

# СВАРКА ВЗРЫВОМ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО РЕАКТОРА

Э. КАРТОН, М. СТУИВИНГА (TNO «Защита, надежность и безопасность», г. Риджсвик, Нидерланды)

Международный термоядерный экспериментальный реактор — это большое экспериментальное устройство для исследований в области термоядерной энергии, которое будет построено в ближайшие годы во Франции. Экстремальные условия (высокие температуры, предельно большие тепловые нагрузки, тепловая усталость и ядерное излучение) требуют использования специальных материалов и выполнения соединения разнородных материалов. TNO «Защита, надежность и безопасность» занимается разработкой технологии сварки взрывом как альтернативного способа соединения, демонстрирующего высокий потенциал этого способа для соединения деталей реактора.

*Ключевые слова:* сварка взрывом, термоядерная энергия, детали, экспериментальный реактор

Международный термоядерный экспериментальный реактор (МТЭР) — большой международный проект, целью которого является демонстрация возможности использования термоядерной энергии (ядерные реакции аналогичны протекающим на Солнце). Реактор должен быть построен за 10...12 лет во Франции совместными усилиями США, стран Европы, Японии, России, Кореи и Индии [1]. Реактор типа токамак (рис. 1) имеет очень большие размеры по сравнению с ранее созданными ядерными реакторами и состоит из огромного кольцеобразного вакуумного корпуса с максимальным радиусом 6,2 м, минимальным 2 м. Вакуумный корпус, образующий основную защитную оболочку при ядерном облучении, выполнен из двух параллельных стенок из нержавеющей стали толщиной 60 мм (316 L(IG)), образующих полость, заполненную водой.

Внутри вакуумного корпуса будет вырабатываться плазма, в которой протекает ток 15 МА. Из-за очень высокой температуры внутри плазмы (десятки миллионов градусов Цельсия) начинаются термоядерные реакции, которые вырабатывают термоядерную энергию 500 МВт. Термоядерные реакции протекают не непрерывно, а при взрывах, повторяющихся каждые 400 с, т. е. тепловая нагрузка и, следовательно, температура внутри реактора будут колебаться. Более того, предполагается, что плазма в некоторых случаях может смещаться внутри реактора (например, погрешность вертикального смещения), что может вызвать непосредственный контакт между плазмой и материалом первой стенки.

Нержавеющая сталь не способна выдержать даже нормальные (не говоря о больших) тепловые нагрузки (от 0,5 до 20 МВт/м<sup>2</sup> в зависимости от

положения в корпусе) без расплавления и загрязнения плазмы. Поэтому внутренняя стенка вакуумного корпуса (площадь поверхности 850 м<sup>2</sup>) будет покрыта водой, охлаждаемой медными блоками, плакированными слоем бериллия или вольфрама. Хотя горячее изостатическое прессование (диффузионное соединение) и пайка являются основными способами соединения этих хрупких, тугоплавких металлов с медной основой, они имеют такие недостатки, как понижение максимальной допустимой температуры контактной поверхности и продолжительное воздействие высокой температуры на медное основание, понижающее его прочность [2].

TNO «Защита, надежность и безопасность» работает над альтернативными способами соединения разнородных материалов, используя сварку взрывом. Поскольку этот способ позволяет создавать неразъемное соединение между двумя (или

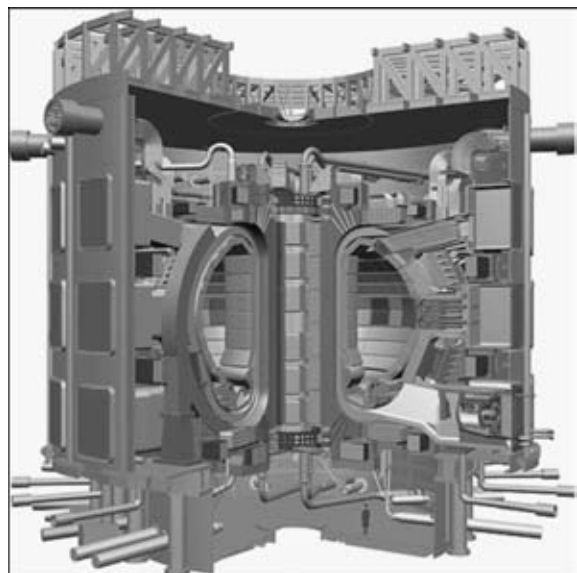


Рис. 1. Поперечный разрез МТЭР (для сравнения внутри фигура человека)



более) разнородными металлами, отличается кратковременностью (микросекунды) и обычно не сопровождается воздействием высокой температуры на металлические детали, он может явиться альтернативным способом изготовления биметаллических деталей для МТЭР.

**Экспериментальные исследования.** Кроме компонентов первой основной стенки, сварные биметаллы можно также использовать и в других узлах МТЭР. ТНО «Защита, надежность и безопасность» работает над двумя такими объектами: пусковой системой верхнего порта (устройство для контроля положения плазмы); трехсторонней опорой внешнего дивертера.

**Соединение меди с медью.** Для размерной стабильности пусковой системы верхнего порта необходимо водяное охлаждение. Для этого использовали две медные пластины толщиной 2 и 6 мм. Пластины толщиной 6 мм подвергли машинной обработке (фрезерованию) таким образом, чтобы в ней находилось несколько каналов для охлаждения. Использование фрезерования вместо сверления позволяет получить более разнообразные поперечные сечения канала и формы. Профрезерованные каналы необходимо временно заполнить легкоплавкими металлами так, чтобы пустотелые каналы не мешали привариванию медной пластины взрывом. После сварки меди с медью в каналах просверливают два отверстия и путем нагрева плакированного металла выплавляют заполнитель из выфрезерованных каналов, что сопровождается незначительными деформациями медной пластины (рис. 2).

**Плакирование нержавеющей стали медью.** Трехсторонняя опора, как и вакуумный корпус, включает заполненные водой камеры из нержавеющей стали SS 316L(IG) с толщиной стенки 60 мм. Поскольку электропроводность нержавеющей стали довольно низкая, предполагается, что в ней может рассеиваться слишком много электромагнитной энергии. Следовательно, ее необходимо плакировать слоем чистой меди толщиной приблизительно 1,5 мм. Поскольку трехсторонняя

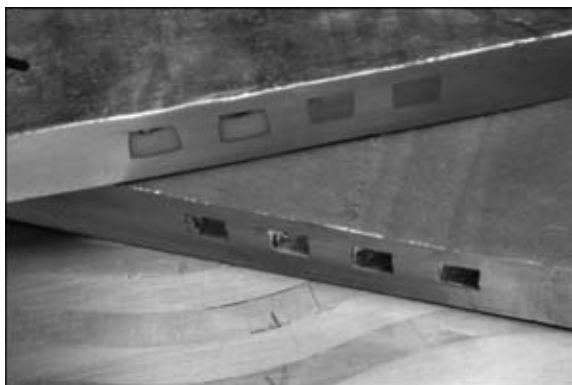


Рис. 2. Фрезерованные пластины с каналами для охлаждения водой

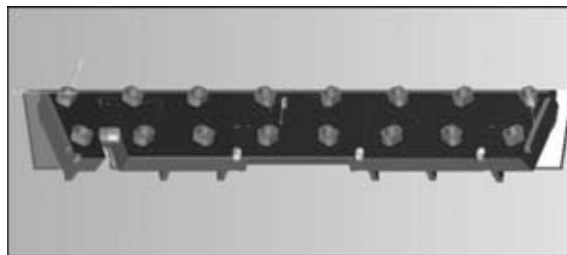


Рис. 3. Объемное изображение участка трехстороннего опорного кольца (диаметр 200 мм) с выступающими укороченными клиньями

опора поддерживает верхний дивертер внутри вакуумного корпуса, она имеет изгиб с радиусом приблизительно 4 м. Сверху из стальной поверхности, которая подлежит плакированию, выступает несколько препятствий в виде усеченных клиньев. Эти клиновидные выступы диаметром 200 мм и высотой 90 мм создают большие трудности при соединении металлов, обычно легко свариваемых взрывом (рис. 3). Очевидно, что из-за взаимодействия детонационных волн, которое здесь наблюдается, обычная схема сварки взрывом не будет обеспечивать хорошие результаты, особенно за клиновидными выступами. Используя эксперименты и компьютерное моделирование процесса детонации вокруг препятствия, можно найти решение задачи плакирования трехсторонней опоры.

**Плакирование меди вольфрамом.** Основная часть первой основной стенки МТЭР будет покрыта бериллием (около 700 м<sup>2</sup>), а остальная — вольфрамом (100 м<sup>2</sup>) или углеродусиленным углеродом (C/C, около 50 м<sup>2</sup>). Поскольку бериллий не только хрупок при комнатной температуре, но и очень токсичен (особенно пыль BeO), в наших экспериментах использовали вольфрам, который также достаточно хрупок при комнатной температуре. На рис. 4 представлена зависимость температуры вязкохрупкого перехода (ТВХП) от толщины вольфрамовой пластины. Несмотря на то что эти данные не вполне адекватны условиям высокоскоростного деформирования при сварке взрывом, они дают некоторое представление о том, каким образом ТВХП зависит от уровня первичной деформации. Очень интересной деталью является наличие резкого спада ТВХП для очень тонких вольфрамовых пластин (фольги). Так, для фольг толщиной менее 0,5 мм ТВХП ниже 200 °С. Такую тонкую вольфрамовую фольгу можно резать при комнатной температуре, не создавая больших трещин в материале, несмотря на то, что фольга отличается большой склонностью к образованию поверхностных трещин из-за слоистой укладки вольфрамовых зерен, сильно удлиненных при прокатке. Эксперименты начали с плакирования медных пластин вольфрамовой фольгой по схеме, использованной ТНО «Защита,

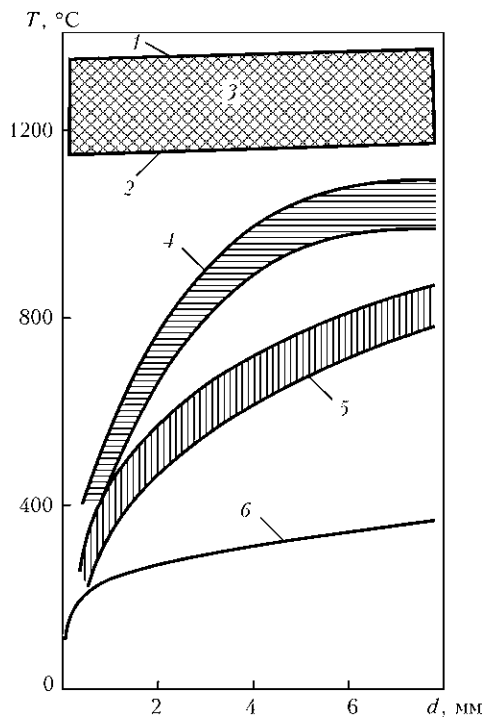


Рис. 4. Температура вязкохрупкого перехода вольфрама для различных толщин пластины [3]: 1 — полная рекристаллизация после 1 ч; 2 — начало рекристаллизации; 3 — диапазон рекристаллизации; 4 — пробивание отверстий; 5 — сгибание; 6 — температура перехода

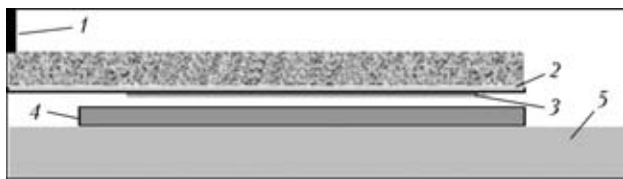


Рис. 5. Схема плакирования взрывом медных пластин вольфрамовой фольгой при комнатной температуре: 1 — детонатор; 2 — метаемая пластина-драйвер; 3 — вольфрамовая фольга; 4 — пластина; 5 — основание

надежность и безопасность» для плакирования фольгой (рис. 5) из нержавеющей стали толщиной 1 мм, ускоряемой метаемой пластиной-драйвером [4]. В данной работе использовали легкоиницируемое взрывчатое вещество (ВВ) Sytamit 1 на основе коммерчески доступного чувствительного нитрида аммония (WasagChemie, Германия). Оно

детонирует приблизительно со скоростью 3 км/с при используемой в данном случае толщине слоя 15 мм.

Вольфрамовую фольгу прикрепляли к пластине-драйверу с помощью двусторонней липкой ленты. Ширина сварочного зазора составляла 2 мм. В некоторых экспериментах за один прием наносили несколько слоев фольги. В этих случаях ширина зазора составляла 0,5...1 мм на каждую фольгу. Эксперименты проводили во взрывной камере при комнатной температуре.

На рис. 6 представлены поперечные разрезы двух образцов, плакированных вольфрамовыми фольгами. На рис. 6, а показана прямая граница раздела одинарной вольфрамовой фольги (300 мкм) с медью 2 мм. Можно предположить, что только образование струи мягкой и пластичной меди позволило реализоваться соединению (вольфрам ведет себя только упруго, поэтому образовалась прямая граница раздела). Тем не менее, на рис. 6, б из-за протравливания вольфрама можно видеть волнообразные границы раздела как между вольфрамовыми фольгами (500 мкм каждая), так и на границе раздела биметалла. На обеих границах вольфрам сильно деформирован в локализованном волнообразующем процессе деформации [5]. Возникновение такой большой пластической деформации вольфрама при комнатной температуре является очень интересным наблюдением. Возможно, огромное сжимающее напряжение в результате соударения металлов позволяет активизироваться механизму деформации, в котором металл нагревается и деформируемый слой оказывается выше своей ТВХП. При больших увеличениях на границе раздела вольфрам-вольфрам наблюдаются даже «карманы» рекристаллизованного литого металла (температура плавления вольфрама выше 3500 °С).

*Плакирование с подогревом.* Поскольку эксперименты по плакированию при комнатной температуре были успешными только для вольфрамовой фольги (< 0,5 мм), проведены также эксперименты по плакированию с подогревом. При предварительном подогреве вольфрама выше зна-

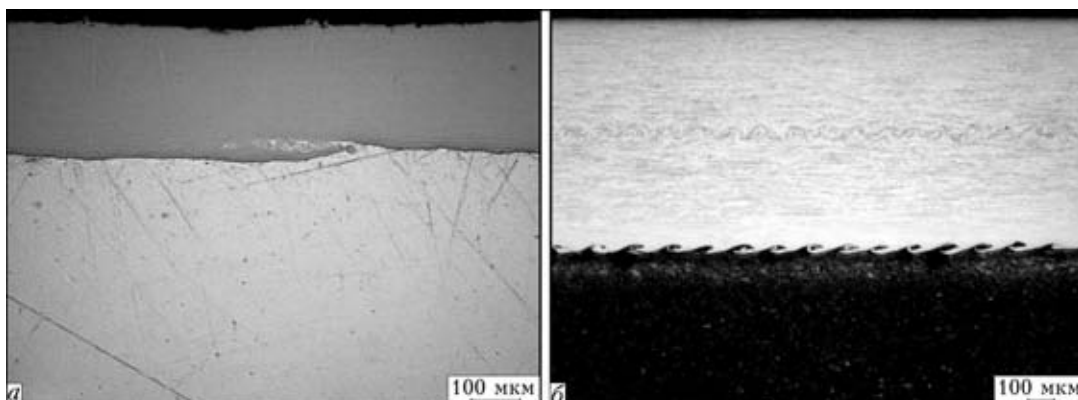


Рис. 6. Микроструктура поперечного сечения однократной (а) и двойной (б) плакировок меди вольфрамовой фольгой



Рис. 7. Схема плакирования взрывом с предварительным подогревом: 1 — нагреватель (1000 Вт); 2 — основание; 3 — детонатор

чения ТВХП его пластичность (а также снижение твердости) может стать достаточной для получения соединений (см. рис. 4). Поскольку ВВ нельзя сильно нагревать (для предотвращения расплавления и тепловой деградации или даже спонтанного взрыва), в экспериментах с подогревом вольфрамовые пластины толщиной 2 мм использовали только в качестве покоейшей основы. Это также позволяет избежать намного менее пластичный толстолистовой вольфрам от воздействия давления и изгиба при метании взрывом. Наилучшие результаты получены при предварительном нагреве вольфрамовых пластин, отнесенных от медного ударника с зарядом ВВ (рис. 7). Вольфрамовая пластина лежит на плите из нержавеющей стали, подсоединенной к проводнику, проходящему сквозь стенку взрывной камеры. Температура подогрева вольфрама измерялась термопарой в процессе нагрева. Когда пластина достигала заданной температуры (350...500 °С), металлический проводник вытягивался из взрывной камеры, в результате чего вольфрамовая пластина перемещалась под медный ударник, таким образом, что детонатор и ВВ оставались при комнатной температуре. Затем инициировался детонатор, и во взрывной камере происходил процесс сварки.

На рис. 8 показана микроструктура шлифа поперечного разреза соединения вольфрама толщиной 2 мм с медью толщиной 2 мм с подогревом до 480 °С. Вновь наблюдается волнообразная граница, демонстрирующая пластичность металла при больших сжимающих (гидродинамических) напряжениях. Биметаллы, полученные сваркой с подогревом, не имели трещин, возможно, потому, что температура вольфрама в процессе сварки была выше его ТВХП. Тем не менее, в некоторых случаях остаточные тепловые напряжения в биметалле создают «in-plane» трещины внутри воль-

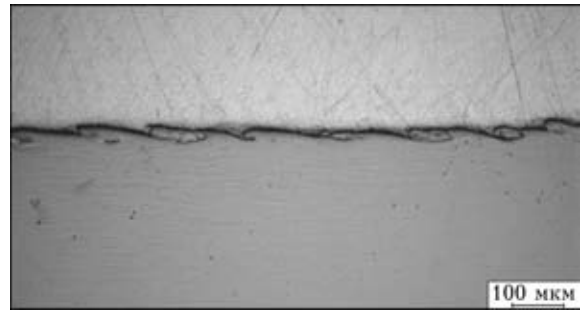


Рис. 8. Микроструктура поперечного сечения наплавки меди на предварительно нагретую вольфрамовую пластину ( $T = 480\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

фрама (теперь уже снова хрупкого) спустя несколько дней после сварки. Эти напряжения возникают вследствие значительных различий коэффициентов теплового расширения вольфрама и меди.

Непосредственно после сварки медь (при комнатной температуре) быстро нагревается от все еще горячей вольфрамовой пластины. Значение эквивалентной температуры, приобретаемой биметаллической пластиной, определяют по известным соотношениям толщин пластин и температур подогрева. При последующем охлаждении до комнатной температуры медь сжимается больше, чем вольфрам, что приводит к возникновению больших тепловых напряжений на границе раздела металлов (до 800 МПа, как было рассчитано с помощью термомеханического компьютерного моделирования). Тем не менее, пластины толщиной 2 мм (вольфрам, подогретый до 480 °С) оставались свободны от трещин. Дальнейшие анализ и испытания материала будут проводиться Nuclear Research Group (NRG, Petten, Netherlands).

*Авторы выражают благодарность Фризо Шмальцу и Ян Ван дер Лаану из NRG, г. Петтен, Нидерланды, за плодотворные дискуссии и советы.*

1. ITER web-site on <http://www.ITER.org>
2. Merola M. et al. // J. Nucl. Mater. — 2002. — **307–311**. — P. 1524–1532.
3. Plansee W-folder 2006, Austria.
4. Carton E. P. AIP shock compression of condensed matter. — 2003. — P. 1110–1113.
5. Carton E. P. // Mater. Sci. Forum. — 2004. — **465–466**. — P. 219–224.

The International Thermo-nuclear Experimental Reactor (ITER) is a huge experimental facility for the fusion energy research field to be built in the coming years in France. The extreme conditions (high temperatures, extremely large heat loads, thermal fatigue, and nuclear radiation) require very special materials and dissimilar bonding of metals to be used. TNO develops the explosive cladding technology (as an alternative bonding mechanism) in order to demonstrate the potential of this bonding route for ITER components.

Поступила в редакцию 03.09.2009