

## ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СРЕДНЕРАЗМЕРНЫХ МАКЕТОВ ПАНЕЛЕЙ ПОРТ-ЛИМИТЕРА ИТЭР МЕТОДОМ ПЕЧНОЙ ПАЙКИ

*К.С. Складнов, Ю.С. Стребков (НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала), И.Д. Махин,  
В.В. Николаев, Ю.Л. Яровинский (ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия»  
им. С.П. Королева), В.В. Шелин (ЦНИИТМАШ)*

В статье изложены результаты опытной разработки технологии изготовления стальной защитной части панели порт-лимитера термоядерного реактора ИТЭР методом печной пайки. Описаны этапы отработки технологии, методы изготовления деталей, подготовки поверхностей под пайку, подходы к контролю качества изделия. В соответствии с результатами опытных работ этот метод может быть рекомендован для изготовления заготовок стальных частей панелей порт-лимитера реактора ИТЭР.

ADJUSTMENT OF TECHNOLOGY FOR ITER PORT-LIMITER PANEL MOCK-UP MANUFACTURE USING FURNACE BRAZING. K.S. SKLADNOV, Yu. S. STREBKOV, I.D. MAKHIN, V.V. NIKOLAEV, Yu.L. YAROVINSKIY, V.V. SHELIN. The results of the experimental technological works on the development of the stainless steel ITER port-limiter panel shielding section manufacture by the furnace brazing are presented. The stages of the technology development, methods of the detail manufacture, surface preparation for the brazing and approaches to the product quality inspection are described. In accordance with the results of the experimental works this method could be recommended for the manufacture of blanks of the stainless steel ITER port-limiter panel.

НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала в течение последних лет совместно с ЗАО ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королева продолжал выполнение работ в рамках НИР и ОКР целевой программы «Международный термоядерный реактор ИТЭР» на 2002—2005 гг. Конкретные экспериментальные работы были сосредоточены на дальнейшем развитии опытной технологии печной пайки применительно к изготовлению массивных стальных защитных частей панелей порт-лимитера со встроенными пространственными трубопроводами на примере изготовления макетов, половинных по высоте по сравнению с натурным изделием. Отработку технологии проводили в несколько стадий. На первой стадии изготавливали и исследовали механические свойства паяных соединений материалов, используемых в конструкции порт-лимитера. На второй стадии изготавливали и исследовали малоразмерные модели характерных фрагментов защитной части панели. На третьем этапе изготовлены и испытаны макеты паяных защитных частей панели порт-лимитера со встроенными змеевиковыми трубопроводами. При этом все размеры макетов, кроме высоты, соответствовали натурным размерам штатного изделия. Высота макетов составляла половину от натурной.

С целью исследований механических свойств паяных соединений из аустенитной стали типа 12X18H10T, предполагаемой к использованию в конструкции защитной части панели, были изготовлены стандартные образцы для механических испытаний. Образцы вырезали из малоразмерных моделей 90×90×50 мм (рис. 1), предназначенных также для отработки режимов пайки.



Рис. 1. Модель 90×90×50 мм

Малоразмерные модели изготавливали из двух плит, стянутых центральной ниобиевой шпилькой. В качестве припоя использовали фольгу толщиной 0,1 мм из сплава ПМ-17 (основа — медь). Характерная температура пайки аустенитной стали таким припоем составляет примерно 1050 °С. Так как основа припоя —



Рис. 2. Контейнер с моделью 90×90 мм

медь, стальные поверхности деталей покрывали никелем с целью предотвращения воздействия меди на сталь при пайке. Пайку проводили в жестком стальном контейнере (рис. 2) при непрерывной откачке его внутреннего объема с поддержанием вакуума на уровне  $10^{-2}$  мм рт. ст.

При температуре пайки за счет разности коэффициентов термического расширения материалов шпильки и деталей модели последние испытывали сжатие при давлении до 15 кГс/см<sup>2</sup>.

При температуре пайки за счет разности коэффициентов термического расширения материалов шпильки и деталей модели последние испытывали сжатие при давлении до 15 кГс/см<sup>2</sup>.

Механические испытания образцов, проведенные при комнатной температуре, показали, что прочность паяных соединений находилась в диапазоне 48—50 кГс/см<sup>2</sup>, что близко к прочности основного металла.



Рис. 3. Полупанели и трубопровод модели 200×200 мм

Опробование технологии пайки панели со встроенным трубопроводом проводили на второй стадии работ. При этом изготавливали модели размером 200×200×50 мм. Каждая модель состояла из двух стальных полупанелей с радиусными пазами и стального трубопровода диаметром 30 мм и толщиной стенки 1 мм (рис. 3).

В отличие от пайки моделей 90×90 мм пайку моделей 200×200 мм

выполняли в прижимно-фиксирующей оснастке, представляющей собой две стальные нажимные плиты, между которыми размещали детали модели, стягиваемые ниобиевой шпилькой (рис. 4).

Пайку моделей 200×200 мм проводили в жестком непрерывно вакуумируемом стальном контейнере (рис. 5). При этом трубопроводы моделей заполняли аргоном.

После пайки и извлечения моделей 200×200 мм из контейнера они подвергались ультразвуковому контролю, контролю с использованием тепловизора и контролю на плотность трубопроводов. Модель 200×200 мм после пайки представлена на рис. 6. Результаты тепловизионного контроля представлены на рис. 7.

Опыт пайки малоразмерных моделей показал, что с ростом габаритов, а следовательно, и массы изделия возникают проблемы по поддержанию плавного изменения температуры всей сборки деталей в оснастке как при нагреве, так и при остывании. С целью уменьшения температурных градиентов в конструкции при пайке макетов решено было отказаться от пайки в среде вакуума, а контейнер заполнить аргоном.

На третьей стадии экспериментальной технологической отработки изготавливали два макета стальной защитной части панели со встроенными змеевиковыми трубопроводами. Габаритные размеры макетов составляли 1000×500×52 мм. При этом



Рис. 4. Модель 200×200 мм в сборе с оснасткой



Рис. 5. Контейнер с моделью 200×200 мм



Рис. 6. Модель 200x200 мм после пайки

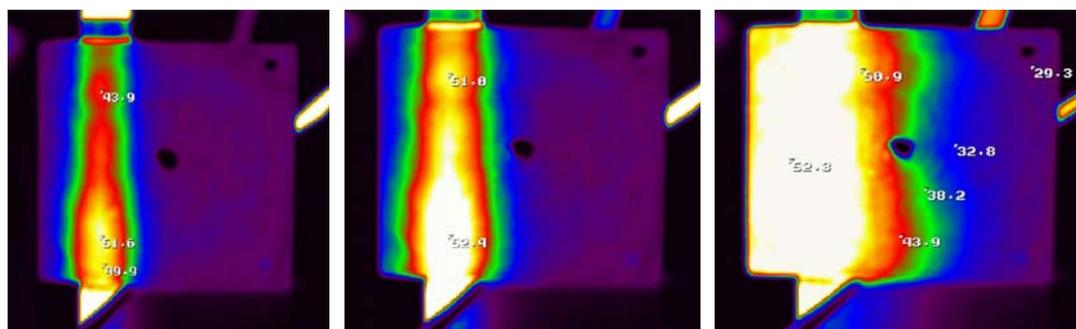


Рис. 7. Результаты тепловизионного контроля модели 200x200 мм

каждый макет состоял из двух полупанелей с фрезерованными змеевиковыми радиусными пазами и змеевикового трубопровода диаметром 30 мм и толщиной стенки 1 мм. Так как первый макет паяли припоем ПМ-17, поверхности деталей покрывали никелем. Пайку макета выполняли в контейнере, заполненном аргоном, в прижимно-фиксирующей оснастке, подобной оснастке модели 200×200 мм. Количество ниобиевых шпилек предварительно рассчитывали, исходя из необходимости сжатия полупанелей макета давлением до 15 кГс/см<sup>2</sup> при температуре пайки. Контроль температуры макета и контейнера осуществляли с помощью встроенных в конструкции термодатчиков. Макет паялся в индукционной печи. При пайке первого макета для выравнивания температуры с целью гарантированного расплавления припоя во всем изделии потребовалось значительное время, так как тепловая инерционность сборки массой 700 кг оказалась весьма высокой. По-видимому, слой никелевого защитного покрытия на стальных деталях за это время был местами растворен, а медная составляющая припоя начала активно взаимодействовать с аустенитной сталью, и в модели образовались трещины.

Проанализировав опыт пайки первой модели, было принято решение заменить припой ПМ-17 для пайки второй модели припоем Г70НХ, который отличается более высокой температурой пайки — до 1200 °С, но не склонен к провоцированию межкристаллитного растрескивания аустенитной стали даже без защитных покрытий. При этом детали, подвергаемые пайке припоем Г70НХ, не требуют никелирования. Паяемые поверхности электрополируются. Прежде пайки этим припоем второго макета также были изготовлены малоразмерные модели 90×90 и 200×200 мм с целью определения механических свойств паяных соединений и режимов пайки. Прочность полученных соединений находилась на уровне 50 кГс/см<sup>2</sup>.

На рис. 8—13 представлены фотографии второго макета 1000×500×52 мм, выполненные на разных этапах изготовления.



Рис. 8. Полупанель модели

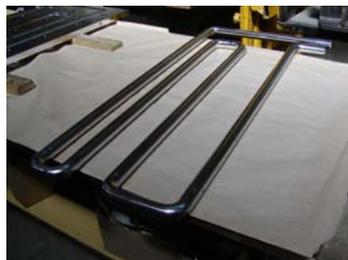


Рис. 9. Змеевиковый трубопровод модели



Рис. 10. Модель в оснастке до пайки



Рис. 11. Контейнер с моделью



Рис. 12. Модель после пайки и УЗК



Рис. 13. Испытания модели на плотность

После извлечения остывшего контейнера из печи он был разрезан, а ниобиевый крепеж снят. Спаянная модель защитной части была подвергнута ультразвуковому



Константин Сергеевич Складнов, начальник группы, награжден медалями «850 лет Москвы», «Ветеран атомной промышленности и энергетики»



Юрий Сергеевич Стребков, начальник отдела, ветеран атомной энергетики и промышленности, ветеран НИКИЭТ



Игорь Дмитриевич Махин, главный сварщик, заслуженный специалист НПО «Энергия», награжден медалью «40 лет космической эры»



Виктор Викторович Николаев, кандидат т.н., ведущий специалист-сварщик, ветеран труда СССР, ветеран труда РКК «Энергия», заслуженный ветеран НПО «Энергия», заслуженный специалист РКК «Энергия»

контролю (УЗК), а затем контролю на плотность. УЗК показал высокое качество пайки практически по всей поверхности, кроме граничных периферийных участков, где оказалось недостаточно усилий для сжатия полупанелей из-за удаленности стягивающих ниобиевых шпилек. С целью устранения в дальнейшем этого недочета предусматривается размещать дополнительные стягивающие шпильки в пределах дополнительного припуска вдоль всего периметра конструкции защитной части.

В заключение следует подчеркнуть, что до настоящего момента в промышленности опыта пайки таких крупногабаритных и массивных стальных конструкций с разветвленными внутренними каналами, какими являются панели порт-лимитера, не было. В связи с этим полученные практические результаты выполненных работ представляются исключительно ценными. В целом по результатам выполненной экспериментальной технологической работы получены данные, позволяющие разработчикам сделать заключение о пригодности метода печной пайки для изготовления панелей порт-лимитера ИТЭР.



Юрий Лазаревич Яровинский, кандидат т.н., ведущий специалист-сварщик, лауреат премии Совета Министров СССР, заслуженный машиностроитель РФ, ветеран труда СССР, ветеран труда НПО «Энергия», заслуженный специалист НПО «Энергия», почетный работник корпорации РКК «Энергия», награжден медалями «За трудовое отличие», «850 лет Москвы», «50 лет РКК «Энергия», «90 лет со дня рождения С.П. Королева»



Вячеслав Викторович Шелин, бывший главный технолог, ныне ведущий специалист-технолог, ветеран труда НПО «Энергия», заслуженный специалист НПО «Энергия», награжден медалями ВДНХ, «Ветеран труда СССР», «70 лет С.П. Королеву»

Статья поступила в редакцию 20 апреля 2005 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, вып. 3, с. 51—55.