

УДК 621.039.634

ТЕХНОЛОГИЯ ВАКУУМНОЙ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ ОБЛИЦОВКИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

П.Ю. Пискарев¹, А.А. Герваш¹, А.Ю. Огурский¹, Д.А. Глазунов¹, С.В. Бобров¹, И.В. Мазуль¹, Р.В. Рулев¹,
Е.В. Окунева¹, В.В. Рузанов¹, Д.В. Лянзберг¹, А.Б. Путрик², М.А. Пантелеев¹

¹АО «НИИЭФА» им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург, Россия

²Частное учреждение «Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия

Рассмотрены ключевые особенности технологии присоединения защитной облицовки для высоконагруженных панелей первой стенки ИТЭР, поставляемых РФ. Для достижения равномерного нагрева зоны пайки, обеспечения требуемых свойств дисперсионно-твердеющего материала подложки (CuCrZr) и сохранения целостности биметаллических соединений многослойной структуры потребовались доработка и оптимизация режимов индукционного нагрева. Разработанные вакуумная индукционная печь, специальная оснастка и приспособления позволили достичь высокой повторяемости качества паяных соединений. Технология вакуумной индукционной пайки бериллиевой облицовки квалифицирована по правилам Международной организации ИТЭР, изготовлен и испытан полномасштабный прототип. Проведены первые успешные опытные работы по пайке данным методом вольфрамовой облицовки.

Ключевые слова: панели первой стенки, защитная облицовка, бериллий, вольфрам, вакуумная индукционная пайка, аморфный припой, тепловые испытания.

VACUUM INDUCTION BRAZING TECHNOLOGY OF ITER ENHANCED HEAT-FLUX FIRST WALL PANNELS ARMOUR MATERIAL

P.Yu. Piskarev¹, A.A. Gervash¹, A.Yu. Ogursky¹, D.A. Glazunov¹, S.V. Bobrov¹, I.V. Mazul¹, R.V. Rulev¹,
E.V. Okuneva¹, V.V. Ruzanov¹, D.V. Lyanzberg¹, A.B. Putrik², M.A. Panteleev¹

¹JSC «NIEFA» (Efremov Institute), Saint-Petersburg, Russia

²Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

The key features of armour material joining technology for ITER Enhanced heat-flux First Wall panels, supplied by the Russian Federation, are considered. To achieve uniform heating of the brazing zone, ensure the required properties of the precipitation-hardening heat-sink material (CuCrZr) and maintain the integrity of the bimetallic joints of the multilayer structure, it was necessary to refine and optimize the induction heating parameters. The developed vacuum induction furnace, special equipment and jigs made it possible to achieve high repeatability of the quality of brazed joints. The vacuum induction brazing technology for beryllium armour has been qualified according to the rules of the International Organization ITER, and a full-scale prototype has been manufactured and tested. The first successful experimental work on brazing of tungsten armour using this method was carried out.

Key words: first wall panels, armour material, beryllium, tungsten, vacuum induction brazing, amorphous brazing filler, high heat flux testing.

DOI: 10.21517/0202-3822-2024-47-1-122-132

ВВЕДЕНИЕ

Международный термоядерный экспериментальный реактор (ИТЭР), сооружающийся в настоящее время во Франции, является сложнейшей с инженерной точки зрения установкой. Большинство систем реактора работают на пределе технических возможностей, в условиях сильных многокомпонентных нагрузок. В частности, все внутрикамерные компоненты (ВКК) являются самыми энергонапряжёнными и в процессе работы реактора подвергаются воздействию высоких тепловых нагрузок (плотность мощности до 20 МВт/м²), объёмных электромагнитных сил, жёсткого нейтронного излучения, облучения плазмой и ускоренными атомами.

Вклад России в проект ИТЭР составляет ~9% от стоимости сооружения реактора и заключается в поставке высокотехнологичного оборудования и систем реактора. Соглашение о поставке ВКК ИТЭР, подписанное между Международной организацией ИТЭР (МО ИТЭР) и домашним агентством РФ ИТЭР, подразумевает изготовление в том числе 179 высоконагруженных панелей первой стенки (ППС), включающих около 30 модификаций конструкции (рис. 1).

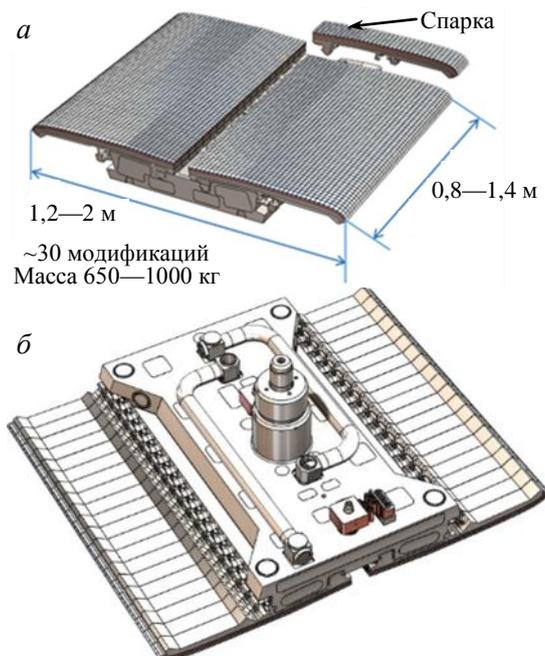


Рис. 1. Общий вид ППС ИТЭР: а — вид со стороны бериллиевой облицовки; б — с тыльной стороны

Каждая ППС, изготавливаемая в РФ, содержит комплект обращённых к плазме элементов (ОПЭ), объединённых в спарки, с высокоинтенсивным охлаждением и многослойной структурой из разнородных металлов (рис. 2). Каждый ОПЭ ППС состоит из основания, выполненного из нержавеющей стали (316L(N)), и приваренной лазерной сваркой биметаллической (CuCrZr/316L(N)) крышки, имеющей диффузионно приваренный бронзовый (CuCrZr) теплоотводящий слой, на который напаяна защитная облицовка из бериллия. В РФ должно быть изготовлено более 6000 штук ОПЭ ППС и припаяно около 300 000 штук плиток облицовки.

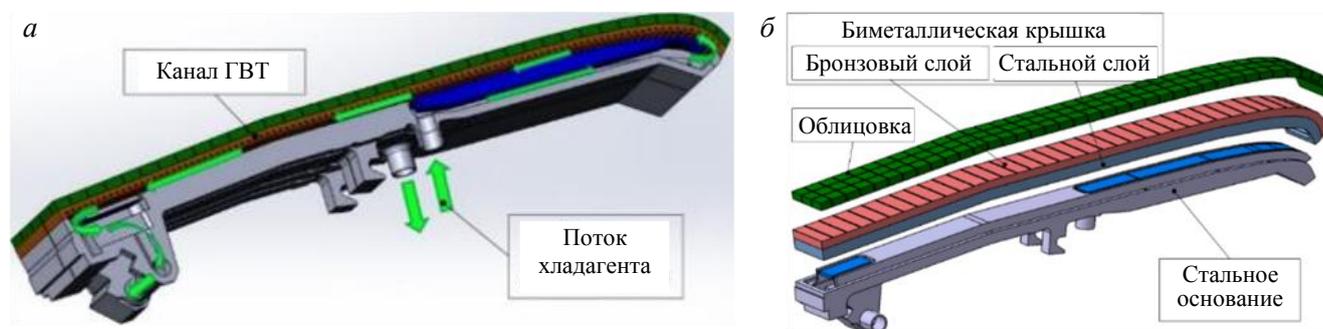


Рис. 2. ОПЭ ППС: *а* — схема подачи воды в спарке из двух ОПЭ; *б* — состав ОПЭ

В ИТЭР технологии создания неразъёмных соединений разнородных металлов (пайка, диффузионная сварка, сварка взрывом, вакуумная наплавка) в многослойной структуре ОПЭ, которые не могут быть аттестованы сторонней специализированной организацией, принято считать критическими технологиями. При отсутствии нормативной базы стандартов, регламентирующих заданные критерии качества (критерии уровня дефектов), в проекте ИТЭР принят подход прохождения квалификации критических технологий изготовления.

До начала выполнения программы квалификации технологии присоединения облицовки потребовалось решить ряд технических проблем и разработать оптимальный режим индукционной пайки для достижения равномерного нагрева зоны пайки, обеспечения требуемых свойств дисперсионно-твердеющего материала подложки (CuCrZr) и сохранения целостности биметаллических соединений многослойной структуры. Также потребовалось разработать набор специальных приспособлений и оснастки.

В данной статье представлены основные результаты разработки и прохождения квалификации технологии вакуумной индукционной пайки облицовки высоконагруженных ППС ИТЭР.

РЕЖИМ ИНДУКЦИОННОЙ ПАЙКИ

Пайка бериллиевой облицовки ОПЭ ППС осуществляется в АО «НИИЭФА» в вакуумной индукционной печи стенда обработки режимов быстрой пайки (СОРБП). Для пайки используется аморфный припой СТЕМЕТ® марки 1101м в виде тонкой (50 мкм) фольги [1], разработанный НИЯУ МИФИ. Припой нарезается на пластинки необходимой длины и размещается между бронзовым слоем и облицовочной плиткой. Готовая к пайке сборка фиксируется в специальной оснастке и помещается внутрь вакуумной камеры печи СОРБП. Операция пайки выполняется в вакууме с остаточным давлением около $5 \cdot 10^{-3}$ Па с использованием высокоскоростного нагрева зоны пайки индукционными токами высокой частоты (50 кГц). Для измерения температуры в зоне пайки и управления нагревом предварительно на боковые поверхности бронзового слоя ОПЭ ультразвуковой сваркой привариваются термопары.

Главная особенность пайки бериллиевой облицовки ОПЭ ППС заключается в применении высокой скорости нагрева зоны пайки (в диапазоне 520—680 °С скорость нагрева $\sim 1,5$ — $1,8$ °С/с) и последующего быстрого охлаждения за счёт излучения и отвода тепла менее нагретыми элементами конструкции. Это обусловлено необходимостью сохранения параметров механической прочности предварительно уп-

рочнённой бронзы CuCrZr. Термограмма, представляющая собой среднее значение температуры с указанных ранее термопар, показана на рис. 3.

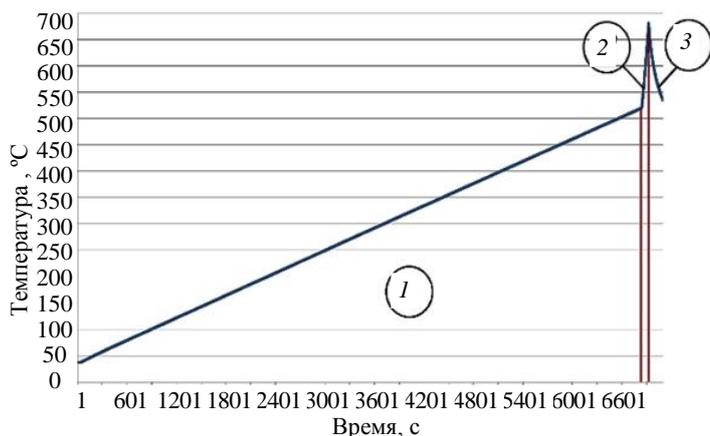


Рис. 3. Температурная кривая процесса пайки: 1 — медленный предварительный нагрев до 520 °С; 2 — быстрый нагрев до 680 °С; 3 — естественное охлаждение в вакууме

«перестаривания» увеличивается с ростом температуры, начиная с 500 °С скорость коагуляции возрастает значительно. Уменьшение максимальной температуры и уменьшение времени нахождения в области температуры ≥ 500 °С (например, увеличением скорости нагрева) приводит к увеличению достигаемой прочности бронзы. На отдельных образцах удавалось достичь значений $\sigma_B = 340$ МПа.

В процессе отработки технологии на малых макетах ОПЭ выявлены дефекты, представляющие собой нарушение целостности (трещина) биметаллического соединения CuCrZr/316L(N) в угловых зонах макетов (рис. 4), возникающие после пайки [2].

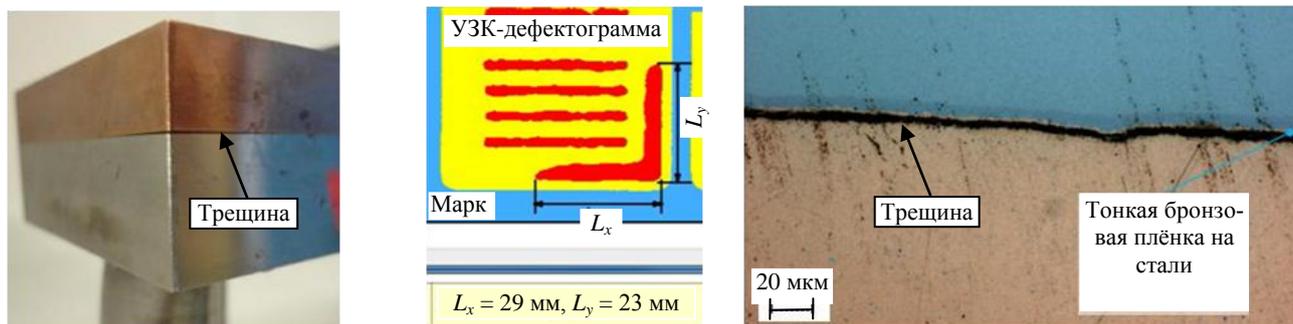


Рис. 4. Трещина в зоне биметаллического соединения CuCrZr/316L(N) в макете ОПЭ

В ходе анализа режима пайки установлено, что характер нагрузок в макете обусловлен быстрой скоростью нагрева и охлаждения [3]. Как следствие, образуется градиент температуры и возникают изгибные напряжения в углах макета в зоне биметаллического соединения (рис. 5). С учётом выявленных особенностей биметаллического соединения [2, 3] исследуемые участки макета становятся «слабым местом» в процессе изготовления.

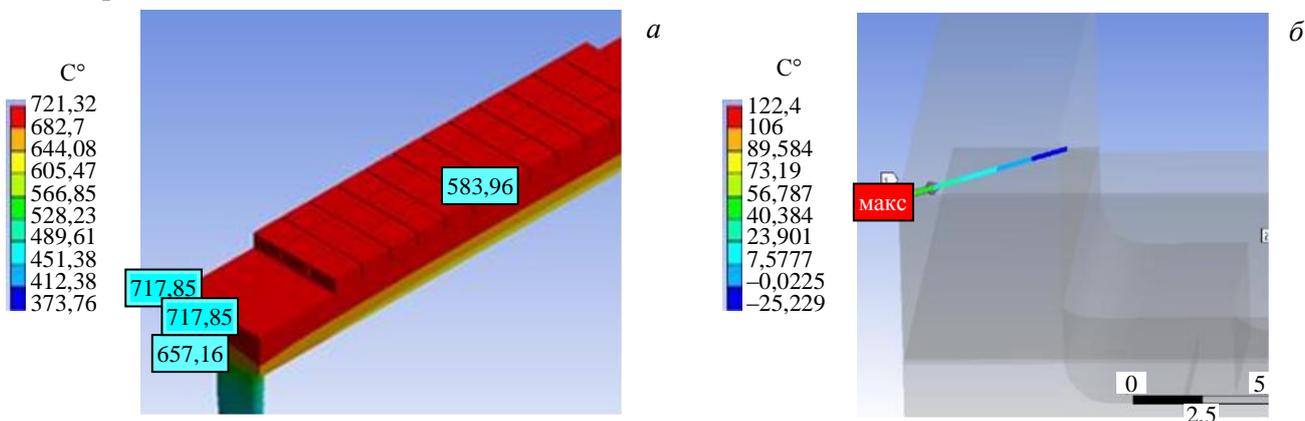


Рис. 5. Результаты расчёта напряжённо-деформированного состояния макета ОПЭ в процессе пайки: а — распределение температуры при завершении нагрева (макс. 721 °С); б — изгиб по краю макета (переход от растягивающих напряжений к сжимающим)

С целью снижения нагрузок на биметаллическое соединение в углах макета в процессе вакуумной индукционной пайки выполнена оптимизация параметров:

- уменьшение максимальной скорости нагрева до 0,8—1,0 °С/с с внесением дополнительной выдержки при температуре перед стартом фазы быстрого нагрева;
- корректировка положения индуктора относительно изделия;
- оптимизация толщины сопрягаемых материалов.

Указанные решения привели к уменьшению значения температурного градиента в макете ОПЭ, что позволило снизить напряжения в углах макета и полностью исключить случаи образования трещин. Прочность бронзы после пайки достигала значений ≥ 300 МПа. Указанный способ термической обработки CuCrZr запатентован в виде изобретения [4].

ОБОРУДОВАНИЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ И ОСНАСТКА

Точность размеров, формы и взаимного положения поверхностей бериллиевой облицовки ОПЭ ППС зависит от точности исходных деталей и надёжности фиксации бериллиевых плиток во время пайки. Для сохранения положения каждой плитки в процессе цикла пайки разработана специальная фиксирующая оснастка, с заданным усилием прижимающая плитку к бронзовой поверхности ОПЭ [5]. Усилие прижима также обеспечивает сохранение величины капиллярного зазора в зоне пайки, что позволяет добиться сплошного паяного соединения. Для обеспечения свободного перемещения фиксирующей оснастки вместе с ОПЭ в процессе его теплового расширения оснастка состоит из отдельных блоков, закреплённых относительно основания ОПЭ (рис. 6).



Рис. 6. Общий вид прижимных блоков фиксирующей оснастки

Каждый блок фиксирующей оснастки состоит из одной либо двух самоустанавливающихся трёхточечных опор, прижимающих бериллиевые плитки. Для регулировки силы прижима используется винт, сжимающий пружину из жаропрочного сплава, усилие от которой передаётся цилиндрическим толкателем на трёхточечную опору. Для снижения нагрева пружин в процессе пайки в конструкции блока используется поперечная планка, экранирующая излучение от горячих плиток, в свою очередь относительно длинный цилиндрический толкатель с малым поперечным сечением ограничивает теплопередачу от плиток к пружине. Прижимные блоки относительно ОПЭ зафиксированы тонкой стальной лентой. Лента не нагревается индуктором, так как её толщина составляет меньше толщины скин-слоя для используемого высокочастотного нагрева (50 кГц). Для подтверждения обеспечения требуемого усилия прижима в условиях нагрева проведены испытания прижимного блока (рис. 7).

Определено, что при ожидаемых условиях нагрева прижимные блоки обеспечивают стабильное усилие не менее 40 Н на каждую плитку. На конструкцию прижимного блока в нескольких модификациях получены патенты на полезную модель [6, 7].

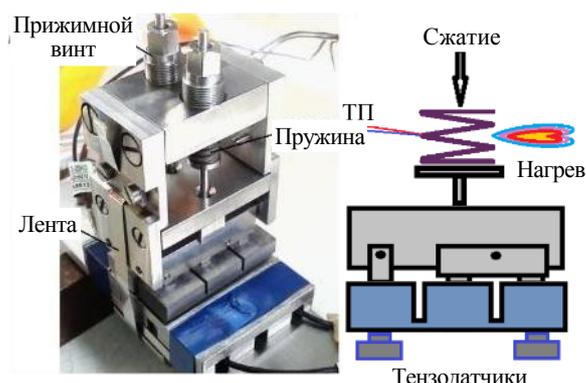


Рис. 7. Схема испытаний прижимного блока

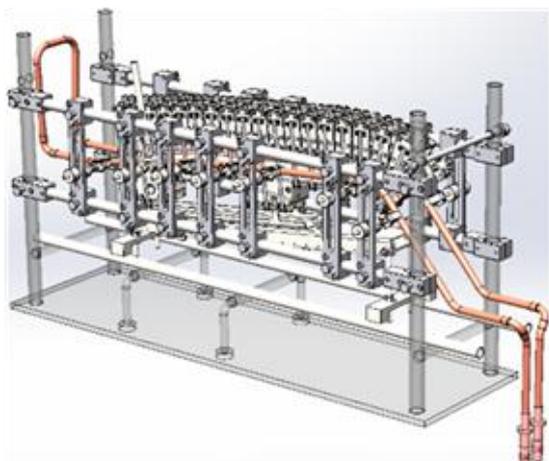


Рис. 8. Оснастка для регулировки взаимного положения индуктор—изделие

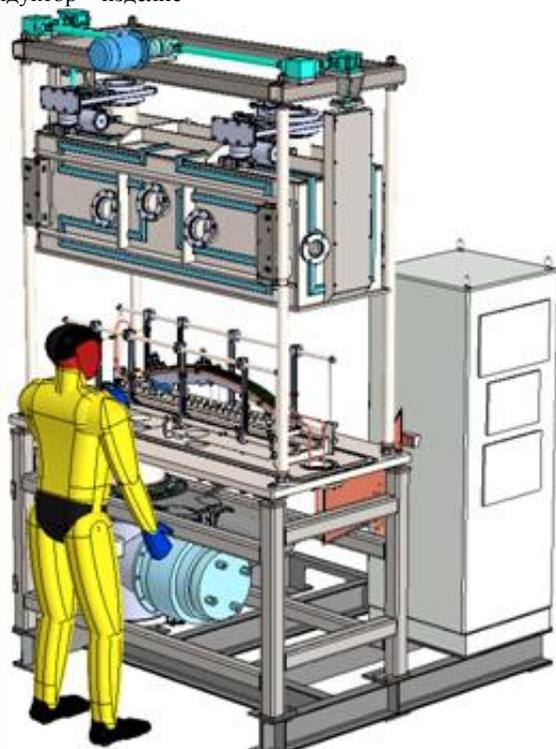


Рис. 9. Конструкция вакуумной индукционной печи для серийной пайки ОПЭ ППС

«НИИЭФА» методике [9] с использованием роботизированного ультразвукового контроля (УЗК) (рис. 10). Согласно утверждённой процедуре максимальный разрешённый размер дефекта не должен



Рис. 10. Оборудование для контроля и испытаний паяного соединения: *а* — роботизированный комплекс УЗК; *б* — стенд «Цефей-М» для тепловых испытаний

Для обеспечения высокого качества паяного соединения вдоль всей длины ОПЭ требовалось обеспечить равномерный и стабильный нагрев всей зоны пайки. При этом ОПЭ ППС имеют переменную вдоль изделия площадь поперечного сечения, т.е. объёмную теплоёмкость. Подбором оптимальных параметров формы индуктора, глубины погружения детали в индуктор и режима нагрева удалось достичь равномерность температуры в зоне пайки в диапазоне $\pm 3\%$. Для регулировки взаимного положения индуктор—изделие разработана специальная оснастка (рис. 8). Способ вакуумной индукционной пайки, включающий применение описанной специальной оснастки, запатентован в виде изобретения [8].

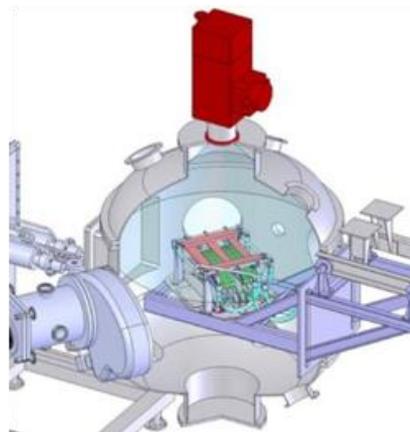
По итогам опытных работ на вакуумной печи СОРБП разработана новая вакуумная индукционная печь, предназначенная для серийной пайки ОПЭ ППС (рис. 9). На основании данного оборудования в АО «НИИЭФА» создаётся участок пайки облицовки ППС ИТЭР.

КВАЛИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ПАЙКИ

Перед началом изготовления полномасштабного прототипа каждая критическая технология изготовления должна быть квалифицирована в соответствии с утверждённой МО ИТЭР программой. Программа квалификации технологии пайки включает в себя изготовление, неразрушающий контроль и испытания серии макетов.

Главный критерий работоспособности паяного соединения заключается в обеспечении высокого качества теплового контакта между защитной облицовкой и бронзовым теплоотводящим слоем. Наличие дефектов в паяном соединении может привести к локальным перегревам облицовки и последующей деградации соединения.

Контроль качества паяного соединения осуществляется по специально разработанной специалистами АО



превышать 4,0 мм. Для проверки работоспособности ОПЭ ППС в условиях тепловых нагрузок в АО «НИИЭФА» проводятся термоциклические испытания [10]. ОПЭ ППС, подключённые к системе подачи воды, помещают внутрь вакуумной камеры (рис. 10), где сканирующим электронным пучком создаётся циклическая поверхностная тепловая нагрузка. Работоспособность облицовки в процессе испытаний контролируется по термоотклику плиток с использованием пирометров и тепловизора.

В рамках программы квалификации изготовлено, проконтролировано и испытано 10 макетов ОПЭ ППС с бериллиевой облицовкой. На рис. 11 для примера показаны фотографии общего вида двух макетов и результаты УЗК паяного соединения. На макете, который показан на рис. 11, б, в паяном соединении присутствует проходной дефект размером 2,0×1,5 мм.

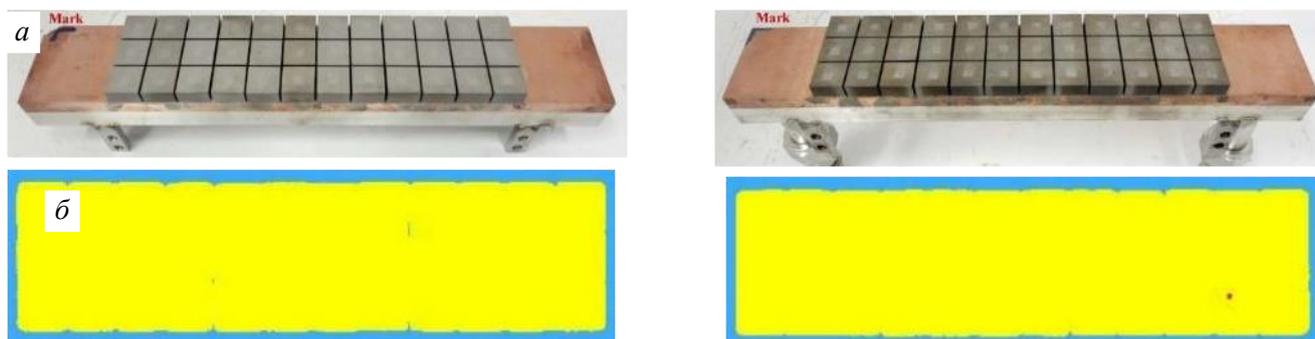


Рис. 11. Общий вид квалификационных макетов (а) и результаты УЗК паяного соединения (б)

Представленные два макета успешно прошли испытания при плотности поглощённой мощности 4,7 МВт/м² в течение 15 000 циклов нагрева/охлаждения. Максимальная температура облицовки не превысила 630 °С. На рис. 12 показаны тепловизионные изображения и графики распределения температуры на финальном 15 000-м цикле нагружения. Дефект в паяном соединении не повлиял на результаты испытаний.

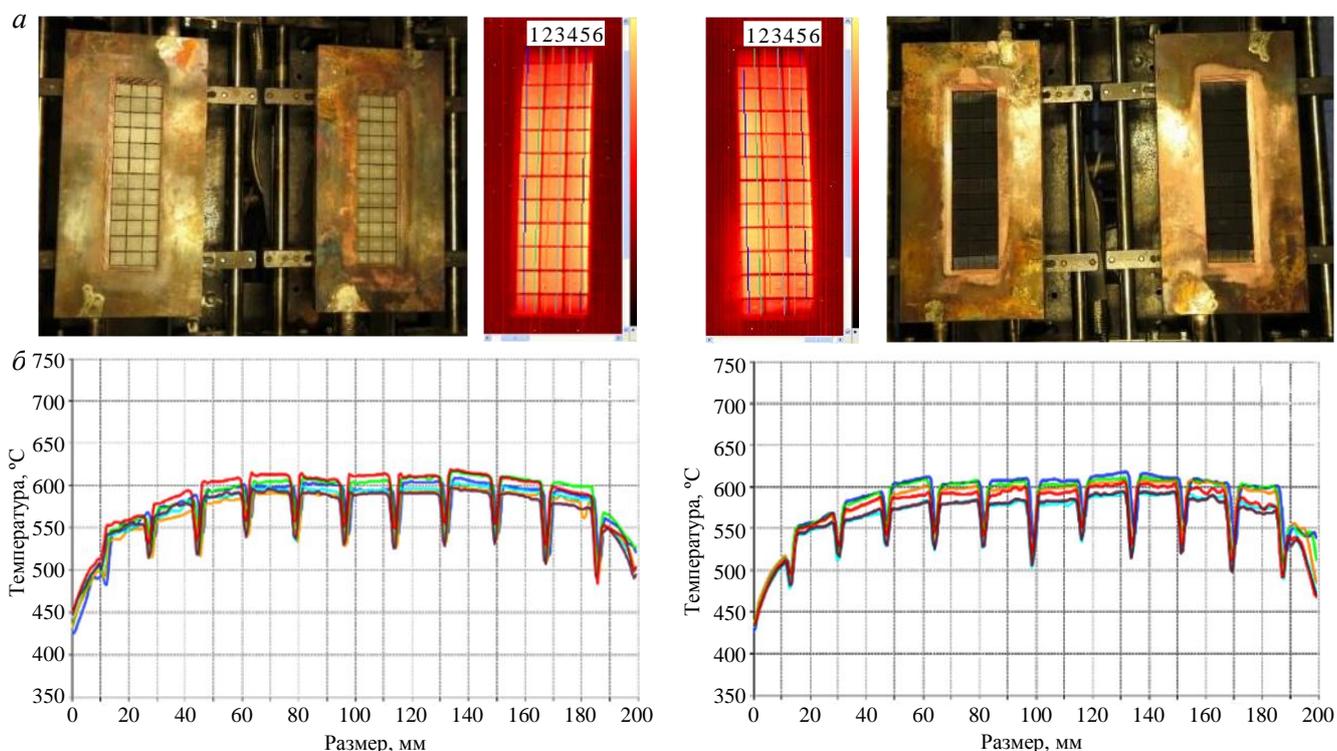


Рис. 12. Тепловые испытания макетов ОПЭ: а — фотографии макетов до (слева) и после 15 000 циклов (справа) и тепловизионные изображения на 15 000-м цикле нагружения (посередине); б — графики распределения температуры поверхности в точках линий 1 (—), 2 (—), 3 (—), 4 (—), 5 (—), 6 (—), показанных на тепловизионных изображениях (а)



Рис. 13. Внешний вид поверхности бериллиевых плиток после 30 000 термоциклов при 4,7 МВт/м²

По окончании программы технология вакуумной индукционной пайки была квалифицирована и одобрена МО ИТЭР для дальнейшего применения при изготовлении полномасштабного прототипа ППС. Дополнительно два макета были испытаны при 4,7 МВт/м² до 30 000 циклов нагрева/охлаждения (двухкратный ресурс). По результатам данных испытаний не произошло критических ухудшений качества паяного соединения. На рис. 13 показаны фотографии поверхности плиток бериллиевой облицовки, покрытых сеткой микротрещин после 30 000 термоциклов. При этом не произошло никаких критичных повреждений поверхности (оплавление, выкрашивание и пр.).

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ПОЛНОМАСШТАБНОГО ПРОТОТИПА ППС

Изготовление и испытания полномасштабного прототипа — это финальная стадия квалификации поставщика перед получением разрешения на начало изготовления серийных компонентов ИТЭР. Цель изготовления полномасштабного прототипа: проверка собираемости, технологичности, контроле- и ремонтно-пригодности элементов конструкции, а также проверка операций технологического процесса и успешное прохождение сдаточных испытаний. Фотографии изготовленного прототипа показаны на рис. 14.



Рис. 14. Изготовленный полномасштабный прототип высоконагруженной ППС



Рис. 15. ОПЭ полномасштабного прототипа ППС

Успешно изготовлено 45 штук ОПЭ полномасштабного прототипа ППС (с небольшим запасом, в прототипе 40 ОПЭ), имеющих сложную криволинейную фасетированную форму поверхности облицовки (рис. 15). Каждый ОПЭ содержит 38 бериллиевых плиток. Таким образом, успешно припаяно более 1700 плиток на поверхность сложной формы.

Проведённый УЗК подтвердил высокое качество всех полученных паяных соединений. Ресурсные тепловые испытания, проведённые

на выборке из 12 ОПЭ прототипа ППС, также не выявили нарушений качества паяного соединения бериллиевой облицовки (рис. 16).

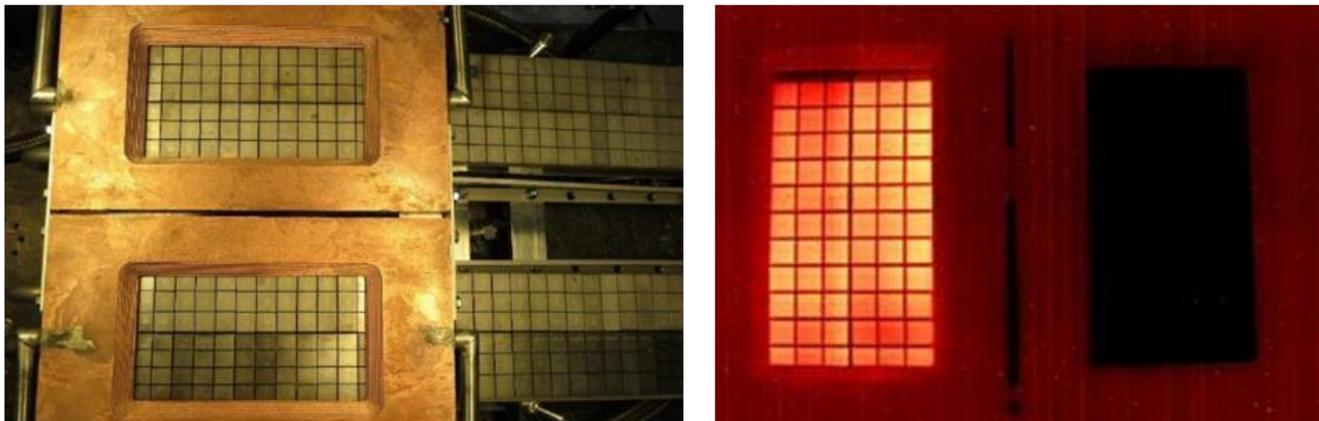


Рис. 16. Тепловые испытания ОПЭ полномасштабного прототипа ППС

В настоящее время успешно завершены основные сдаточные (тепловые, гидравлические и вакуумные) испытания полномасштабного прототипа. Предстоит большая работа по подготовке и утверждению необходимого комплекта документов для получения разрешения МО ИТЭР на начало серийного изготовления. Технология вакуумной индукционной пайки облицовки подтвердила свою надёжность, эффективность и повторяемость в получении качественного соединения бериллиевой облицовки в ОПЭ ППС. Полученные результаты полностью удовлетворяют критериям МО ИТЭР.

СМЕНА МАТЕРИАЛА ОБЛИЦОВКИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ИТЭР

Заявленное МО ИТЭР намерение о смене материала облицовки первой стенки ИТЭР [11] привело к необходимости анализа пригодности разработанной технологии вакуумной индукционной пайки для присоединения вольфрамовой облицовки.

При использовании вольфрама из-за большой разницы в коэффициентах линейного температурного расширения с материалом подложки (CuCrZr) применяют промежуточный слой из мягкой бескислородной меди. Медный слой толщиной 2 мм получают методом вакуумной наплавки меди на вольфрам. Из полученных заготовок методом электроэрозионной обработки получают биметаллические W/Cu-плитки. Фактически при пайке облицовки выполняется пайка меди и бронзы CuCrZr. Для выбранного припоя СТЕМЕТ® 1101м соединение медных сплавов является одним из типовых применений.

В инициативном порядке экспериментальной проверки качества паяных соединений изготовлено две W/Cu-плитки с размерами, повторяющими размеры типовой бериллиевой плитки (рис. 17). Толщина

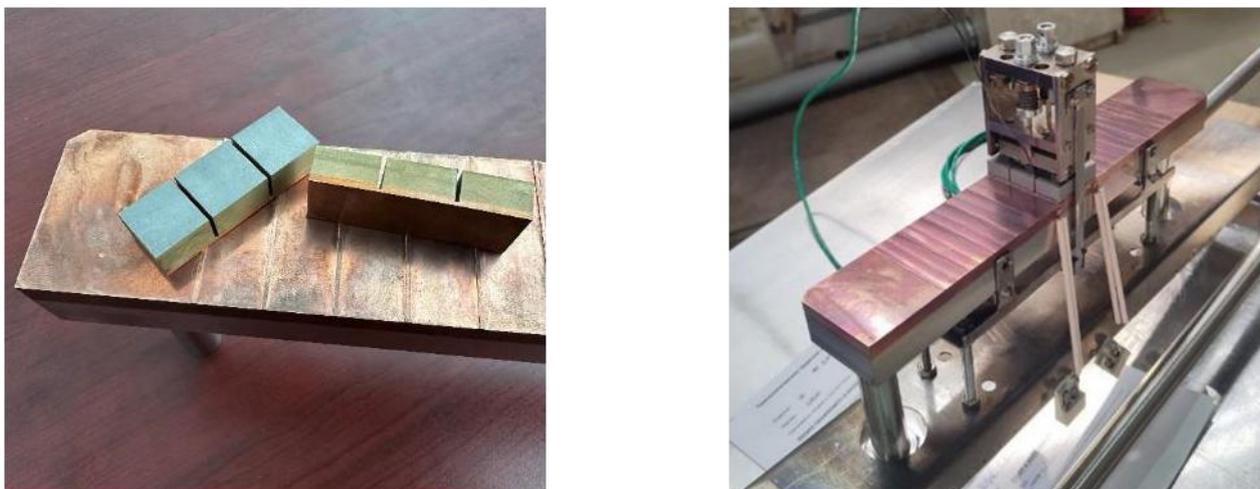


Рис. 17. Подготовка к пайке макета с W/Cu-плитками

вольфрама в плитке составила 6 мм, толщина медного слоя 2 мм. Плитки имеют единое медное основание, на котором находятся три независимые части плитки. Прорезы между данными частями плитки шириной 1 мм выполнены электроэрозионным способом и углубляются в медный подслей на 1 мм.

С использованием разработанного для бериллиевой облицовки оборудования, оснастки, припоя и режимов пайки успешно выполнена пайка W/Cu-плиток на водоохлаждаемое основание (см. рис. 17). Пайка макета выполнена под углом около 25 градусов к горизонту, чтобы оценить влияние растекания избытков припоя под действием силы тяжести, что может привести к загрязнению плиток. После пайки следов припоя на боковых поверхностях вольфрамовых плиток не обнаружено.

Изготовленный макет прошёл 5000 циклов тепловых испытаний при $4,7 \text{ МВт/м}^2$ при параметрах охлаждения, соответствующих используемым для макетов в рамках программы квалификации технологии пайки (рис. 18).

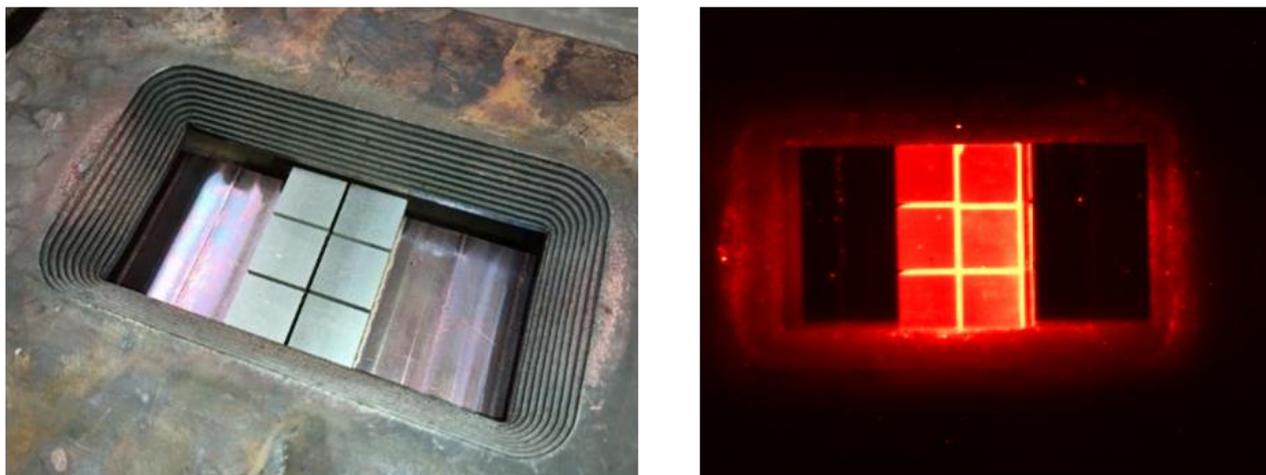


Рис. 18. Тепловые испытания макета с W/Cu-плитками

Проведённый УЗК качества многослойных соединений W/Cu/CuCrZr (рис. 19) до и после тепловых испытаний продемонстрировал отличное качество паяного соединения Cu/CuCrZr, существенных изменений после испытаний не обнаружено. В наплавленном соединении W/Cu после испытаний появилось несколько небольших допустимых дефектов.

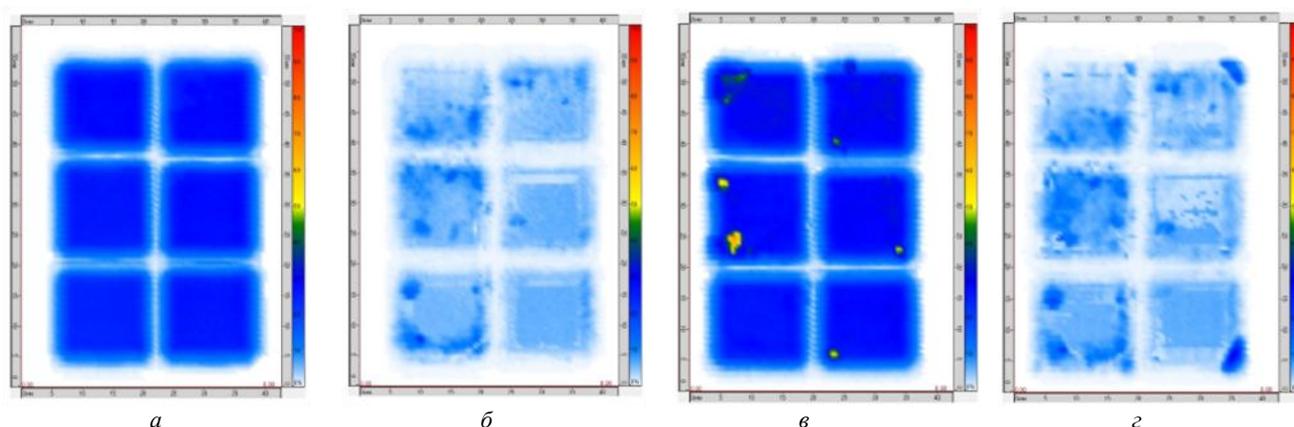


Рис. 19. Результаты УЗК: *а* — W/Cu до испытаний; *б* — Cu/CuCrZr до испытаний; *в* — W/Cu после испытаний; *г* — Cu/CuCrZr после испытаний

Так как масса каждой W/Cu-плитки в несколько раз превосходит массу аналогичной бериллиевой плитки, возникают опасения, что для панелей первой стенки, расположенных в верхней части вакуумной камеры, может произойти отпайка плиток облицовки в случаях нестационарных нагрузок. Для оценки вероятности отпайки был проведён опыт по отпайке W/Cu-плиток под собственным весом от теплоотводящей подложки. Во время проведения опыта макет разместили вниз облицовкой и на одну из плиток через фиксирующий захват подвесили груз массой, имитирующей вольфрамовую плитку увеличенной толщины 25 мм. Во время эксперимента макет дважды нагревали: первый раз до $854 \text{ }^\circ\text{C}$, второй раз до $891 \text{ }^\circ\text{C}$.

В результате определено, что одного собственного веса плитки с вольфрамом толщиной до 25 мм недостаточно для разрушения паяного соединения при его нагреве вплоть до 891 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана, квалифицирована и успешно внедрена в производство в АО «НИИЭФА» технология вакуумной индукционной пайки бериллиевой облицовки высоконагруженных ППС ИТЭР. Успешно изготовлен полномасштабный прототип высоконагруженной ППС ИТЭР и подтверждена надёжность технологии. Разработана установка для серийной пайки облицовки ППС, доработанная по итогам опытных работ. Достигнуты следующие основные параметры:

— прочность бронзы CuCrZr (дисперсионно-твердеющего медного сплава) в составе конструкции ОПЭ ППС после пайки достигает значений ≥ 300 МПа (при испытании на растяжение при комнатной температуре), что с запасом удовлетворяет критерию допустимой прочности 280 МПа;

— разработанная специальная оснастка для настройки положения индуктора и для фиксации плиток бериллиевой облицовки позволяет достигать высокой равномерности температуры в зоне пайки в пределах $\pm 3\%$, а также обеспечивать постоянное усилие прижима каждой плитки не менее 40 Н в процессе всего цикла пайки. Это обеспечивает высокий уровень стабильности качества паяного соединения;

— надёжность полученных паяных соединений экспериментально подтверждена термоциклическими испытаниями при плотности поглощённой мощности 4,7 МВт/м² (пиковая нагрузка для ППС ИТЭР). Квалификационные макеты успешно выдержали 15 000 циклов нагружения (полный ресурс). Также проведена дополнительная серия испытаний 30 000 циклов без разрушения макетов;

— 45 ОПЭ полномасштабного прототипа высоконагруженной ППС изготовлены в полном соответствии с требованиями качества, предъявляемыми к паяному соединению;

— опытная пайка W/Cu-плиток с использованием разработанных для бериллиевой облицовки оборудования, припоя, оснастки и режимов показала отличное качество паяных соединений.

Работа частично выполнена в рамках государственных контрактов на выполнение НИОКР «Разработка, опытное изготовление, испытание и подготовка к поставке специального оборудования в обеспечение выполнения российских обязательств по проекту ИТЭР в 2021 (2022, 2023) году» № Н.4а.241.19.21.1038 от 11.05.2021, № Н.4а.241.19.22.1123 от 14.02.2022, № Н.4а.241.19.23.1014 от 18.01.2023.

REFERENCES

1. Gervash A., Giniyatulin R., Guryeva T., Glazunov D., Kuznetsov V., Mazul I., Ogursky A.Y., Piskarev P.Y., Safronov V., Eaton R., Raffray R., Sevryukov O. The development of technology of Be/CuCrZr joining using induction brazing. — *Fusion Engineering and Design*, 2019, vol. 146, pp. 2292—2296.
2. Piskarev P.Y., Gervash A.A., Vologzhanina S.A., Ermakov B.S., Kudryavceva A.M. Study of the Bimetallic Joint CuCrZr/316L(N). — *Materials Science Forum*, 2021, vol. 1040, pp. 8—14.
3. Piskarev P., Gervash A., Bobrov S., Ruzanov V., Ogursky A., Mazul I., Giniyatulin R., Ermakov B., Sevryukov O. Analysis of CuCrZr/316L(N) bimetallic joint with and without Nickel inter-layer for plasma facing components. — *Materials Physics and Mechanics*, 2022, vol. 48(2); doi: 10.18720/MPM.4848(2)2022_4.
4. Piskarev P.Yu., Gervash A.A., Ogursky A.Yu., Ruzanov V.V., Mazul I.V. Method for heat treatment of CuCrZr bronze used in the manufacture of products with beryllium cladding and bimetallic compound CuCrZr/316L(N). Patent № 2768076 of 23.03.2022 (in Russian).
5. Piskarev P.Yu., Ogursky A.Yu., Gervash A.A., Mazul I.V. Preparation to program carrying out of technology qualification of beryllium encasement vacuum induction soldering for components of ITER reactor. — *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* (Science intensive technologies in mechanical engineering), 2018, vol. 8, pp. 33—41 (in Russian).
6. Gervash A.A., Ogursky A.Yu., Okuneva E.V., Piskarev P.Yu., Ushakov Yu.V. Device for details fixation in soldering process. Patent № 195416 of 04.06.2019 (in Russian).
7. Piskarev P.Yu., Gervash A.A., Ogursky A.Yu., Ruzanov V.V. Device with ribbon tensioner for details fixation in induction soldering process. Patent № 215106 of 18.05.2022 (in Russian).
8. Gervash A.A., Ogursky A.Yu., Piskarev P.Yu., Ruzanov V.V., Ushakov Yu.V. Vacuum induction soldering method. Patent № 2758710 of 01.11.2021 (in Russian).

9. **Bulavinov A., Pinchuk R., Gurieva T., Lyanzberg D.** Robot-based in-process examination of ITER dome and first-wall panels based on novel ultrasonic tomography approach. — In: 19th World Conference on Non-Destructive Testing, Munich, Germany, June 13, 2016, p. 37.
10. **Volodin A., Kuznetsov V., Davydov V., Kokoulin A., Komarov A., Mazul I., Mudyugin B., Ovchinnikov I., Stepanov N., Rulev R., Eremkin A., Rogov A., Priyanikov V., Fedosov A.** The high-heat-flux test facilities in the Joint Stock Company “D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus”. — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 98—99, pp. 1411—1414.
11. **The beryllium** armour of the ITER reactor is planned to replace by tungsten one. Press-center NRNU MEPhI, 04.10.2023; URL: <https://www.mephi.ru/press/news/21494> (in Russian).

AUTHORS

Piskarev P.Yu. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; piskarev@sintez.niiefa.spb.su

Gervash A.A. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; gervash@sintez.niiefa.spb.su

Ogursky A.Yu. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; ogursky@sintez.niiefa.spb.su

Glazunov D.A. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia

Bobrov S.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; bobrov@sintez.niiefa.spb.su

Mazul I.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; mazul@sintez.niiefa.spb.su

Rulev R.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; rulev@sintez.niiefa.spb.su

Okuneva E.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; okuneva@sintez.niiefa.spb.su

Ruzanov V.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; ruzanov@sintez.niiefa.spb.su

Lyanzberg D.V. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; lynzberg@sintez.niiefa.spb.su

Putrik A.B. Institution «Project Center ITER», ul. Raspletina 11, korpus 2, 123060 Moscow, Russia

Panteleev M.A. JSC «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», pos. Metallostroy, Doroga na Metallostroy 3, 196641 St. Petersburg, Russia; panteleev@sintez.niiefa.spb.su

Received 9 January 2024

Revised 16 January 2024

Accepted 17 January 2024

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2024, vol. 47, issue 1, pp. 122—132