

УДК 621.039.516.4

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ – ЭТАП РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ

д-р техн. наук, доц. И.Л. ПОБОЛЬ
(Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск)

Рассмотрены этапы обращения с отработавшим ядерным топливом в мире, выполнен анализ возможностей применения для этого отечественных высоких технологий, в том числе накопленного опыта использования электронно-лучевой сварки для получения высоконадежных соединений. Показаны преимущества электронно-лучевой сварки по сравнению с наиболее широко применяемой дуговой сваркой; экономическая целесообразность и предпочтительность хранения отработавшего ядерного топлива в стеллажах с шестигранными трубами из бористой стали, изготовленными методом электронно-лучевой сварки, в бассейне выдержки белорусской АЭС и последующего длительного сухого хранения в пристанционном хранилище по сравнению с вывозом отработавшего топлива.

Введение. В настоящее время все острее становится проблема обращения с радиоактивными отходами (РАО) высокой степени активности. общепризнанным этическим принципом обращения с ядерными отходами является постулат о том, что страна, получающая преимущества от использования ядерных технологий, должна нести полную ответственность и бремя по завершению ядерного топливного цикла [1–3].

До сих пор не существует общепризнанной концепции обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ). Существующие технологии обеспечивают только два способа обращения с ОЯТ:

- «прямое» захоронение после промежуточного хранения в течение нескольких десятилетий;
- переработка (регенерация) ОЯТ с выделением урана и плутония для использования в составе свежего топлива.

Ни одна страна в мире не имеет достаточных мощностей для переработки накопленного в ней объема ОЯТ. Некоторые страны выбирают в качестве способа обращения с ОЯТ хранение или прямое захоронение без переработки. Переработка ОЯТ при современном уровне развития технологий признана экономически и экологически нецелесообразной, потому что в результате переработки 1 тонны ОЯТ (в пересчете на уран) образуется 7500 тонн твердых и 2200 тонн жидких радиоактивных отходов, которые тоже нужно переработать и безопасно захоронить. Экономически это нецелесообразно, а создание такого комплекса в сравнительно небольшой по территории стране крайне опасно.

Геологические хранилища являются одним из наиболее безопасных вариантов изоляции высокоактивных отходов от окружающей среды и человека в долгосрочной перспективе. В настоящее время геологических хранилищ нет, но работы в этом направлении ведутся.

В Беларуси начато строительство атомной станции с реактором ВВЭР-1200. В настоящее время для реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 ядерный топливный цикл не является замкнутым. Проектными решениями всех АЭС с ВВЭР-1000 ранее предусматривался вывоз ОЯТ после 3–5 лет охлаждения в бассейнах выдержки в транспортных контейнерах типа ТУК-10 или ТУК-13 в стационарное хранилище ФГУП «Горно-химический комбинат» (в России) для хранения в течение 40–50 лет с возможностью последующей переработки [2]. Однако из-за ограниченных возможностей хранилища ГХК, а также отсутствия экономической целесообразности на ближайшую перспективу строительства завода по переработке ОЯТ возникают проблемы с поддержанием жизнеспособности АЭС при неукоснительном обеспечении безопасной эксплуатации. Крайне высока стоимость вывоза ОЯТ и его хранения в России. Поэтому в Украине и других государствах, имеющих российские реакторы типа ВВЭР и РБМК, отработавшее топливо после мокрого хранения в бассейне выдержки транспортируется в хранилище ОЯТ данной АЭС либо продолжает оставаться в бассейнах выдержки.

Отработавшее ядерное топливо обладает потенциально высокой стоимостью и в недалеком будущем может стать источником ценных материалов (одна из причин того, почему страна-поставщик свежего топлива охотно берет ОЯТ на хранение). Сегодня ОЯТ в большинстве стран рассматривается как полезный ресурс, а не как отходы. В частности, в [4] обоснована возможность использования в Беларуси ОЯТ в качестве источника изотопа ^{137}Cs с целью реализации радиационных технологий (для медицинских и других целей) взамен приобретения за рубежом дорогостоящих источников. Поэтому актуальной задачей для Республики Беларусь является разработка самостоятельной концепции обращения с ОЯТ и высокоактивными РАО.

В данной работе рассмотрены этапы обращения с ОЯТ в мире, прежде всего существующая перерабатывающая практика для топлива реакторов типа ВВЭР и РБМК. Выполнен анализ с точки зрения декларируемого намерения о 30 %-ной локализации при создании АЭС в Беларуси, возможностей применения

для этого отечественных высоких технологий, в том числе накопленного опыта использования электронно-лучевой сварки (ЭЛС) для получения высоконадежных соединений. Рассмотрены преимущества ЭЛС по сравнению с наиболее широко применяемой в мире дуговой сваркой.

Методы обращения с отработавшим ядерным топливом реакторов ВВЭР. Топливо для реакторов ВВЭР и РБМК изготавливается в виде тепловыделяющих сборок (ТВС), предназначенных для генерирования тепловой энергии и передачи ее потоку теплоносителя в активной зоне реактора. Активная зона реактора ВВЭР-1000 состоит из 163 ТВС.

На АЭС с ВВЭР-1000 используют тепловыделяющие сборки типа ТВСА и ТВС-2. Конструкция ТВС, выполненная из циркониевых сплавов, сохраняет геометрическую стабильность при высоких степенях выгорания топлива и обеспечивает ядерную безопасность и высокие экономические показатели активных зон реакторов ВВЭР-1000 с глубоким выгоранием и топливным циклом (количество циклов и длительность цикла в годах) типа 4×1 , 5×1 , $3 \times 1,5$ года. В зависимости от топливного цикла количество ежегодно заменяемых ТВС составляет 36 или 42.

Облученные ТВС из активной зоны реактора перегружают в бассейны выдержки. В бассейнах выдержки ВВЭР-1000 облученные ТВС находятся в заполненных водой бассейнах и хранятся в стеллажах из нержавеющей стали с шагом 400 мм. Разработаны стеллажи с уплотненным шагом расположения 300 мм отработавших ТВС в чехлах из нержавеющей бористой стали. Предложен способ уплотненного хранения в стеллажах с шагом от 260 до 270 мм с использованием чехлов из бористой стали. В России создана сталь марки 04X14T3P1Ф с содержанием бора до 2,2 % (ТУ 14-3-1630-89) для изготовления чехлов стеллажей. Согласно [5], в России в настоящее время имеется реализованное решение с шагом 300 мм по треугольной решетке в стеллажах из бористой стали (рис. 1). Уплотненное размещение ОТВС в бассейне выдержки связано с необходимостью иметь свободные места на случай отсутствия возможности транспортировки в строго определенные сроки или разгрузки реактора в целях ядерной безопасности при авариях, связанных с уменьшением плотности воды в хранилищах.

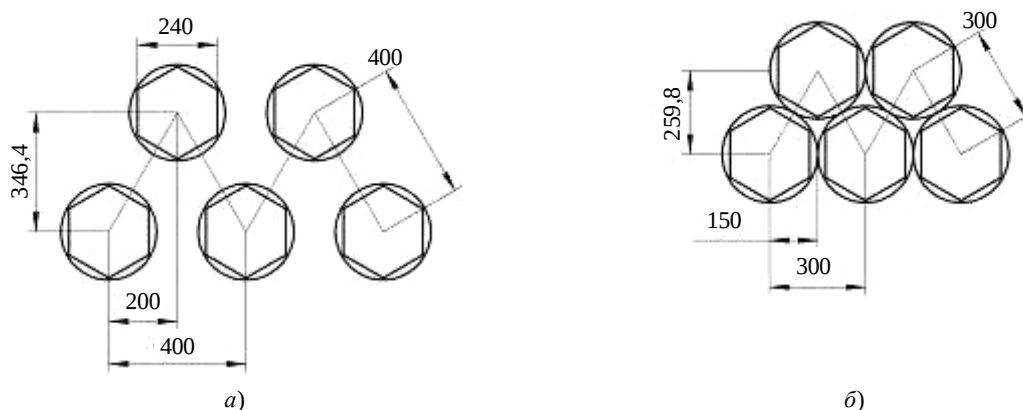


Рис. 1. Решетка стеллажей в бассейне выдержки ВВЭР-1000 [4]:
а – неуплотненное хранение; б – уплотненное хранение

Для АЭС Моховце в Словакии, Темелин в Чехии, Запорожской, Хмельницкой и Ровенской атомных станций в Украине разработаны и установлены стеллажи с уплотненным шагом расположения отработавших ТВС в чехлах в виде шестигранных труб из нержавеющей стали АТАВОР WS 1.4306 BOR0-01, содержащей 1,5 % бора (производства Германии). На рисунке 2 представлены контейнер для хранения ТВС реакторов ВВЭР-440 и стеллаж для хранения ТВС реакторов ВВЭР-1000 (изготавливаются компанией «Skoda JS», Чехия). При изготовлении шестигранных труб применяют технологию электронно-лучевой сварки. Нержавеющие стали, используемые для производства стеллажей и контейнеров, по свойствам относятся к жаропрочным и коррозионно-стойким.

В проекте «АЭС-2006» для реакторов ВВЭР-1200 предполагается использование тепловыделяющих сборок типа ТВС-2М с повышенной степенью выгорания (до 60 МВт·сут/кг U), начальным обогащением 4,88 % по ^{235}U . Такие ТВС, более стойкие к воздействию динамических и температурных факторов, обеспечивают улучшение эффективности использования ядерного топлива. Повышение глубины выгорания топлива влечет за собой необходимость увеличения срока хранения ОЯТ в бассейнах выдержки (предположительно до 10–13 лет). Однако трех лет недостаточно для того, чтобы полностью снять остаточное тепловыделение и снизить активность таких ТВС до уровня, при котором возможно их безопасное перемещение. В связи с этим в проекте «АЭС-2006» увеличена емкость бассейна выдержки ОЯТ, часть бассейна выведена за защитную оболочку реактора, что дает возможность вывоза ОЯТ с площадки АЭС при работающем реакторе [3]. По имеющейся информации, при использовании ТВС с повышенной

степенью выгорания затраты на предполагаемую последующую транспортировку ОЯТ увеличатся, как минимум, в два раза.

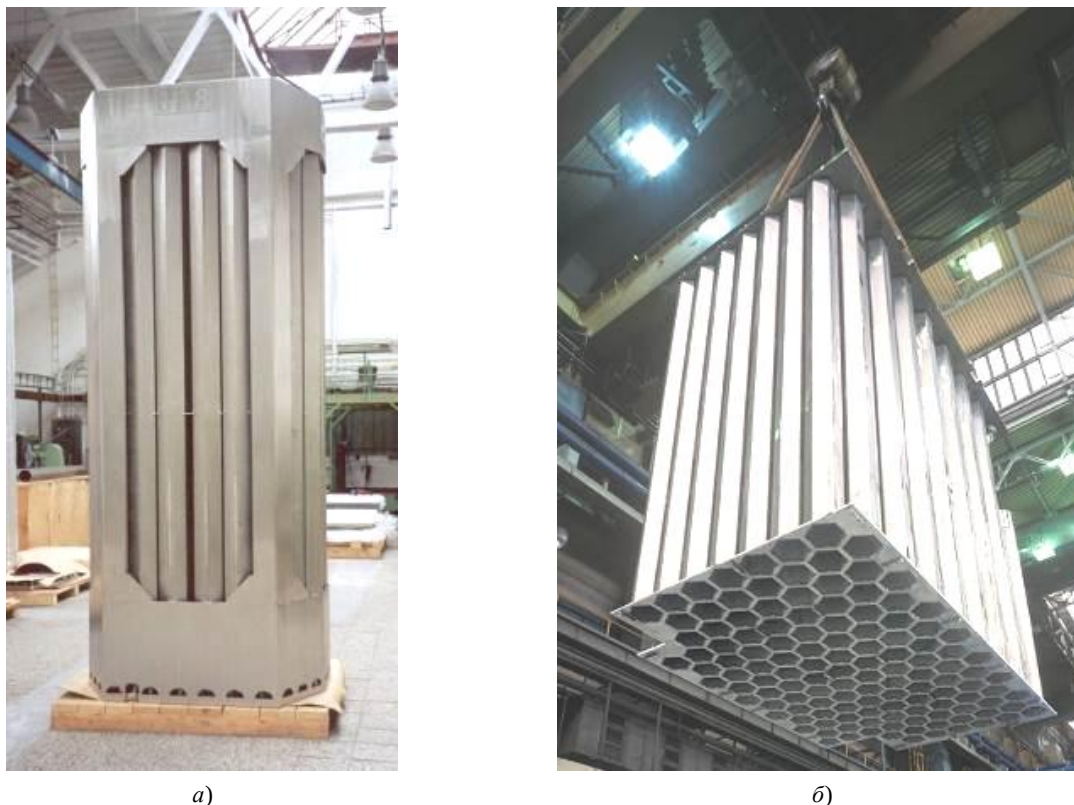


Рис. 2. Устройства для мокрого хранения в бассейне выдержки:
а – контейнер KZ48 на 48 ТВС ВВЭР-440; б – стеллаж для ТВС ВВЭР-1000

В процессе мокрого хранения происходит распад радиоактивных элементов, что снижает энерговыделение от ТВС. В зависимости от типа сборки энерговыделение снижается в 10–15 раз, что позволяет в дальнейшем переводить ТВС в сухое хранилище, где они охлаждаются воздухом. Высокая стоимость услуг по хранению и переработке ОЯТ и отсутствие экономических преимуществ его переработки для рециклирования изъятых урана и плутония заставили ряд государств отказаться от переработки и начать реализацию планов долгосрочного хранения ОЯТ с использованием промежуточных хранилищ отработавшего ядерного топлива сухого типа (СХОЯТ), расположенных вне энергоблоков АЭС. Технологии сухого контейнерного хранения применяются в Болгарии, Великобритании, Германии, Испании, Казахстане, Канаде, Литве, России, США, Украине, Чехии, Швейцарии.

При сухом варианте улучшаются условия хранения (вода является более агрессивной средой по сравнению с воздухом и/или инертными газами), упрощается обслуживание хранилищ, особенно при охлаждении естественной конвекцией, уменьшается доля электропотребления. Снижается объем образования вторичных радиоактивных отходов по сравнению с мокрым способом хранения. При сухой технологии легче осуществить модульный принцип ввода в эксплуатацию, уменьшаются сроки строительства, эксплуатационные затраты, упрощается процедура снятия хранилищ с эксплуатации.

В настоящее время для длительного сухого хранения ОЯТ используют контейнеры российского, немецкого, французского и американского производства. Лидером по разработке и производству контейнеров для транспортировки и хранения ОЯТ является фирма Gesellschaft für Nuklear-Service mbH (GNS) (Германия). Фирма GNS разработала два типа контейнеров: с корпусом из высокопрочного чугуна – CASTOR; металло-бетонным корпусом – CONSTOR. Контейнеры выпускаются как для реактора ВВЭР-440, так и для ВВЭР-1000. По лицензии фирмы GNS производит такие контейнеры компания «Skoda JS» в Чехии. Контейнеры CASTOR для ОЯТ ВВЭР-1000 предназначены для транспортировки и хранения 12 тепловыделяющих сборок. Наружный диаметр контейнеров составляет 2253 мм, высота – 5505 мм, масса с полной загрузкой – 110 тонн. При максимальной температуре оболочек ТВЭлов, загруженных в контейнер ТВС (280 °С), температура на поверхности контейнера CASTOR не превышает 85 °С. Максимальная мощность дозы на его наружной поверхности – менее 200 мкЗв/ч [6]. Контейнеры используют для сухого хранения ОЯТ на АЭС Моховце в Словакии, Темелин в Чехии.

Контейнеры типа ТУК различных модификаций выпускает АО «Ижорские заводы» (Россия). Контейнеры ВКХ-1000 для ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 производит американская фирма Duke Engineering & Services Inc. Практика показывает, что при использовании указанных контейнеров требования к безопасности хранения и перевозок отходов ядерного топлива более высоки, чем требования к надежности космической техники.

Для крупнейшей АЭС Украины и Европы (Запорожской) был также предусмотрен вывоз ОЯТ в Россию. Однако в 1992 году начались поиски радикального изменения складывающейся ситуации, так как из-за дефицита свободных ячеек в бассейнах выдержки уже к 1998 году пришлось бы остановить блоки ЗАЭС. В настоящее время на ЗАЭС для сухого хранения ОЯТ используют контейнеры ВКХ. Контейнеры предназначены для длительного хранения 24 отработавших ТВС. Сборки помещают в блок шестигранных труб, образующий цилиндрическую многоступенчатую герметичную корзину. Корзина представляет собой защитный барьер, препятствующий выходу радиоактивности в окружающую среду, а также является радиатором, отводящим избыточное тепло ТВС в объем вентилируемого бетонного защитного контейнера. В корзине создается и сохраняется в течение всего периода хранения гелиевая атмосфера. Герметичная корзина помещается в вентилируемый бетонный контейнер, который устанавливается на специальной площадке хранения. Наружный диаметр контейнеров составляет 3378 мм, высота – 5809 мм. Шестигранные трубы, предназначенные для размещения отработавших ТВС, имеют длину 4320 мм, внутреннее расстояние между гранями – 249,6 мм, толщину стенки – 5 мм.

Стоимость одного контейнера ВКХ составляет порядка 300 тыс. долл. при изготовлении украинскими предприятиями и около 1 млн. долл. при изготовлении американской фирмой Duke Engineering & Services Inc. В настоящее время на площадке СХОЯТ установлено 80 контейнеров ВКХ. По подсчетам специалистов Запорожской АЭС, экономический эффект от использования СХОЯТ вместо вывоза отработавшего топлива на хранение в Россию на 1.06.2010 составил 467,7 млн. долл.

Контейнеры типа ТУК-13 производства АО «Ижорские заводы», используемые для транспортировки ОЯТ реакторов ВВЭР-1000, были разработаны в 70-х годах прошлого столетия и не отвечают современным требованиям безопасности, в том числе требованиям МАГАТЭ [6].

ОАО «КБСМ» начало разработку транспортно-упаковочных комплектов для ОЯТ реакторов ВВЭР двухцелевого назначения с возможностью использования в режиме транспортирования и длительного (до 50 лет) хранения. Вместимость ТУК по топливу составляет 19 ТВС, глубина выгорания топлива – до 70 МВт-сут/кг U, остаточное энерговыделение топлива – до 40 кВт. Максимальная температура оболочек ТВС не превышает 350 °С. Контейнер имеет длину 6850 мм, наружный диаметр – 3250 мм, массу с полной загрузкой до 150 тонн. Тепловыделяющие сборки размещаются в шестигранных трубах, наружная поверхность которых покрыта борсодержащим сплавом. Для обеспечения ядерной безопасности предусмотрены специальные нейтронные ловушки, в которые закладывается карбид бора [6].

Технологические особенности метода электронно-лучевой сварки. В мировой практике ЭЛС является основным методом получения высоконадежных неразъемных соединений. В настоящее время с применением электронно-лучевых технологий получают детали и узлы АЭС, среди которых можно отметить следующие: корпуса и элементы защиты атомных реакторов, контейнеры для длительного хранения РАО и ОЯТ, пускорегулирующие устройства, различные сенсоры и датчики, теплообменные аппараты, тепловыделяющие элементы, запорная аппаратура, трубчатые и фланцевые соединения в реакторах, тепловые аккумуляторы, тонкостенные решетки для реактора, сепараторы конденсированной воды и т.д. [7]. Наиболее развитыми областями освоенного промышленного применения ЭЛС в мире, кроме традиционных (авиакосмической промышленности и ядерной энергетики), являются: энергетическое машиностроение; электровакуумное, приборное и релейное производство; автомобильная и тракторная промышленность (производство шестерен, элементов коробок передач, рулевых колонок, задних мостов) и др. В Физико-техническом институте НАН Беларуси также накоплен существенный опыт разработки методов получения с использованием ЭЛС высокопрочных соединений для изготовления изделий широкого назначения [8; 9].

Электронно-лучевая сварка – это процесс соединения материалов путем их расплавления в месте стыка, при этом источником тепла является электронный луч с большой удельной мощностью. Для получения оптимального электронного луча необходимо сочетание наилучших условий эмиссии электронов и формирования их в поток в области электронной пушки, соответствующее расположение фокального пятна относительно поверхности свариваемой детали, а также обеспечение должного, без чрезмерных потерь рассеянием, прохождения луча через пространство между пушкой и деталью.

Такой оптимальный электронный луч имеет возможность глубокого проникновения в расплавленный металл. При определенных условиях создается глубокий канал, а перемещение электронного луча ведет к постоянному расплавлению материала на передней стенке канала и перемещению жидкого металла в направлении, противоположном направлению смещения луча. Жидкий металл заполняет промежуток между соединяемыми частями и образует сварной шов. Качественный шов должен быть глубоким, в поперечном сечении – узким, с параллельными стенками и не содержать дефектов. Как и при любом

методе сварки, в процессе ЭЛС могут возникать дефекты в сварном соединении. Условием выполнения бездефектного шва является использование электронного луча с оптимальными для сварки параметрами и правильный выбор параметров технологического процесса.

К технологическому электронному лучу предъявляются следующие требования:

- луч должен обладать полной осевой симметрией;
- должно быть обеспечено постоянство энергетических и геометрических параметров луча после проведения регулярных операций по обслуживанию пушки (например, после замены катода);
- стабильность геометрических параметров луча при изменении мощности луча;
- отсутствие в установке собственных источников помех, влияющих на луч (например, магнитного поля от тока накала катода);
- надежность работы.

В то же время однозначно определить оптимальные технологические условия процесса практически невозможно. Это вытекает как из многофакторности процесса, так и из того, что возникновение дефектов в сварном шве органически связано с механизмом глубокого проплавления. Решением проблемы является определение «запрещенных зон» параметров процессов, нахождение в которых во время ЭЛС (т.е. использование определенных сочетаний удельной мощности, тока фокусировки, режимов развертки луча, скорости сварки и др.) с большой вероятностью ведет к появлению дефектов шва. Последующее применение комплексов параметров, позволяющее избежать попадания в эти зоны, позволит получать качественные швы. Другим методом является такая модификация электронных пучков, чтобы самым существенным образом изменять пространственно-временные условия формирования глубокого сварного канала.

Параметром, наиболее существенным для проведения всех термических процессов, в том числе сварки, является плотность энергии в зоне взаимодействия луча с материалом:

$$q = I \cdot U / S, \text{ Вт/м}^2,$$

где I – ток луча, А; U – ускоряющее напряжение, В; S – площадь поперечного сечения потока электронов, м^2 .

Условием, необходимым для реализации процесса сварки, является такая величина q в зоне взаимодействия с деталью, чтобы могли произойти явления нагрева, расплавления и глубокого проникновения электронов в материал. Это возможно, когда электроны, ударяющиеся о поверхность металла, расплавляют его и создают в материале канал, обеспечивающий проникновение электронов к его нижней части без заметного рассеяния.

При воздействии на материал сварочного электронного пучка невысокой плотности мощности ($10^4 \dots 10^5 \text{ Вт/см}^2$) процесс ЭЛС подобен процессу электродуговой сварки. Он применяется при толщине свариваемого металла не более 3 мм. Повышение плотности мощности электронного пучка приводит к развитию интенсивного испарения материала. Давление отдачи паров, покидающих зону плавления, прогибает поверхность сварочной ванны, и в расплаве формируется пародинамический канал на всю глубину ванны.

Отклонение потока электронов в магнитном и электрическом поле осуществляется практически безынерционно. Это дает возможность перемещать пучок по поверхности свариваемой детали с помощью электромагнитной отклоняющей системы по любому сложному контуру. При этом многие сварочные задачи могут решаться без перемещения пушки или обрабатываемого изделия и сравнительно легко программироваться.

Качество формирования швов при ЭЛС во многом определяется формой зоны проплавления и поведением расплава в сварочной ванне. Гидродинамические явления в сварочной ванне определяются суммарным механическим давлением, действующим на поверхность расплава. Реакция отдачи особенно велика в начальный период плавления, когда отсутствуют углубление в расплаве и площадь облучения равна площади поперечного сечения электронного пучка. После образования стационарного канала плотность мощности электронного пучка на поверхности канала снижается примерно на два порядка.

Анализ технико-экономических параметров процесса электронно-лучевой сварки. С помощью ЭЛС изготавливают изделия из сталей, в том числе высоколегированных, алюминия, меди, титана и их сплавов, тугоплавких металлов и разнородных материалов (сталь-медь, сталь-алюминий и др.). На сталях может быть получен шов глубиной до 200 мм за проход. Основные достоинства метода ЭЛС: малая зона термического влияния, идеальная вакуумная защита сварочной ванны и высокая степень дегазации расплавленного металла, глубокое одностороннее проплавление, дистанционное ведение сварки и малые деформации сварного изделия, возможность сварки тонких (от 0,1 мм) и толстых деталей практически во всех типах конструктивных соединений, полная воспроизводимость и управляемость процесса, высокие качество и производительность, наименьшие эксплуатационные затраты по сравнению с другими технологиями.

Наибольшая эффективность ЭЛС проявляется при соединении толстостенных (30...200 мм) металлических конструкций, тугоплавких и химически активных металлов; характеризуется очень большим отношением «глубина/ширина» сварного шва (до 50:1), недостижимым при других методах сварки;

возможностью получения швов, прочность материала которых не уступает прочности основного материала (коэффициент прочности шва 0,9...1,0), что позволяет конструировать детали с большой экономией массы. При выполнении соединений ЭЛС обеспечивает значительное (в 5...10 раз) снижение энергозатрат по сравнению дуговой сваркой, поскольку благодаря значительно большей удельной мощности объем расплавленного металла в случае ЭЛС существенно ниже. Малый объем расплавленного металла и кратковременность теплового воздействия при ЭЛС обеспечивает незначительные термические деформации соединяемых деталей, во многих случаях не превышающие допусков на механическую обработку.

К преимуществам ЭЛС в сравнении с дуговой сваркой относятся:

- возможность повышения производительности труда до 800 %;
- экономия материалов до 30 %;
- уменьшение монтажного времени на 40...80 %;
- повышение скорости сварки более чем на 100 %;
- повышение экономичности защиты до 35 раз.

По данным предприятий, эксплуатирующих установки для ЭЛС, срок окупаемости оборудования составляет 1...1,5 года. На некоторых крупных машиностроительных фирмах до 40 % объема сварочного производства выполняется с помощью ЭЛС.

При ЭЛС не применяются присадочные материалы, что исключает изменение химического состава материала в зоне расплавления. Процесс сварки протекает в вакууме без флюсов, сварной шов не загрязняется окислами металлов и включениями флюса. Надо учесть, что контейнеры для хранения ОЯТ подвергаются значительному радиационному облучению, поэтому прочность сварных швов, содержащих примеси, может резко понижаться в течение короткого времени.

Таким образом, в случае изготовления шестигранных труб контейнеров для мокрого и сухого хранения отработавших ТВС установки ВВЭР-1200, имеющих длину около 5 м и толщину 4...5 мм, с использованием метода ЭЛС могут быть получены надежные сварные соединения, характеризующиеся незначительными деформациями. Такой уровень качества соединений на длинномерных заготовках из нержавеющей сталей невозможно получить с помощью дуговой и других методов сварки.

Обоснование изготовления стеллажей для уплотненного хранения ОЯТ в бассейне выдержки и контейнеров для сухого хранения ОЯТ. В случае выбора Республикой Беларусь «отложенного» решения по завершению ядерного топливного цикла, т.е. длительного промежуточного хранения ОЯТ (мокрого или сухого), необходимым условием является вложение средств для разработки технологии изготовления контейнеров для хранения отработавших ТВС силами белорусских предприятий и создания соответствующих производств. Количество ежегодно заменяемых тепловыделяющих сборок для одного реактора ВВЭР-1200 составляет в зависимости от топливного цикла от 36 до 42, для двух реакторов – 72 или 84 соответственно. Таким образом, для двух реакторов потребуется изготавливать 3...4 контейнера типа ВКХ в год. За шестьдесят лет эксплуатации АЭС количество контейнеров для сухого хранения ОЯТ составит 190...220 штук.

Считаем оптимальным вариантом для белорусской АЭС использование стеллажей с шестигранными трубами для уплотненного хранения ТВС в бассейне выдержки, изготавливаемыми с помощью ЭЛС. Указанная технология также может быть использована для изготовления шестигранных труб (направляющих) контейнеров для сухого хранения ОЯТ.

Технико-экономические преимущества применения стеллажей для уплотненного хранения ОЯТ с шестигранными трубами рассмотрим на примере хранения отработавшего ядерного топлива в бассейне выдержки на словацкой АЭС Jaslovské Bohunice с установками ВВЭР-440. Хранилище состоит из 3 основных и 1 резервного бассейнов и по первоначальному проекту должно было вмещать 5040 ТВС (168 контейнеров Т12 и Т13 с цилиндрическими трубами) с остаточной тепловой мощностью 516 кВт. К 1998 году, всего через 10 лет использования, хранилище было заполнено. В результате проведенной реконструкции емкость хранилища благодаря использованию компактных контейнеров с шестигранными трубами КЗ48 (см. рис. 1, а) повышена в 2,8 раза (возможно размещение 294 контейнеров с общим количеством 14112 ТВС и их остаточной мощностью 1990 кВт). Срок эксплуатации хранилища продлен на 50 лет. Таким образом, вместо строительства дополнительных хранилищ, стоимость каждого из которых составляет несколько сот миллионов евро, благодаря реконструкции на АЭС Jaslovské Bohunice продлен срок безопасного хранения ОЯТ. Фактически отпала необходимость чрезвычайно дорогостоящих мероприятий по транспортировке и хранению отработавших ТВС у поставщика топлива – России. Это говорит о том, что только за счет организационных мероприятий на стадии подготовки технического задания по проектированию белорусской АЭС может быть заложена большая экономия средств.

Стоимость стеллажей для уплотненного хранения ОЯТ в бассейне выдержки включает стоимость материалов и работ по его изготовлению. Для изготовления одной шестигранной трубы необходимо 120 кг стали марки АТАБОР WS 1.4306 BOR-01, которая производится в Германии. Ее стоимость в виде листа толщиной 4,2...4,4 мм составляет 20 евро за килограмм. Стоимость материала одной трубы оценивается в

2400 евро, а сварочных работ – в 1000 евро. Для стеллажа из 48 труб общая стоимость составит 163200 евро. Кроме того, стеллаж состоит из плит, соединяющих между собой трубы, и узлов для захвата всей конструкции кран-балкой из стали типа X18H10T (см. рис. 1). Стоимость материалов и работ по изготовлению данных конструктивных элементов составит около 50000 евро. А суммарная стоимость контейнера – около 215000 евро. Для сравнения, стоимость аналогичного западного контейнера составляет 1 млн. долл. США.

Белорусские предприятия могут и должны выступать в качестве изготовителей контейнеров, выполненных в соответствии с передовыми достижениями в области сварки. Потребность в контейнерах на протяжении функционирования белорусской АЭС в Беларуси будет стабильной, а их производство рентабельным и выгодным для Беларуси.

В настоящее время ряд государств, эксплуатирующих атомные станции, построенные по российскому проекту, отдают предпочтение варианту сооружения сухих хранилищ для долговременного промежуточного хранения ОЯТ при АЭС как экономически более привлекательному на данном этапе по сравнению с дорогостоящими услугами по вывозу на промежуточное хранение и переработку ОЯТ в Российскую Федерацию. Это же касается и АЭС, находящихся на территории России, которые также должны оплачивать услуги по долгосрочному хранению ОЯТ. В случае выбора для белорусской АЭС длительного промежуточного хранения ОЯТ в контейнерах технология ЭЛС также может быть востребованной для изготовления шестигранных труб.

Для одного реактора ВВЭР-1200 количество ежегодно заменяемых тепловыделяющих сборок составляет от 36 в случае 5-годичного топливного цикла до 42 в случае 4-годичного цикла. Для двух реакторов – 72 или 84 соответственно. Масса ТВС (по UO_2) для проекта АЭС-2006 составляет 578,5 кг. Общее количество ТВС за 60 лет эксплуатации – 4574...5280 шт. Масса ОЯТ (по UO_2) для двух реакторов за 60 лет составит 2646...3055 тонн.

Для двух реакторов в год потребуется 3...4 контейнера типа ВКХ, предназначенных для хранения 24 отработавших ТВС. Стоимость контейнеров для сухого хранения ОЯТ производства США составляет порядка 1 млн. долл. При изготовлении аналогичных контейнеров белорусскими предприятиями стоимость составит 300...500 тыс. долл. (по опыту изготовления контейнеров на Запорожской АЭС). За 60 лет эксплуатации АЭС потребуется 190...220 контейнеров.

Таким образом, затраты на изготовление контейнеров белорусскими предприятиями составят 58,0...110,0 млн. долл. Стоимость пристанционного сухого хранилища определяется проектом и ориентировочно равна 30...50 млн. долл.

В случае выбора Республикой Беларусь варианта по вывозу отработавшего топлива на хранение в Россию с последующей переработкой (стоимость переработки без возвращения высокоактивных отходов достигает 1600...2000 долл. за килограмм тяжелых металлов) максимальный объем финансирования на завершение топливного цикла за 60 лет работы АЭС составит 5,3...6,1 млрд. долл.

Таким образом, уплотненное хранение ОЯТ в стеллажах с шестигранными трубами из бористой стали в бассейне выдержки белорусской АЭС и последующее длительное сухое хранение в пристанционном хранилище в Беларуси является экономически более целесообразным, чем транспортировка отработавшего топлива в Россию. Такое решение, как показано многолетним опытом эксплуатации атомных станций в мире, обеспечивает поддержание жизнеспособности АЭС при неукоснительном обеспечении безопасной эксплуатации.

Выводы:

- анализ проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом на АЭС с установками ВВЭР и РБМК показал, что в настоящее время для таких реакторов ядерный топливный цикл не является замкнутым. Из-за высокой стоимости вывоза в Россию отработавшего топлива Украина и другие государства, эксплуатирующие реакторы ВВЭР после хранения ОЯТ в бассейне выдержки, перемещают его в контейнерах в пристанционное сухое (или мокрое) хранилище. На ряде АЭС в Словакии, Чехии, Украине с установками ВВЭР в бассейнах выдержки установлены стеллажи с уплотненным шагом расположения отработавших ТВС в чехлах в виде шестигранных труб из нержавеющей стали АТАВОР WS 1.4306 BOR-01. Это позволяет повысить вместимость бассейнов выдержки АЭС и время хранения в них ОЯТ, что особенно актуально для новых ТВС с повышенной глубиной выгорания, которые планируется использовать в проекте «АЭС-2006»;

- электронно-лучевая сварка является одним из основных методов получения высоконадежных неразъемных соединений для изготовления деталей и узлов АЭС, среди которых корпуса и элементы защиты атомных реакторов, контейнеры для длительного хранения радиационных отходов и ОЯТ, тепловыделяющие сборки и др.;

- при изготовлении длинномерных (длиной более 4 м) шестигранных труб контейнеров, применяемых как для промежуточного мокрого, так и для сухого хранения отработавших ТВС водо-водяного энергетического реактора, на зарубежных предприятиях используют ЭЛС, с помощью которой получают

прочные высококачественные сварные соединения, характеризующиеся незначительными деформациями, что невозможно при дуговой сварке. Такая технология может быть использована для изготовления стеллажей для уплотненного хранения ОЯТ в бассейне выдержки на белорусской АЭС. Для снижения расходов указанные работы могут выполняться на предприятиях республики;

- оптимальным вариантом является использование на белорусской АЭС стеллажей с шестигранными трубами для уплотненного хранения отработавших ТВС в бассейне выдержки, изготавливаемыми с помощью ЭЛС. Изготовление стеллажей для хранения ОЯТ в бассейне выдержки и контейнеров для длительного сухого хранения отработавшего топлива белорусскими предприятиями с реальной поддержкой отечественных разработчиков высоких технологий в конечном итоге обеспечит большую материальную экономию средств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Форсстрем, Х. Перспективы обращения с ОЯТ / Х. Форсстрем // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 1. – С. 6–11.
2. Кудрявцев, Е.Г. Обращение с ОЯТ в Российской Федерации / Е.Г. Кудрявцев, И.В. Гусаков-Станюкович // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 1. – С. 12–17.
3. Давиденко, Н.Н. Обращение с ОЯТ российских АЭС: проблемы и решения / Н.Н. Давиденко // Безопасность окружающей среды. – 2010. – № 1. – С. 18–20.
4. Расчетно-теоретическое исследование возможностей использования отработавших тепловыделяющих сборок на различных стадиях хранения в качестве источника гамма-излучения для радиационно-технологических процессов / Л.И. Сальников [и др.] // Ядерные технологии XXI века: III междунар. конф. – Минск, 2012. – С. 15.
5. Разработка различных вариантов уплотненного хранения ОЯТ РБМК и ВВЭР в бассейнах выдержки / С.А. Николаев [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: пятая МНТК, Москва, 19–21 апр. 2006 г. – М., 2006. – С. 184–192.
6. Опыт ОАО «КБСМ» по разработке схемно-конструктивных решений перспективного контейнера для хранения и транспортирования ОЯТ ВВЭР / В.Д. Гуськов [и др.] // Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики: шестая МНТК, Москва, 21–23 мая 2008 г. – М., 2008. – С. 736–740.
7. Кайдалов, А.А. Электронно-лучевая сварка и смежные технологии / А.А. Кайдалов. – Киев: Инкорс, 1998. – 232 с.
8. Электронно-лучевая обработка материалов / В.Н. Алехнович [и др.]. – Минск: Белорус. наука, 2006. – 319 с.
9. Гордиенко, А.И. Технично-экономические аспекты проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом для Беларуси (в порядке обсуждения) / А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 2. – С. 108–115.

Поступила 08.11.2013

APPLICATION OF ELECTRON-BEAM TECHNOLOGY AS A STEP TO SOLVE THE PROBLEM OF SPENT REACTOR FUEL HANDLING

I. POBAL

The article deals with the global experience of spent reactor fuel handling and gives the analysis of the Belarusian high technologies in this field, including the experience of using electron-beam welding to produce highly reliable connections. The advantages of electron-beam welding in comparison with the most widely used arc-welding technology are considered. Economic feasibility and preference of spent reactor fuel storage in racks of boron steel hexagonal tubes manufactured by electron-beam welding method in the cooling pond of the Belarusian Nuclear Power Plant and subsequent dry-expendable storage in local facility compared with the removal of spent reactor fuel.