На физико-механические свойства гафния существенное влияние оказывает наличие примесей, поэтому для повышения качества гафния был проведен комплекс научно-исследовательских работ по усовершенствованию металлургических процессов получения гафния ядерной чистоты, его деформационной обработке и исследованию физико-механических свойств [27-30].

Усовершенствование технологии получения гафния ядерной чистоты в промышленном масштабе в Украине открывает возможность его широкого применения в атомной энергетике. А положительный опыт эксплуатации поглощающих элементов на основе комбинированного V_4C-Nf -поглотителя позволит приступить к целенаправленному расширению производства гафния, а также отработке процессов получения изделий из него с заданным комплексом свойств для нужд украинских АЭС и экспорта в другие страны. По оценкам специалистов для активной зоны реакторов необходимо около 10 т гафния ядерной чистоты в год для всех реакторов стран СНГ (для Украины ~5 т/год).

Предвидя широкомасштабное развитие ядерной энергетики и ее внедрение в различные сферы энергопроизводства, необходимо работать над ядерными реакторами нового поколения, которые лучшим образом соответствуют этим задачам. Не вызывает сомнения, что на ближайшие полтора десятка лет проекты строящихся реакторов будут в максимальной степени использовать технические решения, виды оборудования, которые уже получили подтверждение при эксплуатации, либо являются их усовершенствованным продолжением.

Международное сообщество по генерации новых энергетических технологий обозначило перечень надежных реакторных систем и концепций (Международный форум – поколение IV (GIF), проект МАГАТЭ по инновационным ядерным реакторам и топливным циклам (INPRO) и ряд других проектов) [31-33]. В этот перечень вошли: реакторы, охлаждаемые свинцовыми сплавами; жидкосолевые реакторы; реакторы, охлаждаемые жидким натрием; сверхкритические водоохлаждаемые реакторы (давление 25 МПа, температура 280...580 °С); высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы; системы с подкритической сборкой, управляемой ускорителем частиц. Этим концепциям свойственны преимущества в экономике, безопасности, надежности и нераспространении ядерных материалов. Температура активных зон этих энергетических систем 600...1200 °С, а энергетический спектр нейтронов быстрый и в ряде случаев тепловой. Реализация этих концепций должна быть обеспечена разработкой новых конструкционных материалов: сталей ферритно-мартенситного и аустенитного классов, малоактивируемых, никелевых и других новых сплавов.

Анализ рабочих условий и основных характеристик перспективных ядерно-энергетических установок показывает, что стремление к максимальному повышению эффективности энергетических установок предполагает переход ко все более высоким рабочим температурам, а это, в свою очередь, приводит к разработке новых конструкционных материалов. Материалы перспективных ЯЭУ должны удовлетворять уникальным требованиям, продиктованным конструкцией высокотемпературных систем, что предусматривает учет воздействия излучения, теплоносителя, а также статических и динамических напряжений.

При разработке ядерных энергетических установок нового поколения ставится задача не только максимально повысить безопасность реакторов и улучшить экономические показатели, но также повысить их экологическую безопасность вследствие использования конструкционных материалов элементов активных зон с относительно быстрым спадом наведенной активности (достижения доступного уровня γ -излучения в течение 50...100 лет после остановки реактора). Поэтому конструкционные материалы должны быть не только жаропрочными, термоциклически прочными, радиационно-стойкими, но и удовлетворять требованию малой активируемости или быстрого спада наведенной активности. Широкомасштабное развитие ядерной энергетики и требование использования замкнутого ядерного топливного цикла обязательно потребуют использование малоактивируемых конструкционных материалов как необходимого экологического условия ее развития.

Применение малоактивируемой стали для изготовления корпуса реакторов и внутрикорпусного оборудования позволяет в 5 раз снизить дозовые нагрузки на обслуживающий персонал и в 20 раз уменьшить характерное время спада наведенной активности по сравнению с применяемыми материалами [34].

Высокий уровень содержания примесных элементов и газов в сталях и сплавах существенно снижает их механические, коррозионные и радиационные свойства, а следовательно, и ограничивает их применение в действующих и проектируемых реакторах. Например, облучение стали 16X12B2ФТaP вызывает образование в ее составе газовых трансмутантов (H и He) и легкоплавких металлов (Li, Mg, Zn, Cd, Ca, и, возможно, других), концентрация которых возрастает с ростом времени облучения, зависит от содержания легирующих элементов и может составить (через 10 лет облучения) в сумме ~0,1 мас.% [35].

Применение высокочистых металлов в качестве исходных компонентов новых конструкционных материалов для перспективных ядерных энергетических установок и разработка или оптимизация технологий их выплавки должны обеспечить необходимый уровень служебных свойств изделий из них [36].

Безопасность, надежность и экономичность перспективного жидкосолевого реактора (ЖСР) во многом будет определяться поведением конструкционных материалов, в частности, материалом топливного контура, работающего в наиболее жестких условиях. Из анализа основных свойств конструкционных материалов в качестве материала для топливного контура был выбран высоконикелевый сплав типа хастеллой. Используя высокочистые металлы в качестве компонентов, были изготовлены высоконикелевые сплавы типа хастеллой состава: Ni - основа, Mo - 11,7; Cr - 6,7; Ti - 0,47; Al - 0,83; Fe - 1,5; Mn - 0,5; Si - 0,15 мас.%. Полученные образцы сплава испытывались в условиях, близких к условиям работы топливного контура ЖСР: образцы находились в солевом расплаве состава 50 ZrF₄+50 NaF (мол.%) при температуре 650 °С и подвергались длительному (до 700 ч) облучению на линейном ускорителе электронов ЛУЭ-10 с энергией 10 МэВ [37].

В результате коррозионных испытаний сплава в расплаве фторидов циркония и натрия при 650 °С не обнаружено образования каких-либо плёнок в процессе коррозии в течение 700 ч. Процесс коррозии сплава в расплавах фторидов циркония и натрия характеризуется слабым взаимодействием компонентов смеси со сплавом, проникновением атомов Zr и Na в сплав на глубину до 3...5 мкм за время 700 ч, отсутствием оксидных плёнок на поверхности, а также уменьшением концентрации хрома в приповерхностном слое сплава на глубину до 10 мкм. Скорость коррозии для облученных в расплаве солей образцов сплава типа хастеллой повышается с увеличением энерговыделения. Проведенные коррозионные испытания не привели к значительному изменению механических свойств сплава. Механические свойства образцов после коррозионных испытаний практически не изменяются при увеличении времени выдержки в расплаве солей (табл.2) [37-39].

Результаты проведенных испытаний показали, что полученный на основе высокочистых металлических компонентов сплав типа хастеллой может быть рекомендован в качестве конструкционного

материала топливного контура жидкосолевых реакторов.

Таблица 2
Результаты механических испытаний образцов сплава типа хастеллой после коррозии при 650 °С в расплаве солей

Образцы после коррозионных испытаний в течение, ч	T _{испыт.} , °С	σ _B , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %
Исходный	25	930	430	60
100		1100	840	41
200		1080	810	45
500		1080	890	43
700		1070	875	43
Исходный	450	710	314	62
100		800	400	50
200		800	450	50
500		820	450	50
700		800	460	50
Исходный	650	397	288	14
100		502	420	8,0
200		510	435	8,7
500		490	420	10,0
700		510	440	9,0

На сегодняшний день ядерная энергетика – лучшее, что имеет человечество для производства и поставки дешевой электрической и тепловой энергии на необходимую перспективу с обеспечением ядерной, физической, экологической и технической безопасности. Поведение конструкционных материалов при эксплуатации ядерных реакторов в значительной степени определяет безопасную и экономичную работу атомных станций. Поэтому дальнейшее развитие атомной энергетики в значительной степени зависит от разработок новых перспективных конструкционных материалов для реакторов нового поколения и усовершенствования материалов эксплуатируемых ядерно-энергетических установок за счет применения высокочистых металлов в качестве исходных компонентов и использования новых технологий их изготовления, что обеспечит повышение ресурса работы, надежность и безопасность элементов конструкций атомных реакторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. И.М.Неклюдов. Состояние и проблемы атомной энергетики в Украине // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2007, №2, с. 3-9.
2. S.Marchetti, N.Nakicenovic. *The dynamics of energy systems and the logistic substitution model*. Laxenburg: IASA, 1979, 36 p.
3. A.Grubler, N.Nakicenovic, D.G.Victor. Dynamics of energy technologies and global change // *Energy Policy*. 1999, № 27, p.247-280.

4. W.Hafele. *Energy in a finite world: A global system analysis*. Cambridge: Ballinger Publishing Company, 1981.
5. В.Бар'яхтар, В.Кухар, Р.Пальшин. Энергетика України у контексті загальносвітових тенденцій // *Вісник НАН України*. 2000, № 7, с.14-26.
6. А.В.Степанов, В.П.Кухар. *Достижения энергетике и защита окружающей среды*. Киев: «Наукова думка», 2004, 206 с.
7. К.К.Демирчан, К.С.Демирчан, К.А.Кондратьев. Темп роста концентрации CO₂ и уточнение его прогнозных оценок // *Изв. РАН*. 2001, №1, с.3-25.
8. Л.Л.Литвинский, И.Н.Вишневский, А.Ю.Зенюк, О.А.Пуртов. Перспективное планирование в ядерной энергетике // *Энергетическая политика Украины*. 2005, №1, с.80-82.
9. Н.Н.Пономарев-Степной. Сценарии развития атомной энергетике России в XXI веке // *Бюллетень по атомной энергетике*. 2001, № 12, с. 4-13.
10. И.Дуброва. Развитие АЭС: мнения разделились // *Энергетическая политика Украины*. 2005, №9, с.24-27.
11. Я.Гор-Лесси. *Ядерное электричество* / Пер. с англ. Ростов-на-Дону: ОАО "Ростиздат", 2002, 112 с.
12. *Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2030*. Vienna: IAEA, 2005, 53 p.
13. А.Н.Исаев. Современное состояние и тенденции развития ядерной энергетике мира // *Атомная техника за рубежом*. 2006, №2, с.10-14.
14. 2004-й: в Украине увеличилось производство электроэнергии // *Энергоатом Украины*. 2005, №1(13), с. 23.
15. Итоги работы государственного предприятия НАЭК «Энергоатом» за 2004 год // *Энергоатом Украины*. 2005, №1(13), с.21-22.
16. Добыча урана растет // *Атомная энергетика*. 2001, №6(50), с.14.
17. Н.А.Архипова. Цирконий: состояние и перспективы развития мирового рынка // *Минеральные ресурсы России. Экономика и управление*. 2002, № 5, с.66-70.
18. М.И.Солонин, И.И.Коновалов. Текущие и перспективные задачи топливообеспечения ядерной энергетике // *Атомная энергетика*. 2003, т.95, в.2, с.113-121.
19. И.М.Неклюдов. Проблемы работоспособности материалов основного оборудования АЭС Украины // *Прогресивні матеріали і технології*. Київ: «Академпериодика», 2003, т. 1, с.277-295.
20. М.И.Солонин, Ф.Г.Решетников, А.Г.Иолтуховский, А.В.Никулина. Новые конструкционные материалы активных зон ядерных энергетических установок // *Физика и химия обработки материалов*. 2001, №4, с.17-27.
21. А.А.Афанасьев. Повышение экономичности топливных циклов ВВЭР-1000 путем увеличения выгорания топлива // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2000, №4, с.45-56.
22. *Стратегия развития ядерной энергетике в Украине на период до 2030 года и на дальнейшую перспективу (проект)*. Киев, 2005, 34 с.
23. В.М.Ажажа, П.Н.Вьюгов, С.Д.Лавриненко, К.А.Линдт, А.П.Мухачев, Н.Н.Пилипенко. *Цирконий и его сплавы: технологии производства, области применения*: Обзор. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998, 89 с.
24. В.С.Красноручький, С.Д.Лавриненко, В.М.Ажажа, В.М.Грицина, П.М.В'югов, Т.П.Черняева, М.М.Пилипенко, І.А.Петельгузов, Ю.П.Бобров, В.Р.Татаринов, І.М.Бутенко, О.І.Жуков, О.О.Слабоспицька, Е.О.Михайлов. Розробки і обґрунтування по підвищеному ресурсу роботи, надійності і безпеки елементів активної зони атомних реакторів – твєлів та ТВС // *Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин*. Київ: ІЕЗ ім. Є.О.Патона, 2006, с.228-231.
25. В.М.Ажажа, П.Н.Вьюгов, С.Д.Лавриненко, В.И.Лапшин, Н.Н.Пилипенко. Электронно-лучевая плавка циркония // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2000, №5, с.3-11.]
26. В.М.Ажажа, П.Н.Вьюгов, С.Д.Лавриненко, Н.Н.Пилипенко. Вакуумные условия и ЭЛП циркония // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2006, №4, с.144-151.
27. А.В.Ефимов, В.М.Ажажа, Н.Н.Пилипенко, А.П.Мухачев. Гафний – перспективный материал для ядерной энергетике // *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. 2004, №23, с.37-44.
28. И.М.Неклюдов, В.М.Ажажа, П.Н.Вьюгов и др. Новая технология производства гафния ядерной чистоты // *Научные ведомости. Серия: «Физика»*. 2001, №4 (14), с. 127-132.
29. В.М.Ажажа, П.Н.Вьюгов, С.Д.Лавриненко, Н.Н.Пилипенко и др. Исследование процесса рафинирования кальциетермического гафния при введении добавок // *ВАНТ. Труды конференции «Проблемы циркония и гафния в атомной энергетике», 14-19 июня 1999. Алушта. Крым*. Харьков: ННЦ ХФТИ, 1999, с.38-40.
30. Н.Н.Пилипенко, И.Б.Доля, П.Н.Вьюгов, С.Д.Лавриненко, Р.В.Ажажа. Механические свойства гафния // *Неорганические материалы*. 2006, т.42, №6, с.684-688.
31. *A technology roadmap for generation IV nuclear energy systems, issued by U.S. DOE nuclear energy research advisory committee and the Generation IV international forum (GIF - 002-00)*. Washington, 2002, 91 p.
32. G.H.Marcus, A.E.Levin. New designs for nuclear renaissance // *Physics Today*. 2002, v.55, № 4, p.54-60.
33. D.Majumdar. Advanced reactors around the world // *Nuclear Plant Journal*. 2003, v.21, № 5, p.21-24.

34. И.В.Горынин. Надежные материалы – основа безопасности атомной энергетики // *Мировая энергетика*. 2006, №7(31), с.90-91.
35. А.Г.Иолтуховский, М.В.Леонтьева-Смирнова, В.М.Чернов и др. Разработка жаропрочной 12% хромистой стали 16X12В2ФТаР нового поколения с быстрым спадом наведенной активности для нужд атомной энергетики России // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2003, № 6, с. 60-64.
36. В.М. Ажажа, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко. Чистые и особоочистые металлы в атомной энергетике // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники»*. 2007, № 4, с. 3-12.
37. V.M.Azhazha, A.S.Bakai, I.V.Gurin et al. Study of materials for reactors employing molten fluoride salt or Pb-Bi coolant using an electron irradiation test facility // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2005, №4, с.3-19.
38. В.М. Ажажа, А.С. Бакай, Ю.П. Бобров, А.Н. Довбня, С.Д. Лавриненко, Н.Н. Пилипенко, И.А. Петельгузов, В.И. Савченко. Исследование сплава типа Хастеллой для жидкосолевых реакторов // *Proceeding of Ninth International Conference on Material issues in design, manufacturing and operation of nuclear power plants equipment. Pushkin - Saint Petersburg, 6-8 June 2006*. Saint Petersburg: CRISM "Prometey". 2006, v.2, p.280-289.
39. В.Ажажа, А.Бакай, Ю.Бобров и др. Исследование коррозионной стойкости и механических свойств жаростойкого и жаропрочного никелевого сплава // *Механика разрушения материалов и прочность конструкций*. Львов: Физико-механический институт им. Г.В. Карпенко НАН Украины, 2004, с.659-664.

РОЛЬ ВИСОКОЧИСТИХ МЕТАЛІВ У СТВОРЕННІ НОВИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЙ АЕС

М.М. Пилипенко

Представлена інформація про сучасний стан ядерної енергетики, її переваги і перспективність для нашої країни. Показано, що подальший розвиток атомної енергетики в значній мірі залежить від розробок нових перспективних конструкційних матеріалів для реакторів нового покоління і удосконалення матеріалів експлуатованих ядерно-енергетичних установок.

ROLE OF HIGH-PURE METALS IN CREATION OF NEW MATERIALS FOR THE ELEMENTS OF CONSTRUCTIONS OF NPP

M.M. Pylypenko

Information about the modern state of nuclear power, its advantages and perspective for our country is represented. It is shown, that further development of nuclear power largely relies on developments of new perspective construction materials for the reactors of a new generation and improvement of materials of the exploited nuclear-power plants.