

Е.М. Табакин

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ
АКТИВНЫХ ЗОН
ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК**

Конспект лекций по дисциплине «Специальные вопросы сварки плавлением» для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению 150600.68 «Материаловедение и технология новых материалов» по программе 150604 «Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов»

**Тольятти
ТГУ
2011**

Министерство образования и науки Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Автомеханический институт
Кафедра «Оборудование и технология сварочного
производства и пайки»

Е.М. Табакин

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ
АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК**

Конспект лекций

по дисциплине «Специальные вопросы сварки плавлением»
для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению
150600.68 «Материаловедение и технология новых материалов»
по программе 150604 «Сварка и пайка новых металлических
и неметаллических неорганических материалов»

Тольятти
ТГУ
2011

УДК 621.791

ББК 30.61

T12

Рецензенты:

д.т.н., профессор Пензенского государственного университета

А.Е. Розен;

к.т.н., доцент, главный сварщик ООО «Тольяттиэнергоремонт»

В.А. Иевлев.

Научный редактор: д.т.н., профессор *Ю.В. Казаков.*

T12 Табакин, Е.М. Изготовление сварных конструкций малогабаритных тонкостенных изделий активных зон ядерных реакторных установок : конспект лекций по дисциплине «Специальные вопросы сварки плавлением» для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению 150600.68 «Материаловедение и технология новых материалов» по программе 150604 «Сварка и пайка новых металлических и неметаллических неорганических материалов» / Е.М. Табакин. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 30 с.

В данном издании представлены конструкции изделий закрытой зоны ядерных реакторов, конструкционные материалы, условия эксплуатации изделий, типы сварных соединений, требования к качеству сварных соединений и методы их оценки, приведены примеры технологических процессов сварки изделий, описано применяемое оборудование.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

© ГОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет», 2011

ВВЕДЕНИЕ

Малогабаритные детали, в частности герметизируемые сваркой оболочки, имеющие диаметр от 2 до 10 мм и толщину стенки от нескольких микрометров до десятых долей миллиметра, представляют собой особую группу сварных конструкций. Как правило, сварные соединения в этих случаях являются прецизионными, требующими высокой точности сборки и стабильности процесса сварки. Наряду с повышенными требованиями к качеству сварных соединений особенности малогабаритных деталей обуславливают необходимость разработки и применения новых конструкций стыка свариваемых кромок. Поэтому сварка таких деталей зачастую не может быть осуществлена с помощью известных технологических процессов.

Опыт производства малогабаритных сварных узлов, разработки и применения новых технологий и оборудования для их сварки не систематизирован и лишь изредка и фрагментарно освещается в периодической литературе либо в монографиях, посвящённых проектированию, изготовлению и эксплуатации специальных изделий. В учебной литературе по сварке сведения о технологиях сварки малогабаритных деталей практически отсутствуют. Особенно существенен этот недостаток для программ обучения в магистратуре.

Всё это и привело к необходимости составления и издания предлагаемого конспекта лекций. Цель его — ознакомить магистрантов с современными технологиями и оборудованием для сварки малогабаритных ответственных конструкций путём обобщения накопленного опыта производства изделий активных зон ядерных реакторов.

Лекция 1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ, УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК

1.1. Термины и определения

Активная зона (АЗ) ядерного реактора — одна из зон, находящихся внутри корпуса реактора, в которой происходят основные процессы, связанные с его эксплуатацией и проведением научных исследований.

Изделия активной зоны ядерного реактора

Тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) — тонкостенные оболочковые конструкции стержневого типа, внутри которых находится ядерное топливо, происходит его распад и выделение тепла.

Облучательные ампулы — ампулы оболочковой конструкции, применяемые для накопления изотопных элементов, используемых в различных отраслях (промышленность, медицина, научные исследования).

Экспериментальные образцы и устройства — изделия, с помощью которых проводятся исследования в обоснование работоспособности основных конструктивных элементов и узлов ядерных реакторов.

Источники ионизирующих излучений (ИИИ) — малогабаритные герметичные изделия, содержащие радиоактивные элементы, используемые в различных отраслях промышленности, медицине, научных исследованиях.

1.2. Технические характеристики и особенности конструкций изделий активных зон ядерных реакторов

1.2.1. Особенности конструкций изделий

В большинстве случаев изделия АЗ ядерных реакторов — это конструкции стержневого типа. Как правило, изделия представляют собой герметичную оболочку различной конфигурации, внутри которой размещается ядерное топливо и локализуются радиоактивные продукты деления (рис. 1). Оболочка обеспечивает требуемую механическую прочность конструкции, ее размерную стабильность, а также защища-

ет размещенное в ней ядерное топливо от коррозионно-эрозионного воздействия теплоносителя.

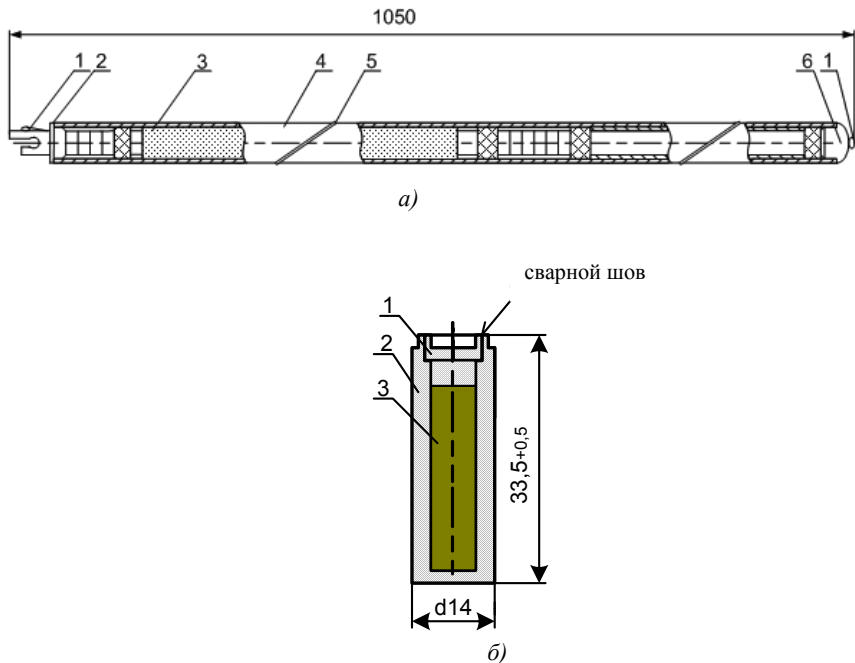


Рис. 1. Примеры конструкций изделий АЗ ядерных реакторов: а) конструкция твэла: 1 – узел крепления дистанционирующей проволоки; 2, 6 – верхнее и нижнее сварные соединения оболочки с заглушками; 3 – топливный сердечник; 4 – оболочка; 5 – дистанционирующая проволока; б) конструкция типового ИИИ: 1 – заглушка (крышка); 2 – оболочка (корпус); 3 – сердечник (активная часть)

Типовые конструкции изделий АЗ имеют диаметр от 0,17 до 100 мм; длину от 2 до 2000 мм; толщину стенки от 0,02 до 2 мм.

По торцам оболочка изделия герметизируется различными способами сварки с использованием концевых элементов – заглушек. Иногда на оболочку изделия навивается дистанционирующая проволока, обеспечивающая соблюдение стабильного зазора между изделиями, установленными в реакторе, и свободный проход по нему теплоносителя. Дистанционирующая проволока крепится к поверхности оболочки или к концевым элементам изделия с помощью различных методов сварки.

1.2.2. Конструкционные материалы

Конструкционные материалы, используемые для изготовления оболочек изделий АЗ, должны обладать достаточной жаропрочностью, коррозионной стойкостью, иметь высокую пластичность, быть устойчивыми к набуханию, охрупчиванию и снижению прочностных характеристик в нейтронном поле. Экспериментальные изделия активных зон изготавливаются из следующих материалов:

- высоколегированные стали аустенитного и феррито-мартенситного класса;
- сплавы на основе цветных и тугоплавких металлов: алюминия, титана, циркония, молибдена, ванадия;
- разнородные соединения сталей и сплавов (сталь-цирконий, сталь-молибден и др.).

1.2.3. Условия эксплуатации изделий

Изделия АЗ являются наиболее ответственными конструкциями ядерного реактора. При сохранении требуемой герметичности во время эксплуатации не должно происходить значительных изменений их геометрических размеров, приводящих к их разрушению. Разгерметизация изделий и нарушение их работоспособности приводят к наиболее опасным последствиям: выходу ядерного топлива, продуктов деления и в отдельных случаях – к аварийным ситуациям. К числу процессов, усложняющих эксплуатацию тепловыделяющих изделий активных зон, относятся:

- температура эксплуатации 100...750°С;
- использование омывающего их теплоносителя (вода, жидкий натрий);
- уровень накопления радиационного повреждения материалов, достигающий значений 100...120 смещений на атом (сна);
- действие на оболочку изделия напряжений, возникающих внутри изделия от давления газовых продуктов деления, достигающих 7 МПа и более;
- наличие термических напряжений (0,6...0,7 от величины предела текучести), обусловленных высокими тепловыми нагрузками;
- избыточное давление теплоносителя (вода, жидкий натрий), омывающего в некоторых случаях изделие, 0,4...0,7 МПа.

1.2.4. Типовые конструкции сварных соединений

При разработке и изготовлении изделий АЗ ядерных реакторов чаще всего используются стыковые, стыко-замковые, торцовые кольцевые и торцовые точечные соединения.

Одним из наиболее распространенных соединений является торцовое точечное (рис. 2,б): сварной шов получается при совместном оплавлении пробки с торцом оболочки с помощью аргонодуговой сварки неплавящимся электродом. В этом случае шов формируется, как капля, в полусфере, опирающуюся на поверхность оплавления, тем самым уменьшается образование растягивающих напряжений, способствующих возникновению трещин. К тому же имеющиеся несплошности и включения в металле переплавляются, а растущие снизу вверх кристаллиты оттесняют их в купольную часть и выводят наружу. Сварные швы при таком способе сварки не только менее склонны к образованию дефектов, но и весьма технологичны. Выполнение таких швов легко автоматизируется, технология настройки под сварку значительно упрощается. Толщина свариваемых кромок при данной конструкции не имеет существенных ограничений. Отличительной особенностью такой конструкции и разновидности способа аргонодуговой сварки является то, что для обеспечения требуемой формы сварного шва возможно применение режимов сварки, позволяющих регулировать время существования металла в расплавленном состоянии в большом диапазоне. Единственный недостаток заключается в том, что применение данной конструкции, как показывает практика, возможно на оболочках диаметром не более 12...14 мм.

Для герметизации тонкостенных оболочек также технологично применять торцовую кольцевую конструкцию соединения под сварку (рис. 2,г). В этой конструкции соединения, как и в точечной торцовой, при кристаллизации обеспечивается свободная усадка металла шва и уменьшается вероятность образования трещин и других дефектов сплошности.

Такую конструкцию можно реализовать на оболочках практически любой толщины от 0,15 до 1,0 мм. Недостатком торцовой кольцевой конструкции является то, что из-за сложности сборки и сварки в дистанционных условиях ее использование возможно при диаметре изделия более 4,0 мм. Кроме того, на некоторых твэлах применение такой

конструкции невозможно из-за необходимости сохранения определенной конфигурации торцевой заглушки.

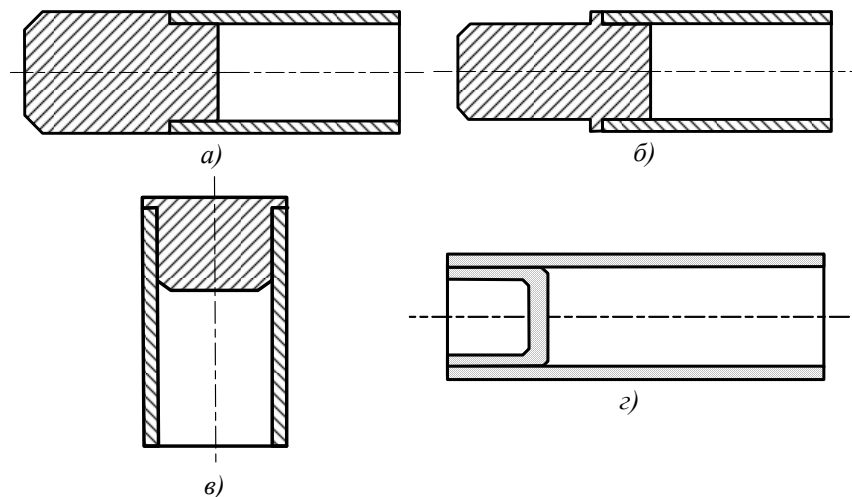


Рис. 2. Конструкции сварных соединений изделий активных зон ядерных реакторов: а) стыко-замковое соединение; б) стыко-замковое соединение с буртом; в) торцовое точечное соединение; г) торцовое кольцевое соединение

Стыко-замковая конструкция соединения под сварку часто предполагает использование оболочки и заглушки различной формы (рис. 2). Процесс сварки осуществляется при горизонтальном расположении оси вращения изделия. Эта конструкция очень удобна в сборке, и для выполнения таких узлов могут быть применены различные способы и технологические процессы сварки. Недостатком является то, что швы в конструкциях с удлиненной заглушкой формируются всегда с дефицитом металла (рис. 2,а). На их поверхности действуют растягивающие напряжения, направленные поперек оси шва. При таком напряженном состоянии в момент завершения кристаллизации существует вероятность получения швов с трещинами. Если позволяет диаметр оболочки изделия, возможно использование стыко-замковой конструкции с технологическим буртом, выполняемым на заглушке (рис. 2,б). В этом случае швы формируются выпуклыми со сжимающими напряжениями на поверхности, что существенно уменьшает вероятность возникновения трещин.

Перечисленные конструкции сварных соединений успешно используются при герметизации изделий активных зон реакторов способами сварки плавлением: аргонодуговой, электронно-лучевой, лазерной. При этом возможно получение сварных соединений требуемой формы и сплошности, при которых изделия активной зоны исследовательских реакторов способны сохранять работоспособность на все время их эксплуатации.

1.3. Требования к качеству сварных соединений и методы его оценки

1.3.1. Критерии оценки качества сварных соединений

Сварные соединения изделий АЗ являются одними из основных узлов, обеспечивающих их работоспособность в жестких условиях эксплуатации. Нарушение работоспособности сварных соединений в данном случае может привести к серьезным отклонениям в работе реакторных установок. Ввиду этого к качеству сварных соединений изделий АЗ предъявляются высокие требования, определенные отраслевой нормативно-технической документацией.

По герметичности:

- соединение должно быть герметично во все время его эксплуатации.

По внешнему виду:

- не допускаются прожоги, трещины, поры, подрезы, несплавления, включения вольфрама, превышение усиления сварного шва, выходящие за пределы, установленные в конструкторской документации.

По сплошности:

- глубина проплавления сварного шва должна быть не менее толщины оболочки;
- не допускаются трещины любого вида, поры размером более 20% от толщины оболочки, включения вольфрама.

Следует отметить, что оценка сплошности сварных соединений изделий АЗ производится в области контролируемого сечения. Например, в торцовом сварном соединении в качестве контролируемого сечения принимают участок шва в виде цилиндра, ограниченного внутренним и наружным диаметрами оболочки и свободной поверхностью шва (рис. 3,а). Контролируемым сечением для стыко-замкового свар-

ного соединения является участок шва, ограниченный линиями сплавления, линией свободной поверхности и линией, являющейся продолжением поверхности детали (рис. 3,б).

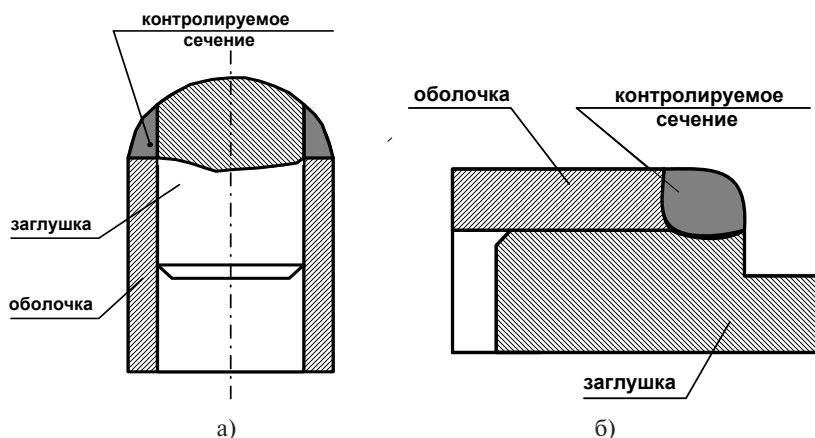


Рис. 3. Контролируемое сечение в торцовом (а) и стыко-замковом (б) соединениях

1.3.2. Методы и оборудование, используемые при оценке качества сварных соединений

Контроль качества сварных соединений малогабаритных тонкостенных конструкций является одной из важнейших операций в технологии их изготовления. В конечном счете от качества выполняемых сварных соединений зависит работоспособность изделия, содержащего радиоактивные элементы. Так как в большинстве случаев нарушение работоспособности конструкций изделий создает угрозу безопасности эксплуатации ядерных реакторов и здоровью людей, к качеству сварных соединений предъявляются достаточно жесткие требования.

Предъявляемые высокие требования к качеству сварных соединений определяют необходимость использования методов контроля, обладающих высокой разрешающей способностью, позволяющих определять дефекты, размер которых в большинстве случаев не превышает 0,1 мм. Как правило, применение одного метода не позволяет получить достоверной информации, особенно для сварных соединений малогабаритных изделий. Поэтому предусматривается проведение комплексной оценки состояния сварных соединений.

В комплексе технологического оборудования находятся установки контроля герметичности масс-спектрометрическим и вакуумно-жидкостным методами (рис. 4). Вакуумно-жидкостным методом контролируется наличие крупных течей в малогабаритных изделиях. В большинстве случаев этот метод применяется как предварительный перед контролем герметичности на мелкие течи, выполняемым масс-спектрометрическим методом. Для обнаружения дефектов сплошности без разрушения сварных соединений применяется метод радиографического контроля. Чувствительность этого метода достаточно высока для того, чтобы выявлять в сварных соединениях небольшие несплошности (до 80 мкм) (рис. 5). Участок металлографических исследований (рис. 6) используется для оценки состояния сварных соединений при отработке технологии сварки малогабаритных тонкостенных конструкций и в процессе изготовления изделий для проведения контрольных операций на образцах-свидетелях.



a)



б)

Рис. 4. Установки для контроля герметичности масс-спектрометрическим (*a*) и вакуумно-жидкостным (*б*) методами



Рис. 5. Установка радиографического контроля РАП-150



Рис. 6. Участок металлографических исследований, оснащенный микроскопом ММР-4 и микротвердомером ПМТ-4

Важным условием получения качественных сварных соединений малогабаритных тонкостенных конструкций, особенно при работе в дистанционных условиях, является строгое соблюдение основных параметров разработанных режимов сварки. Во многих случаях их соблюдение контролируется с помощью разработанного специалистами Санкт-Петербургского завода «Электрик» регистратора сварочных процессов типа Р-3704. По результатам сварки через компьютерную систему, оснащенную специальной программой, выдается распечатка регистрограммы процесса (рис. 7). Некоторые установки оснащаются не только регистратором сварочных процессов, но и устройством программирования режимов сварки, управляемым с помощью компьютера.

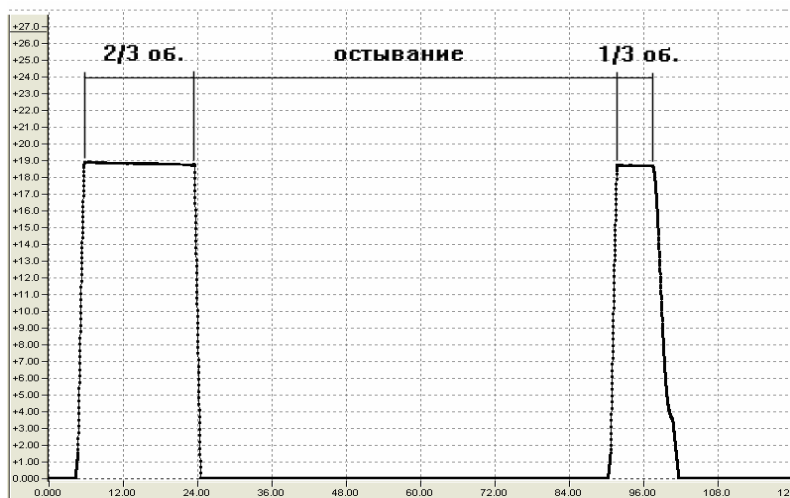


Рис. 7. Пример регистрограммы процесса сварки корпуса ИИИ

Контрольные вопросы

1. Основные условия эксплуатации изделий АЗ ядерных реакторов.
2. Виды изделий АЗ.
3. Методы и критерии оценки качества сварных соединений изделий АЗ.
4. Типы используемых конструкций сварных соединений изделий АЗ.

Лекция 2. ПРИМЕРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ (СВАРКИ) ИЗДЕЛИЙ. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ

2.1. Сварка корпусов источников ионизирующих излучений

Основная особенность сварки таких изделий связана с их малыми геометрическими размерами (диаметр от 0,2 мм, толщина стенки от 5 мкм) и тем, что из-за наличия внутри изделий радиоактивного материала работа производится в дистанционных условиях защитных камер и боксов. Решение задачи получения качественных сварных соединений в этом случае во многом зависит от выбранного способа и режима сварки, конструкции сварного соединения, используемого оборудования и специальной оснастки.

Выбор способа сварки для герметизации малогабаритных источников имеет большое значение и во многом определяет качество сварного соединения. Наиболее широкое применение находит аргонодуговая сварка неплавящимся электродом. Этот способ сварки является одним из наиболее технологичных и успешно автоматизируется в условиях дистанционной сварки. Применение данного способа сварки позволяет выполнять герметизацию корпусов источников излучений, имеющих разнообразные конструкции сварных соединений в различных пространственных положениях.

В Научно-исследовательском институте атомных реакторов (НИИАР, г. Димитровград) нашел широкое применение способ аргонодуговой сварки оплавлением торца, применяемый для герметизации корпусов диаметром до 10 мм (рис. 8). Простота реализации этого способа обусловила его использование при работе в дистанционных условиях радиационно-защитных камер и боксов. При этом используется торцовая точечная конструкция сварного соединения. Применение такого способа сварки максимально упрощает точность позиционирования электрода относительно свариваемого изделия, что особенно важно при выполнении операций в дистанционных условиях работы. Диапазоны значений основных параметров режима сварки при выполнении сварных соединений корпусов источников диаметром от 1,0 до 10 мм:

- ток сварки от 10 до 100 А;
- время сварки от 0,5 до 3 с;
- напряжение на дуге до 15 В;
- расход аргона от 4 до 6 л/мин;
- длина дуги от 3 до 5 мм.

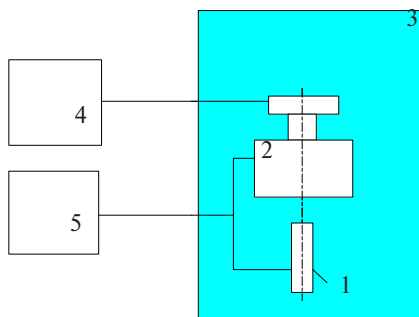


Рис. 8. Внешний вид и схема компоновки оборудования для дистанционной аргонодуговой сварки методом оплавления торца: 1 – изделие; 2 – сварочная головка; 3 – защитный бокс; 4 – система подачи защитного газа; 5 – источник питания

Аргонодуговая сварка кольцевым периметрическим швом выполняется как на серийной установке сварки кольцевых швов АСТЭ-7 (рис. 9), так и на специально разрабатываемых для каждого типа изделия установках дистанционной сварки. Например, достаточно эффективно такие установки используются при герметизации капсул источников на основе радиоактивного селена (рис. 10,а) и кобальта (рис. 10,б). При таком способе сварки чаще применяются стыко-запаянные или стыковые соединения. Сварка таких изделий диаметром от 3 до 70 мм с толщиной стенки от 0,4 до 2 мм в большинстве случаев выполняется при режимах:

- ток сварки от 15 до 40 А;
- скорость сварки от 1 до 4 мм/с;
- напряжение на дуге до 15 В;
- расход аргона от 4 до 6 л/мин;
- длина дуги от 2 до 3 мм.



Рис. 9. Установка аргонодуговой сварки кольцевых швов АСТЭ-7



a)



б)

Рис. 10. Образцы сварных соединений, выполненных на установке АСТЭ-7:

- a)* ИИИ на основе радиоактивного селена, заваренный кольцевым швом;
- б)* ИИИ на основе радиоактивного кобальта, заваренный круговым швом по торцу

В последние годы широкое применение для сварки малогабаритных корпусов источников нашел способ лазерной сварки как в обычных, так и в дистанционных условиях. Применение импульсной лазерной сварки позволяет:

- герметизировать малогабаритные изделия (диаметр 0,1...0,2 мм);
- выполнять сварку изделий из трудносвариваемых металлов, изготовленных методом порошковой металлургии и склонных к повышенному порообразованию;

- сваривать изделия, имеющие толщину стенки несколько микрометров;
- проводить операцию сварки изделий сложной конструкции с минимальным разогревом участков, прилегающих к сварному соединению.

Для расширения возможности применения этого способа при изготовлении изделий ядерной техники различного назначения в НИИАР был разработан и внедрён комплекс, позволяющий выполнять лазерную сварку в дистанционных условиях (рис. 11).

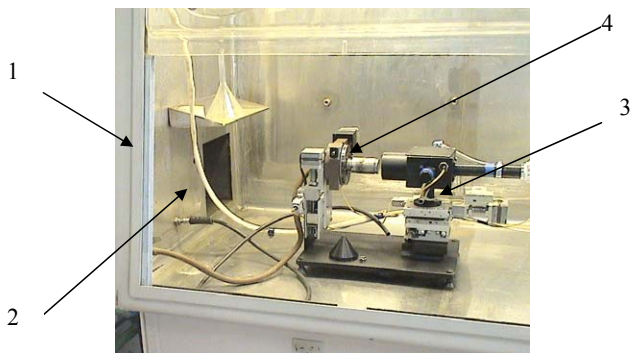


Рис. 11. Общий вид установки лазерной сварки, размещенной в боксе:
 1 – световод; 2 – защитный бокс; 3 – излучатель с видеокамерой;
 4 – вращатель изделия с системой позиционирования

Комплекс создан на базе промышленной установки лазерной сварки КВАНТ-15. Он оснащен системой мониторинга и позиционирования лазерного излучения (СМПЛИ), позволяющей передавать лазерный луч с помощью световода в защитный бокс, камеру или вытяжной шкаф и осуществлять сварку в автоматическом режиме с использованием системы видеонаблюдения. В защитном боксе размещены: вращатель для автоматической сварки, сварочная головка, оборудование для контроля герметичности, приспособления для сборки и сварки миниатюрных изделий. Специализированная оснастка позволяет производить в случае необходимости сварку в вакууме. Технические возможности такой установки обеспечивают выполнение сварных соединений изделий практически любой конфигурации, имеющих толщину стенки от нескольких микрометров до одного миллиметра.

Например, только благодаря использованию такого комплекса удалось провести герметизацию микрокапсул источников на основе церия-144 (рис. 12). Конструкция корпусов источников выполняется из сплава

титана или нержавеющей стали. Корпус изготавливается из капилляра диаметром 120 мкм с толщиной стенки 20 мкм. Первоначально в обычных условиях свободный торец капилляра, свитого в спираль диаметром 380 мкм, герметизируется с помощью импульсной лазерной сварки.

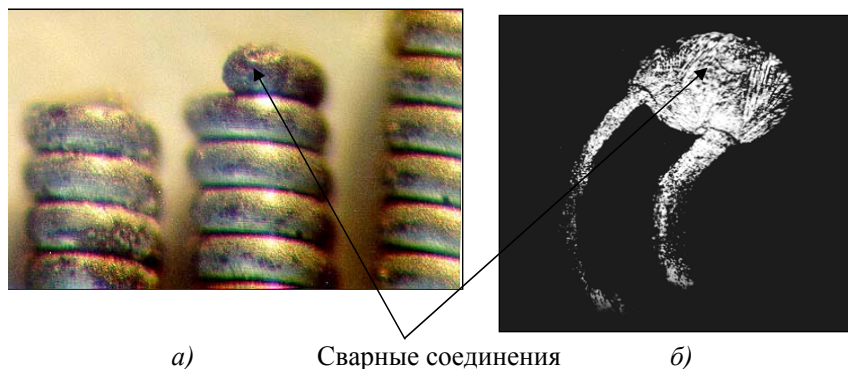


Рис. 12. Внешний вид (а) и сечение (б) сварного соединения торца капсулы источника на основе церия-144. Материал корпуса – сталь 12Х18Н10Т

На сварочном комплексе производится и герметизация корпусов источников на основе $^{244}\text{См}$ активностью до 1×10^8 Бк. Источники на основе $^{244}\text{См}$ предназначены для комплектации прибора рентгенофлуоресцентного анализа, который использован в составе космической миссии «Фобос-грунт» для определения состава грунтовых пород Фобоса – спутника Марса.

Отличительной особенностью конструкции источника диаметром 9 мм и высотой 2,5 мм является наличие мембраны толщиной 3 мкм и крышки толщиной 300 мкм, сварка которых с корпусом осуществлялась в условиях инертной среды или вакуума в зависимости от технических требований. В качестве конструкционного материала корпуса источника использовался сплав титана ВТ1-0.

Выбор конструкции элементов сварного соединения обусловлен малой глубиной проплавления (3–50 мкм), обеспечивающей незначительные напряжения металла в процессе сварки. При подготовке под сварку дополнительно производится подгонка сварочных кромок с помощью шлифовки свариваемых кромок алмазной пастой и ручная вырезка ножницами мембран из титановой фольги толщиной 3 мкм. Образцы перед сваркой промывают спиртом, затем просушивают.

Для сборки и прихватки первого и второго швов используются разработанные и изготовленные кондукторы (рис. 13, 14), в которых производится ручная центровка, поджим свариваемых элементов и активной части источника. Перед сваркой кольцевых швов проводится прихватка дна, корпуса, мембраны и крышки источника в трех-четырех точках по периметру кольцевых швов. Прихватки и кольцевой шов производятся с помощью лазерной сварки (рис. 15).

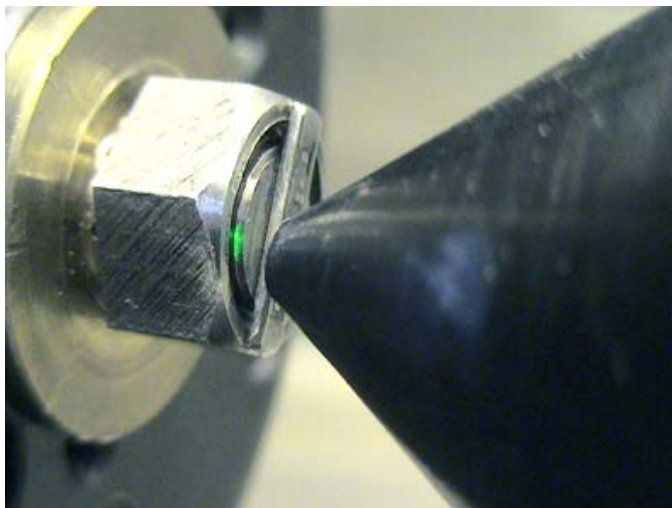


Рис. 13. Кондуктор для сборки и выполнения прихваток второго шва в цанге установки СМПЛИ



Рис. 14. Кондуктор для сборки и центровки мембраны с элементами корпуса источника с окнами для выполнения трех прихваток первого шва



Рис. 15. Участок лазерной сварки на базе установки КВАНТ-15 с СМПЛИ в вытяжном шкафу



Рис. 16. Приспособление для проверки герметичности вакуумно-жидкостным методом (ВЖМ) с ограничением деформации мембраны при вакуумировании корпуса

После сварки первого шва источника проверяется его герметичность с помощью вакуумно-жидкостного метода (ВЖМ) в спирте в приспособлении, исключающем разрушение мембраны источника при его вакуумировании (рис. 16).

Для сварки второго шва использовалась установка лазерной сварки КВАНТ-15 с СМПЛИ, расположенная в защитном боксе. После этого применялся контроль герметичности иммерсионным методом. Суть метода заключается в кипячении изделия, содержащего радиоактивный продукт, в слабом растворе кислоты и последующем измерении радиационной активности этого раствора.

Контроль качества изготовления заготовок с целью выявления дефектов на поверхности (царапины, проколы, складки) и на краю (надрывы, изменение геометрии мембраны), сборка и анализ внешнего вида сварных соединений производятся под микроскопом типа МБС-9 при увеличении не менее 20 крат.

При проведении металлографических исследований проводится анализ состояния сварных соединений в поперечном сечении, позволяющий оценить не только сплошность, но и наличие утонения мембран в месте сварки (рис. 17).

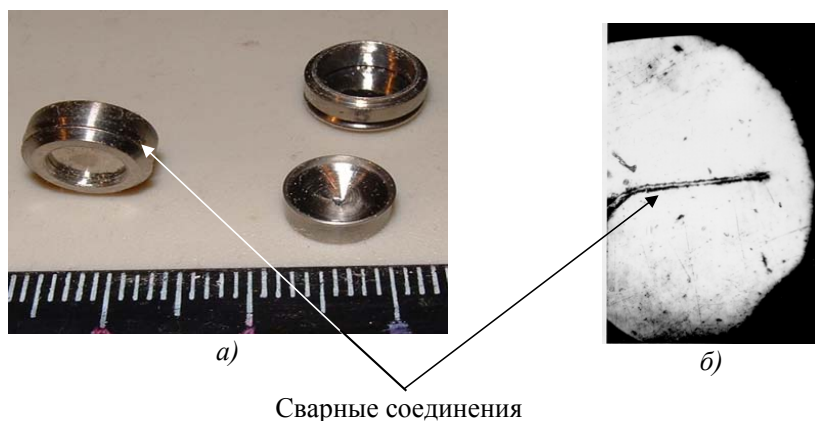


Рис. 17. Источник на основе кюрия-244 (а). Сварное соединение крышки с корпусом источника и мембраной толщиной 3 мкм (б).
Материал – титан ВТ1-0. Поперечное сечение сварного соединения $\times 300$

2.2. Сварка других изделий активных зон ядерных реакторов

Способ лазерной сварки успешно применен и при герметизации изделий из дисперсионно-упрочненных сталей, изготовленных методом порошковой металлургии. В частности, этим способом выполнена сварка тонкостенных (толщина 0,4 мм) оболочек экспериментальных твэлов из ферритных и мартенситных сталей тепловыделяющей сборки (ТВС) реакторной установки РУ БОР-60 (рис. 18). Выбранная стыко-замковая конструкция позволила создать сварное соединение, не уступающее по прочности всему изделию. Использование технологии лазерной сварки решает одну из основных задач, существующих при сварке порошковых металлов, – снижение пористости сварных соединений и обеспечение их сплошности.

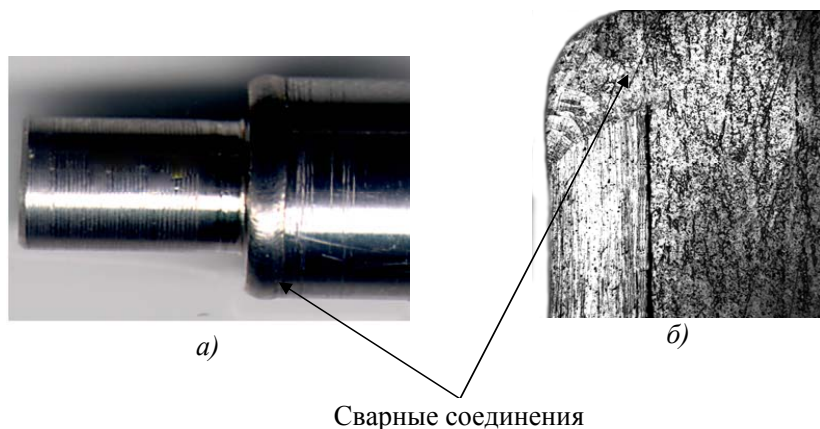


Рис. 18. Внешний вид (а, $\times 5$) и сечение (б, $\times 50$) сварного соединения оболочки из дисперсионно-упрочненной стали твэла экспериментальной ТВС РУ БОР-60, выполненного лазерной сваркой

Установка аргонодуговой сварки неплавящимся электродом САУ-АДС (рис. 19,а) предназначена для реконструкции ударных образцов Шарпи из облученного материала корпуса ядерного реактора. Проведение реконструкции облученных ударных образцов позволяет получить дополнительную информацию о свойствах материалов, применяемых в конструкциях ядерных энергетических установок для прогнозирования срока их безопасной эксплуатации. Процесс реконструкции

состоит из нескольких этапов, включающих поочередную приварку концевых элементов к центральной, испытываемой части образца (рис. 19,б). Сварка выполняется в импульсном режиме продольными швами последовательно по всем сторонам образца коробчатого сечения (10×10 мм) с проплавлением 1,5...2,0 мм. При этом используются медные теплоотводящие цанги. Сварка при таких условиях позволяет снизить температурное влияние на испытываемую часть образца Шарпи и сохранить первоначальную структуру металла.

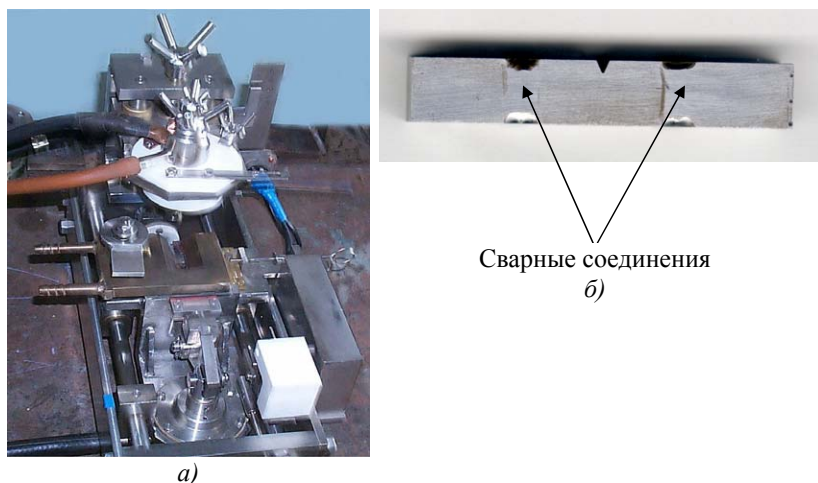


Рис. 19. Установка сварки САУ-АДС для реконструкции ударных образцов Шарпи (а) и ударный образец (б), прошедший реконструкцию способом аргодуговой сварки

Установка сварки в контролируемой атмосфере УСК-1 (рис. 20,а) предназначена для сварки неплавящимся электродом в среде защитного газа (как правило, аргона или гелия), что позволяет не только обеспечивать качественную защиту зоны сварки, но и получать внутри герметизируемого объема среду этого газа нужной процентной концентрации (до 99,9%). Так же с применением этого метода можно создавать внутри металлических трубчатых конструкций диаметром 3...15 мм инертную атмосферу с избыточным (до 20 МПа) давлением. При сварке в условиях повышенного давления инертного газа используются повышенные значения напряжения на дуге – до 30 В. При этом, как правило, используются конструкции торцевой заглушки с осевым тех-

нологическим отверстием, через которое происходит заполнение изделия газом с последующей герметизацией методом оплавления торца. Кроме того, с помощью данной установки можно исправлять дефекты сплошности сварных соединений твэлов, радионуклидной продукции и других изделий ядерной техники (рис. 20,б). Это достигается путем создания избыточного давления над сварочной ванной, при ремонтной аргонодуговой сварке, достаточного для уменьшения размеров дефектов до минимальных.

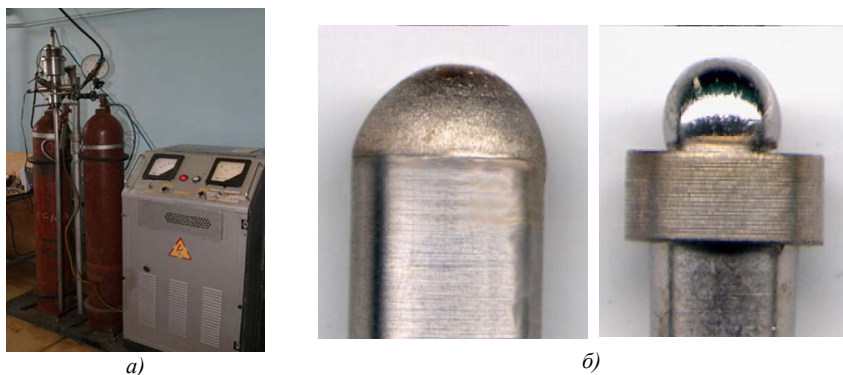


Рис. 20. Установка сварки в контролируемой атмосфере УСК-1 (а) и образцы сварных соединений (б)

Электронно-лучевая сварка применяется для изготовления изделий из легкоокисляющихся сплавов. Сварка в высоком вакууме полностью исключает взаимодействие расплавленного металла с окружающей средой. На установке ЭЛУ-5 (рис. 21) производится сварка изделий из сплавов циркония, титана, никеля с толщиной свариваемых кромок от 0,3 до 3 мм, диаметром изделия от 6 до 400 мм и длиной до 2 м (рис. 22). При проектировании изделий, свариваемых таким способом, чаще используются стыковые, стыкозамковые, торцевые конструкции сварных соединений. Установка обеспечивает возможность создания вакуума внутри изделия до значений 1×10^{-5} мм рт. ст. Одним из существенных недостатков применения данного способа для сварки изделий активных зон ядерных реакторов является его высокая трудоемкость, связанная с длительностью процесса создания вакуума в замкнутом объеме установки. Однако в отдельных случаях, когда необходимо изготовить уникальные, дорогостоящие изделия из трудносвариваемых

в обычных условиях металлов (чаще всего это сложные экспериментальные внутриреакторные устройства), применение этого способа является экономически оправданным.



Рис. 21. Установка электронно-лучевой сварки ЭЛУ-5



Рис. 22. Образец сварного соединения, выполненного на установке электронно-лучевой сварки ЭЛУ-5



Рис. 23. Установка диффузионной сварки МДВ-301

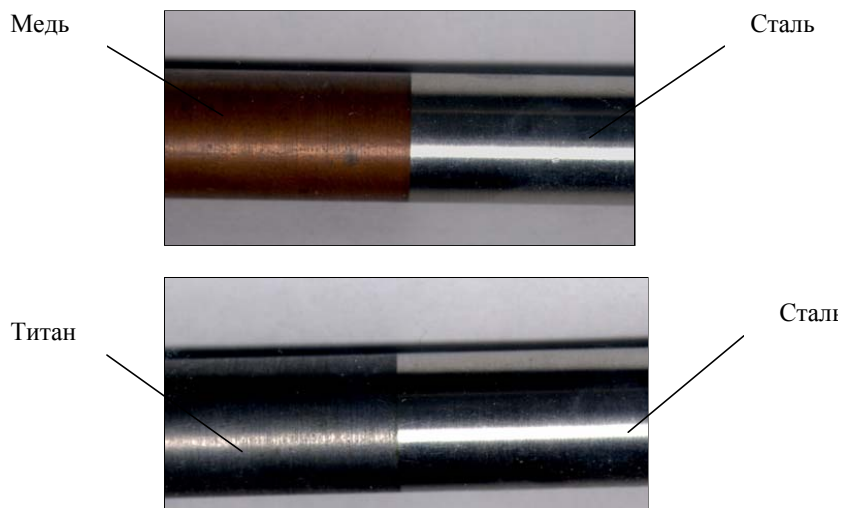


Рис. 24. Сварные соединения, выполненные диффузионной сваркой

Соединения разнородных и композиционных материалов, выполненные сваркой, наиболее перспективны, поскольку дают возможность полностью реализовать уникальные свойства этих материалов. Получение таких соединений – сложная техническая задача, и ее решение возможно с помощью диффузионной сварки, при которой соединение происходит за счет пластической деформации при нагреве свариваемых

поверхностей. На установке диффузионной сварки МДВ-301 (рис. 23) выполняется сварка переходников из различных металлов, используемых при изготовлении экспериментальных устройств, необходимых для проведения внутриреакторных исследований (рис. 24).

В большинстве случаев при изготовлении изделий АЗ ядерных реакторов из-за сложности их конструкции таким способом производится сварка заготовки изделия. После этого с использованием методов механической обработки изготавливается само изделие с обязательным контролем качества сварных соединений. Технические возможности данной установки позволяют получать сварные соединения изделий из различных металлов и сплавов диаметром до 40 мм, длиной до 200 мм.

Контрольные вопросы

1. Способы сварки, используемые при сварке изделий АЗ ядерных реакторов.
2. Основные параметры режимов сварки при изготовлении изделий.
3. Геометрические параметры свариваемых изделий.
4. Особенности аргонодуговой сварки в условиях повышенного давления инертного газа.

Рекомендуемая литература

1. Решетников, Ф.Г. Разработка, производство и эксплуатация тепло-выделяющих элементов энергетических реакторов / Ф.Г. Решетников, И.С. Головнин, Ю.И. Казенов. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – Кн. 2. – 280 с.
2. Григорьянц, А.Г. Лазерная сварка металлов / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов. – М. : Высш. шк., 1988. – 200 с.
3. Табакин, Е.М. Оценка возможности снижения порообразования в сварных соединениях оболочек из дисперсионно-упрочнённых сталей ферритного и мартенситного класса / Е.М. Табакин [и др.] // Сборник трудов НИИАР. – 2004. – Вып. 2. – С. 38–43.
4. Цыканов, В.В. Предупреждение образования пор при сварке капсул малогабаритных радионуклидных источников / В.В. Цыканов, Е.М. Табакин // Сварочное производство. – 1989. – № 5. – С. 33–34.
5. Попенко, В.С. Оборудование для сварки тепловыделяющих элементов / В.С. Попенко [и др.] // Сварка в атомной промышленности и энергетике. Труды НИКИМТ. – М., 2002. – Т. 1. – 243 с.
6. Зинковский, В.И. Качество сварных швов при герметизации трансурановых радионуклидов / В.И. Зинковский, И.К. Шпак // Обзор НИИАР. – М. : ЦНИИАтоминформ, 1989. – 86 с.
7. Байкалов, В.И. Устранение пористости сварных швов малогабаритных изделий дуговым переплавом в инертном газе при повышенном давлении / В.И. Байкалов, Е.М. Табакин // Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства : сб. статей по докладом Всероссийской научно-технической конференции : в 2 ч. – Тольятти, 2006. – Ч. 2. – С. 119–128.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лекция 1. НАЗНАЧЕНИЕ ИЗДЕЛИЙ, УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ИЗДЕЛИЙ АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК.....	4
1.1. Термины и определения.....	4
1.2. Технические характеристики и особенности конструкций изделий активных зон ядерных реакторов.....	4
1.3. Требования к качеству сварных соединений и методы его оценки	9
Лекция 2. ПРИМЕРЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ (СВАРКИ) ИЗДЕЛИЙ. ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ.....	14
2.1. Сварка корпусов источников ионизирующих излучений.....	14
2.2. Сварка других изделий активных зон ядерных реакторов.....	22
Рекомендуемая литература.....	28

Учебное издание

Табакин Евгений Мордухович

**ИЗГОТОВЛЕНИЕ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
МАЛОГАБАРИТНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ
АКТИВНЫХ ЗОН ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК**

Конспект лекций

по дисциплине «Специальные вопросы сварки плавлением»
для студентов, обучающихся в магистратуре по направлению
150600.68 «Материаловедение и технология новых материалов»
по программе 150604 «Сварка и пайка новых металлических
и неметаллических неорганических материалов»

Редактор *Т.Д. Савенкова*

Технический редактор *З.М. Малявина*

Вёрстка: *Л.В. Сызганцева*

Дизайн обложки: *Г.В. Карасева*

Подписано в печать 02.02.2011. Формат 60×84/16.

Печать оперативная. Усл. п. л. 1,9. Уч.-изд. л. 1,7.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-102-10.

Тольяттинский государственный университет
445667, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14