

РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБРАЩЕННЫХ К ПЛАЗМЕ КОМПОНЕНТОВ В УСЛОВИЯХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ЖИДКИМ ЛИТИЕМ

Колесник М.С., Пискарев П.Ю., Мазуль И.В., Рузанов В.В., Рулев Р.В.,
Огурский А.Ю. (АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия)

Введение

Уже более полувека научное сообщество работает над идеей создания установок управляемого термоядерного синтеза. Введение установок такого типа помогло решить бы многие проблемы нехватки полезных ресурсов и энергии. Однако, создание таких установок сопряжено с необходимостью решения ряда нетривиальных научно-технических задач. Одной из таких задач является создание обращенных к плазме элементов (ОПЭ) первой стенки, способных выдерживать сверхвысокие тепловые потоки (плотностью поглощенной мощности до 5 МВт/м^2) во время длительного импульса разряда плазмы и срыва на окружающие ее стенки. При этом материал обращенной к плазме поверхности ОПК должен обеспечивать низкий уровень загрязнения плазмы примесями.

В отечественном проекте токамака реакторных технологий (ТРТ) для решения данной проблемы рассматривается два перспективных варианта:

- 1) ОПК с твердотельной обращенной к плазме поверхностью, имеющей низкий Z (бериллий) [1];
- 2) ОПК с возобновляемой обращенной к плазме поверхностью из жидкого лития (имеющей еще более низкий Z).

Работы с использованием твердотельной бериллиевой облицовки ОПК, а также других материалов (вольфрам, графит) уже неоднократно проводились в мировом сообществе, наиболее технически проработанной является конструкция ОПК панелей первой стенки проекта ИТЭР [2]. Научный интерес представляет конструкция ОПК с жидким литием в качестве защитного материала. Популярность идеи использования жидкого лития обусловлена:

- высокой удельной теплоемкостью лития, что крайне важно для сохранения панелей ОПК;
- малым атомарным числом лития, что при его испарении со стенок ОПК не приведет к существенному загрязнению плазмы [3];
- возможностью организации самовозобновляемой защитной поверхности из жидкого металла;
- при облучении нуклида ${}^6\text{Li}$ тепловыми нейтронами получается тритий, что является одним из составляющих топливной смеси термоядерных реакторов и также будет поддерживать реакцию.

Однако, использование лития также несет в себе ряд значительных проблем. Концепции ОПК с использованием жидкого лития имеют более низкий уровень развития технологии (TRL) по сравнению с твердотельной облицовкой. Также при использовании таких ОПК в разрядной камере, осаждение лития будет происходить на всех внутрикамерных компонентах. В свою очередь, медь и ее сплавы, являющаяся одним из основных теплоотводящих материалов в конструкции активноохлаждаемых компонентов крайне сильно корродирует при контакте с литием. Особенно интенсивно реакция протекает при контакте с жидким литием и его парами. Для решения данной проблемы разработана конструкция ОПК, где теплоотводящий материал из сплава на медной основе защищен плакировкой тонкими стальными нержавеющей листами по всему периметру медной матрицы. Нержавеющая сталь обладает на порядок лучшей

коррозионной стойкостью в жидком литии при соответствующих температурах. Внутренние теплоотводящие каналы также выполнены из стальных трубок с целью минимизации риска взаимодействия теплоносителя (воды) с жидким литием, что может привести к бурной реакции с выделением водорода и взрыву внутри вакуумной камеры установки управляемого термоядерного синтеза.

1. Цели и методы исследования

Цель данной работы заключалась в выполнении опытного изготовления и проведении тепловых испытаний макета упрощенной конструкции рассмотренного ранее ОПК. Упрощенный макет представляет собой биметаллическое (медь/сталь) теплоотводящую структуру с плакировкой из нержавеющей стали толщиной 1 мм. Защитная облицовка в конструкции макетов в рамках данной работы не применялась. Задача присоединения облицовки требует рассмотрения в рамках отдельной работы. Конструкция макетов для проведения данного исследования представлена на рис. 1 и 2. Для надежного соединения всех деталей между собой, а также образования качественного и хорошо теплопроводящего биметаллического соединения между стальными частями макета и медной матрицей макет был изготовлен с применением диффузионной сварки методом горячего изостатического прессования (ГИП) [4].

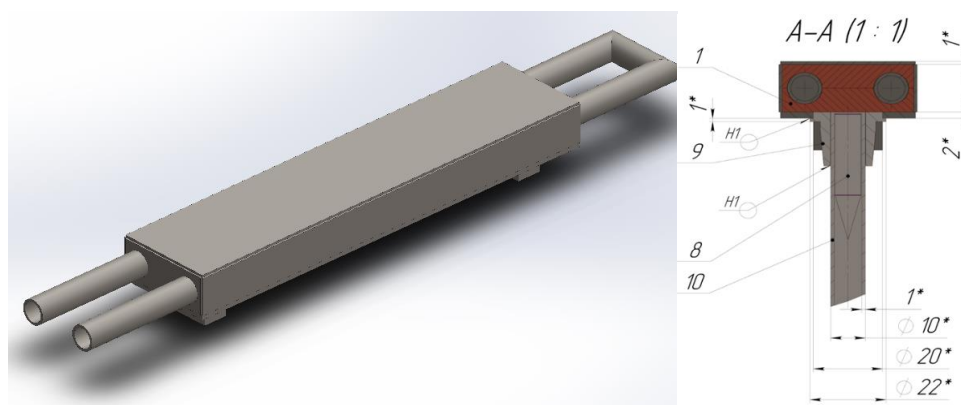


Рис. 1. Конструкция макета обращенного к плазме компонента

Преимуществом данного метода является оптимальное состояние обоих материалов во время процесса проведения ГИП: в виде прокатанных пластин/фольг с максимальной исходной плотностью, прочностью и теплопроводностью. Метод позволяет выполнять диффузионную сварку изделий различных размеров, имеющих сложную форму зоны соединения. Макет до и после диффузионной сварки представлен на рис. 2.

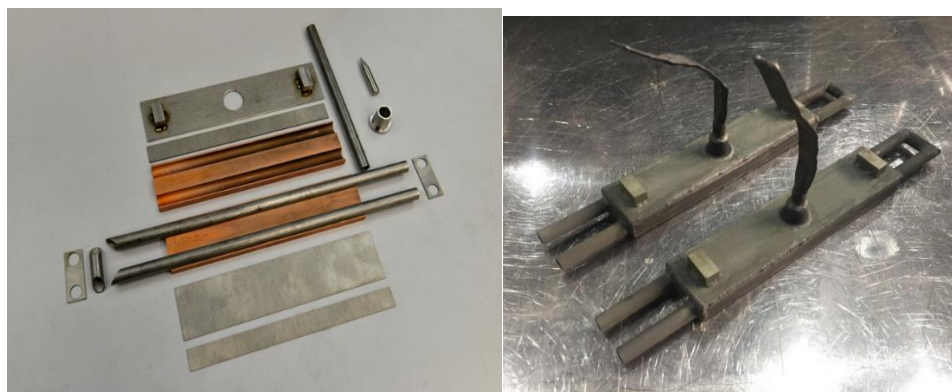


Рис. 2. Процесс изготовления макета

Основной фазой исследования данной работы стали термоциклические испытания изготовленных макетов. Испытания проводились с целью определения предельно допустимых параметров теплового нагружения, при которых не происходит разрушение макетов, нарушение теплоотвода от нагружаемой поверхности или перегрева макетов свыше установленных критериев.

Испытания проведены на стенде тепловых испытаний «Цефей-М» на макете, площадь тепловоспринимающей поверхности которого ограничена медной маской с размером окна 34×156,3 мм, что позволило провести нагружение практически 75 % тепловоспринимающей поверхности макета сканирующим электронным пучком. Макет активно охлаждается, находится в вакуумной камере, источник нагрева – электронная пушка, контроль температуры пирометром и тепловизором. Пирометр был настроен на самую горячую область макета. Гидравлические параметры теплоносителя системы охлаждения испытанного макета представлены в табл. 1.

Таблица 1

Гидравлические параметры теплоносителя

№п/п	Наименование параметра	Значение параметра
1	Давление охлаждающей воды на входе в испытательную сборку	3,0 МПа ± 5 %
2	Температура охлаждающей воды на входе в испытательную сборку	70 °С ± 5 %
3	Массовый расход охлаждающей воды в каналах охлаждения испытательной сборки	0,36 кг/с ± 5 %

2. Результаты тепловых испытаний

Ключевые показатели в процессе испытаний с целью определения предельно допустимых параметров теплового нагружения представлены в табл. 2. Критериями определения предельных параметров нагружения стали:

- отсутствие глубоких трещин или расслоений в конструкции макета;
- удержание температуры тепловоспринимающей поверхности ниже 500 °С;
- отсутствие нарушений герметичности макета и протечек теплоносителя.

На интервале этапов с 1 по 9 значение температуры поверхности не фиксировалось в таблице ключевых показателей в связи с низкой чувствительностью пирометров при температурах ниже 400 °С. При плотности поглощенной мощности равной 4,94 МВт/м² значение температуры поверхности превысило ключевой порог в 500 °С, после чего тепловые испытания были остановлены. Тепловизионное изображение тепловоспринимающей поверхности при плотности поглощенной мощности 4,94 МВт/м² представлено на рис. 3. График температурного распределения вдоль зоны испытания при плотности поглощенной мощности 4,94 МВт/м² представлен на рис. 4.

По окончании тепловых испытаний был проведен визуальный анализ нагружаемой поверхности. Растрескиваний, расслоений или нарушения герметичности на макете обнаружено не было. Единственным изменением стало небольшое матирование поверхности и цветные побежалости места теплового нагружения.

Таблица 2

Ключевые показатели тепловых испытаний

Номер этапа	Количество импульсов	Мощность пучка, кВт	Плотность поглощен. мощности, МВт/м ²	Температура поверхности по пирометру, °С
1	10	10	0,64	—
2	10	14	0,92	—
3	10	18	1,2	—
4	10	22	1,46	—
5	10	26	1,74	—
6	10	30	2,04	—
7	10	34	2,32	—
8	10	38	2,58	—
9	10	42	3,12	—
10	10	46	3,44	402
11	10	50	3,7	428
12	10	54	4,04	450
13	10	58	4,32	474
14	10	62	4,68	497
15	10	66	4,94	524

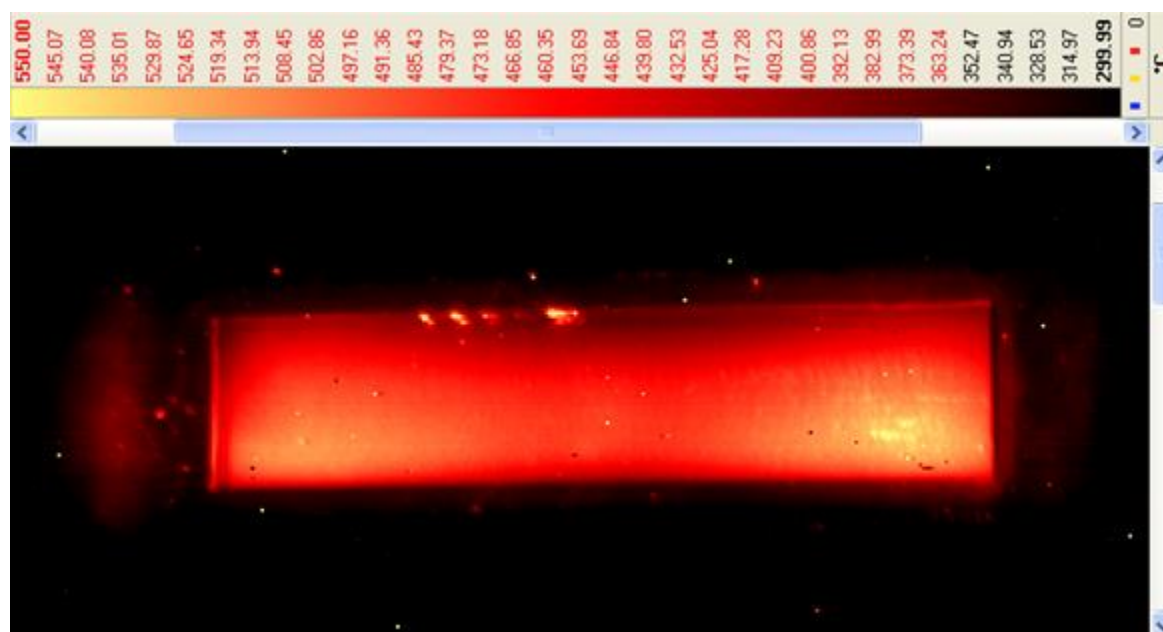


Рис. 3. Температурное распределение на поверхности по тепловизору

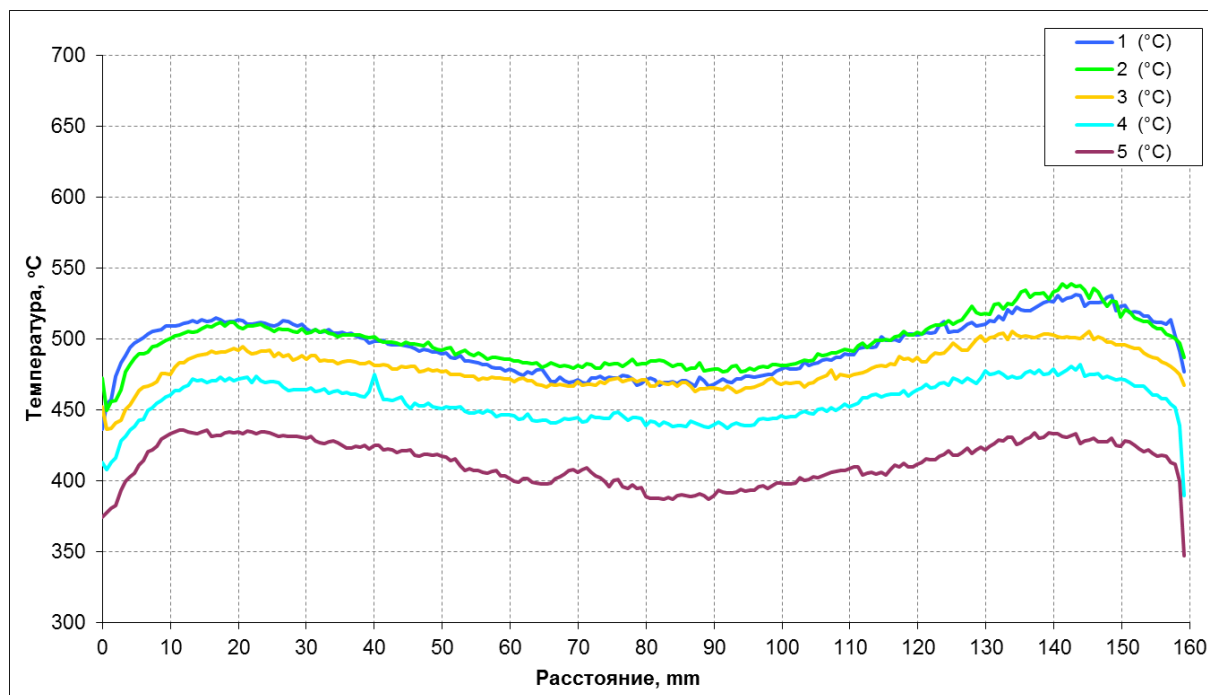


Рис. 4. График температурного распределения при плотности поглощенной мощности 4,94 МВт/м²

Заключение

В результате проведенной работы и по итогам тепловых испытаний концепция ОПК с медной теплоотводящей матрицей и защитной плакировкой из нержавеющей стали на наружных поверхностях и стенках каналов охлаждения показала свою работоспособность. Среди всех критериев определения предельного теплового потока единственным нарушением стало превышение порога температуры поверхности в 500 °С.

Список литературы

1. I.V. Mazul, P.N. Giniyatulin, A.A. Kavin, N.V. Litunovskii, A.N. Makhankov, P. Yu. Piskarev and V.N. Tanchuk. Plasma-Facing Components of the TRT Tokamak // Plasma Physics Reports Vol. 47, No. 12 (2021), pp. 1220–1237.
2. A.R. Raffray, R. Nygren, D.G. Whyte, S. Abdel-Khalik, R. Doerner, F. Escourbiac, T. Evans, R.J. Goldston, D.T. Hoelzer, S. Konishi, P. Lorenzetto, M. Merola, R. Neu, P. Norajitra, R.A. Pitts, M. Rieth, M. Roedig, T. Rognlien, S. Suzuki, M.S. Tillack, C. Wong. High heat flux components – Readiness to proceed from near term fusion systems to power plants // Fusion Engineering and Design, 85 (2010), pp. 93–108.
3. Mirnov S.V., Evtikhin V.A. Application of Ga and Li as a material limiter in tokamaks T-3M and T-11M // Fusion Engineering and Design, 2005, Series: Thermonuclear Fusion vol. 4, p. 3–18.
4. Gervash A.A., Glazunov D.A., Lyanzberg D.V., Mazul I.V., Ogursky A.Y., Piskarev P.Y., Ruzanov V.V., Refinement of the technology of hot isostatic pressing of vacuum-tight bimetallic joint of ITER in-Vessel components, Innovative Designs and Technologies of Nuclear Power: Collection of papers of V International Scientific and Technical Conference. – Moscow: JSC "NIKIET" (2018) 2428–2434.