

портальные манипуляторы, обеспечивающие резку под углом криволинейных поверхностей плазменной поворотной головкой. Это позволяет проводить разделку и подготовку кромок перед сварочными операциями, существенно расширяет технологические возможности комплексов при обработке толстолистовых заготовок и обеспечивает переход к широкому применению технологий «прямого выращивания» путем листового раскроя и сборки изделий.

Таким образом, основными направлениями развития оборудования для раскроя листовых материалов и послойной сборки изделий являются:

- применение концентрированных потоков энергии в качестве источников формообразования;
- использование различных видов и форм материалов заготовки;
- распределение потоков энергии по заданному контуру или поверхности, по глубине и интенсивности;
- учет наклона сконцентрированного потока энергии к обрабатываемой поверхности.

**УДК 621.791.3**

## **ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ РЕШЕНИИ НОВЫХ ЗАДАЧ**

**А. И. Гордиенко, И. Л. Поболь**

*Физико-технический институт НАН Беларуси, Минск*

Современные электронно-лучевые (ЭЛ) технологии применяются в самых разнообразных областях, начиная от нанолитографии и формирования нанокристаллических и кристаллических материалов до радиационной обработки огромных объемов твердых и жидких материалов. Рынок их использования составляет многие сотни миллиардов долларов [1]. Для ставшей уже традиционной технологии электронно-лучевой сварки (ЭЛС) находятся новые области применения.

1. В настоящее время остро стоит проблема обращения с радиоактивными отходами высокой степени активности и с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ). Общеизвестный этический принцип обращения с

ними: страна, получающая преимущества от использования ядерных технологий, должна нести полную ответственность по завершению ядерного топливного цикла [2]. При правильном подходе реализация этого принципа может обеспечить минимальные финансовые потери. На Запорожской АЭС экономический эффект от использования технологии сухого хранения ОЯТ вместо его вывоза на хранение в Россию составит около 2,5 млрд дол.

Нами обосновывается метод получения с применением ЭЛС и использованием собственных ресурсов высоконадежных соединений узлов контейнеров для хранения ОЯТ на белорусской АЭС в пристанционных мокром или сухом хранилищах. В мировой практике ЭЛС является основным методом получения высоконадежных неразъемных соединений. В настоящее время с применением ЭЛС получают многие детали и узлы АЭС (корпуса и элементы защиты реакторов, пускорегулирующие устройства, сенсоры и датчики, теплообменные аппараты, ТВЭЛ, запорная аппаратура, трубчатые и фланцевые соединения, тепловые аккумуляторы, тонкостенные решетки, сепараторы конденсированной воды, контейнеры и др.). Такие изделия отвечают более высоким требованиям к безопасности, чем требования к надежности космической техники.

На ряде АЭС с реакторами ВВЭР (в Словакии, Чехии, Украине) разработаны и установлены стеллажи с уплотненным шагом расположения ОЯТ в чехлах в виде шестигранных труб из стали АТАBOR WS 1.4306 BOR-01, содержащей 1,5 % бора (производства Германии). Это позволяет повысить вместимость бассейнов выдержки АЭС и время хранения в них ОЯТ, что является особенно актуальным для нового топлива с повышенной глубиной выгорания, которые планируется использовать в проекте «АЭС-2006». При изготовлении труб применяют технологию ЭЛС.

В рамках Государственной программы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь на 2009 – 2010 годы и на период до 2020 года» (договор № 2009/185) нами проведены исследования по получению соединений из аустенитных нержавеющей сталей 12X18H10T и АТАBOR WS 1.4306 BOR-01, относящихся к коррозионно-, жаростойким и жаропрочным. Изделия из таких сталей могут работать в агрессивных средах при температурах до 350 °С.

Для отработки режимов ЭЛС шестигранных труб контейнеров для хранения ОЯТ экспериментально изучена взаимосвязь параметров процесса ЭЛС (токов фокусировки и сварки, скорости перемещения луча относи-

тельно заготовки) с геометрией шва. Наибольшее влияние на форму сварного шва оказывает ток фокусировки. Выбран оптимальный режим сварки образцов из указанных сталей (на рис. 1 показан фрагмент из стали АТАВОР WS 1.4306 BOR – 01).

Считаем оптимальным вариантом для белорусской АЭС использование стеллажей с шестигранными трубами из бористой стали, изготавливаемыми с помощью ЭЛС, для уплотненного хранения ОЯТ в бассейне выдержки. Указанная технология также может быть использована для изготовления труб (направляющих) контейнеров для сухого хранения ОЯТ. Для снижения расходов указанные работы должны выполняться на предприятиях Беларуси. Это является более экономически целесообразным, чем транспортировка отработавшего топлива в Россию [3]. Такое решение, как показано многолетним опытом эксплуатации многочисленных станций в мире, обеспечивает поддержание жизнеспособности АЭС при неукоснительном обеспечении безопасной эксплуатации.

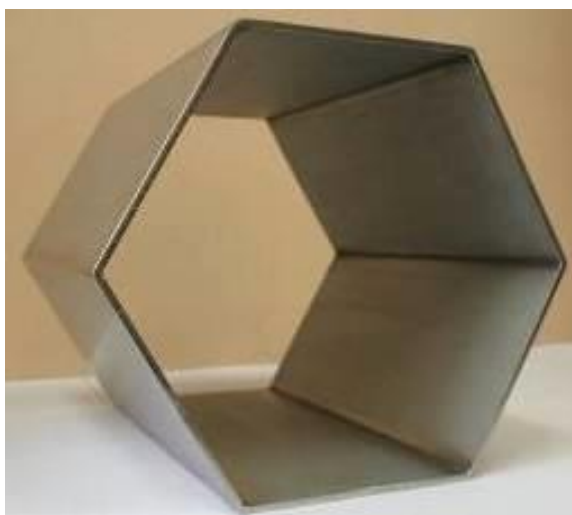


Рис. 1. Образец трубы, изготовленной с помощью ЭЛС

2. ФТИ НАН Беларуси и ряд других научных учреждений Республики Беларусь совместно с ОИЯИ (Дубна, Россия) приступили к исследованиям, имеющим конечной целью стать участниками проекта создания Международного линейного коллайдера (International Linear Collider – ILC). Сверхпроводящий ниобиевый резонатор является ключевым элементом ускорительной секции электрон-позитронного коллайдера. Для его создания потребуется десятки тысяч резонаторов из сверхчистого ниобия, а также привлечение большого количества изготовителей этих сложнотехнических изделий. Соединение деталей должно осуществляться методом

ЭЛС, наиболее приемлемым с точки зрения исключения появления в сварном шве посторонних элементов.

Перед ФТИ НАН Беларуси поставлена задача создать опытный образец высокочастотного ниобиевого СВЧ резонатора дециметрового диапазона (1,3 ГГц). Задача включает большой комплекс проблем, связанный с применением дорогостоящего сверхчистого ниобия. Любой этап обращения с этим материалом может привести к непоправимому ухудшению его свойств. Свойства ниобия должны строго контролироваться после всех процедур обращения с ним.

В нашей работе изучаются режимы процесса сварки и отрабатываются параметры, не ведущие к изменению химического состава материала и снижению механических и электрических характеристик ниобия (рис. 2). Исследуются электрические и сверхпроводящие параметры образцов из листов ниобия, приобретенных у ряда зарубежных поставщиков (в исходном состоянии и после различных этапов работы с ним). Нетривиальность требований к сварному соединению можно отметить тем фактом, что сопровождающий процесс сварки рост размера зерен ниобия до нескольких миллиметров не является неблагоприятным фактором для характеристик резонатора.

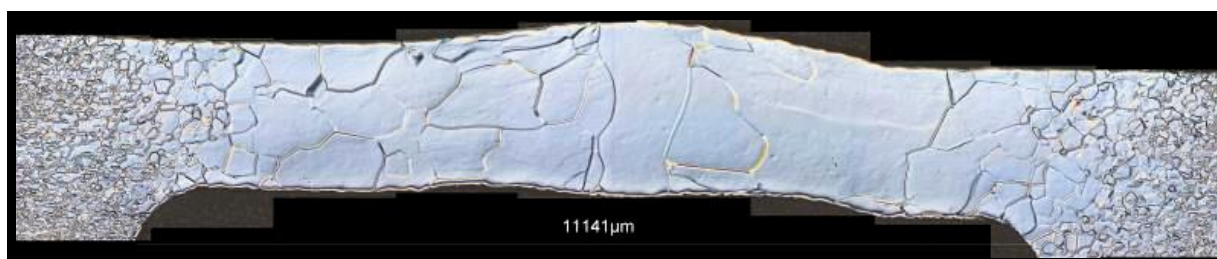


Рис. 2. Поперечное сечение образца из сверхчистого ниобия толщиной 2,8 мм после ЭЛС. Размер зерен 50 – 2000 мкм

### Литература

1. Поболь, И.Л. Состояние и перспективы применения электронно-лучевых технологий в промышленности Республики Беларусь / И.Л. Поболь // Весці НАН Беларусі, Сер. фіз.-тэхн. навук. 2013 (в печати).
2. Форсстрем, Х. Перспективы обращения с ОЯТ / Х. Форсстрем // Безопасность окружающей среды. – № 1. – 2010. – С. 6 – 11.
3. Гордиенко, А.И. Техничко-экономические аспекты проблемы обращения с отработавшим ядерным топливом для Беларуси / А.И. Гордиенко, И.Л. Поболь / Весці НАН Беларусі, Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 2. – С. 108 – 115.