УДК 621.039.634

ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ МЕХАНИЧЕСКОГО КРЕПЛЕНИЯ ПАНЕЛИ ПЕРВОЙ СТЕНКИ БЛАНКЕТА ИТЭР

М.Н. Свириденко, С.Н. Томилов, И.И. Поддубный, В.Ю. Колганов, Р.А. Тагиев, А.Ю. Лешуков

АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалы», Москва, Россия

АО «НИКИЭТ» совместно с АО «НИИЭФА» является ответственным за изготовление теплонапряжённых панелей первой стенки в рамках соглашения о поставке 1.6.P1A.RF01 от 13 февраля 2014 г. Теплонапряжённая панель первой стенки является сборочной единицей, включающей следующие основные компоненты: энергонапряжённые компоненты, обращённые к плазме, несущую конструкцию, систему механического крепления и систему электрической связи. Одними из компонентов системы механического крепления являются радиальные и полоидальные контактные электроизоляционные накладки. Их основной функцией является восприятие электромагнитных нагрузок, обусловленных срывами плазмы. Одновременно контактные накладки обеспечивают электрическую изоляцию панели первой стенки с целью оптимизации токовых петель и уменьшения нагрузок на панель первой стенки при срывах плазмы. В 2017 г. разработана конструкция панели первой стенки, позволяющая обеспечить неразрушающий контроль сварных швов «энергонапряжённый компонент панели первой стенки/несущая конструкция». Использование данного подхода позволяет унифицировать основные типоразмеры контактных электроизоляционных накладок и упростить их серийное изготовление. С целью обоснования работоспособности конструкций контактных электроизоляционных накладок выполнена серия ударных испытаний при нагрузках, характерных для срывов плазмы при работе ИТЭР. По результатам испытаний продемонстрирована работоспособность контактных электроизоляционных накладок с элементами крепления, что позволяет использовать один типоразмер для всех теплонапряжённых панелей первой стенки. Отмечена возможность отказа от шлифовки электроизоляционного покрытия, что позволяет существенно упростить процесс изготовления и поднять вопрос о целесообразности нанесения уменьшающего трение покрытия. Данная статья содержит описание конструкции контактных электроизоляционных накладок панели первой стенки и результаты серии ударных испытаний при нагрузках, характерных для срывов плазмы в ИТЭР.

Ключевые слова: бланкет, панель первой стенки, динамические ударные испытания, контактные электроизоляционные накладки, оснастка для динамических испытаний, электроизоляционное покрытие.

IMPACT TEST OF THE MECHANICAL ATTACHMENT SYSTEM COMPONENTS OF THE ITER BLANKET FIRST WALL

M.N. Sviridenko, S.N. Tomilov, I.I. Poddubnyi, V.Yu. Kolganov, R.A. Tagiev, A.Yu. Leshukov

N.A. Dollezhal Order of Lenin Scientific-Research and Design Institute of Power Engineering, Moscow, Russia

JSC «NIKIET» in collaboration with JSC «NIIIEFA» are responsible for manufacturing of enhanced first wall panels in the frame of Procurement Arrangement 1.6.P1A.RF01 dated by 13 February of 2014. Enhanced first wall panel is plasma facing assembly unit including the following main components: plasma facing components, supporting structure, mechanical attachment system and electrical connection system. Mechanical attachment system includes radial and poloidal pads. Their main function is to withstand electro-magnetic loads induced by plasma disruptions. At the same time the pads provide the electrical insulation of the first wall panel with the aim of optimization of current loops and reduction of loads acting on the first wall at plasma disruptions. In 2017 a new option of the first wall panel was developed. It allows to hold nondestructive examination of welded joints the first wall panel/fingers. This approach gives possibility to standardize pads types and simplify further serial production. The set of impact tests was performed in order to verify ability of pads to operate under loads expected at ITER plasma disruptions. Obtained results of impact tests have shown the satisfactory working capacity-of pads with fixing elements, which allows to use just one pad type for all the enhanced first wall panels. Also based on the test results the possibility to use the pads without grinding is noticed that significantly simplifies the manufacturing. Simultaneously this possibility allows to consider the practicability of low friction coating application on pad spherical contact surface. This paper provides the first wall pads with electrical insulation design description and results for set of impact tests under the loads expected under ITER plasma disruptions.

Key words: blanket, first wall panel, dynamic impact testing, contact electrical insulating pads, dynamic testing facility, electrical insulating coating.

DOI: 10.21517/0202-3822-2019-42-4-72-84

ВВЕДЕНИЕ

В 2014 г. подписано соглашение о поставке теплонапряжённых панелей первой стенки между Частным учреждением «Проектный центр ИТЭР» и Международной организацией ИТЭР. В рамках данного соглашения необходимо изготовить, испытать и поставить на площадку ИТЭР 179 панелей первой стенки (ППС), включающих 15 основных вариантов конструкции и 18 дополнительных, отличающихся на-

личием различных технологических проходов для установки диагностического оборудования. Реализация Соглашения о поставке теплонапряжённых ППС осуществляется при взаимодействии двух основных поставщиков: АО «НИИЭФА» и АО «НИКИЭТ» [1].

В качестве базовой конструкции ППС использован вариант со сварным креплением энергонапряжённых компонентов (пальцы ПС) [2, 3], что предполагает фиксацию пальцев ПС на несущей конструкции первой стенки (НКПС) двумя сварными швами, при этом гидравлическое соединение реализовано через трубки, расположенные между сварными швами (рис. 1).

Являясь компонентом, обращённым к плазме, ППС включает в себя следующие элементы: несущую конструкцию (НКПС), пальцы ПС, системы механического крепления и электрической связи. В свою очередь, система механического крепления включает радиальные и полоидальные контактные электроизоляционные накладки (КЭИН), предназначенные для восприятия механических усилий, действующих на ППС при срывах плазмы, а также центральный болт, установленный в специальном стакане на тыльной части НКПС, обеспечивающий фиксацию ППС на защитном блоке (ЗБ). ППС, установленная на ЗБ, представлена на рис. 2.

Конструкция КЭИН представляет собой тело вращения с рабочей (контактной) сферической поверхностью радиусом 300 мм (рис. 3). Для обеспечения электрической изоляции ППС от ЗБ на боковую и тыльную поверхности КЭИН нанесено электроизоляционное покрытие (ЭИП) на базе Al_2O_3 [4–6]. Согласно [2] предложено использовать КЭИН с конической боковой поверхностью, конструкция которой позволяет обеспечить самоустановку КЭИН в пазе НКПС и исключить её перемещение, что является важным фактором с точки зрения предотвращения износа трением ЭИП, нанесённого на боковую и тыльную поверхности.

С учётом различной геометрии поставляемых панелей и действующих нагрузок разработаны три типоразмера КЭИН — А, В и С (см. рис. 3). Основные отличия трёх типоразмеров КЭИН — диаметр цилиндрической поверхности и наличие конической шайбы под фиксирующей гайкой. Согласно [7] в качестве материала КЭИН для всех типов используется никель-алюминиевая бронза [8, 9]. Фиксация КЭИН в пазе НКПС для типов А и В обеспечивается гайкой, выполненной из стали марки 316L(N)-IG [8, 9], и шайбой из никель-алюминиевой бронзы, введённой в конструкцию в целях самоустановки КЭИН относительно НКПС. При этом для КЭИН типа С шайба отсутствует, а фиксирующая гайка выполнена из никель-алюминиевой бронзы и снабжена конической поверхностью также для обеспечения са-

Рис. 1. Общий вид панели ПС (сварное крепление пальцев к НКПС)

Рис. 2. Общий вид панели ППС, установленной на ЗБ

Рис. 3. Общий вид КЭИН и их расположение на ППС

моустановки КЭИН в пазе НКПС. Для всех типов КЭИН тыльная поверхность, покрытая ЭИП, контактирует со сталью марки 316L(N)-IG, при этом боковая поверхность КЭИН, также покрытая ЭИП, контактирует с алюминиевой бронзой. Во всех ППС КЭИН типа С используются в качестве радиальных контактных накладок (РКН), при этом КЭИН типа А или В — в качестве полоидальных контактных накладок (ПКН) в зависимости от геометрии ППС. На сферическую контактную поверхность предполагается нанесение уменьшающего трение покрытия на базе MoS_2 [10].

Работоспособность КЭИН была подтверждена циклическими механическими испытаниями, продемонстрировавшими отсутствие разрушения ЭИП и деформации КЭИН при усилиях до 850 кН на каждую КЭИН [7].

В 2016—2017 гг. разработана конструкция ППС с использованием технологии орбитальной сварки кольцевых швов патрубков пальцев ПС при монтаже модулей на НКПС [11]. Каждый модуль представляет собой пару пальцев ПС, соединённых последовательно гидравлически с помощью перепускной трубки, кольцевой сварной шов которой выполнен также орбитальной сваркой. Данный подход предполагает выполнение патрубков подвода/отвода теплоносителя к пальцам ПС на периферийной части НКПС, что обеспечивает доступ

Рис. 4. Общий вид крепления пальцев ПС к НКПС

Рис. 5. ППС с использованием технологии орбитальной сварки кольцевых швов патрубков пальцев ПС

сварочного оборудования при финальном монтаже модулей пальцев, при этом соединение с НКПС обеспечивается посредством фрезерованных переходников (две штуки на один модуль), позволяющих компенсировать неточности изготовления посредством доработки стыка шва перед сваркой (рис. 4).

Новый подход позволил упростить конструкцию ППС, однако это привело к уменьшению радиального размера зоны для размещения РКН (на наклонных площадках НКПС) и, как следствие, сделало невозможным использование КЭИН типа В (рис. 5).

В свою очередь, использование КЭИН типа А теперь выглядит нецелесообразным, исходя из одного размера резьбы фиксирующей гайки как для типа А, так и для КЭИН типа С. Суммируя изложенное, можно сделать вывод о возможности использования одного типоразмера КЭИН (типа С) в качестве РКН и ПКН для всех теплонапряжённых ППС, при этом следует выполнить оптимизацию КЭИН типа С и фиксирующей гайки с целью улучшения собираемости и упрощения процесса изготовления. Модифицированная КЭИН представлена на рис. 6.

Рис. 6. Схема модифицированной КЭИН (а) и фиксирующей гайки (б)

Основным отличием является уменьшение диаметра рабочей части до 50 мм и уменьшение угла при вершине конической поверхности до 10° , что позволило выполнить на фиксирующей гайке пазы под ключ, не заходя на поверхность резьбы, и унифицировать конструкцию РКН и ПКН.

УДАРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Основываясь на результатах расчётного и экспериментального обоснования [1—3, 7], очевидно, что наиболее представительными, учитывая импульсный характер работы ИТЭР, являются динамические (ударные) испытания, имитирующие механическое воздействие, характерное для срывов плазмы, вследствие которого ППС перемещается и происходит взаимодействие КЭИН с поверхностями ЗБ. При срывах плазмы комбинация полоидального и тороидального моментов будет восприниматься РКН, что приведёт к контакту со скольжением на интерфейсе «РКН/ЗБ», при этом под действием радиального момента ППС будет поворачиваться до контакта на интерфейсе «ПКН/ЗБ». Учитывая специфику крепления ППС, а именно затяг центрального болта, обеспечивающий условие нераскрытия стыка на интерфейсе «РКН/ЗБ», определяющим будет воздействие радиального момента на пару ПКН, расположенных на наклонных боковых поверхностях НКПС.

Для ударных испытаний выбрана установка, спроектированная в АО «НИКИЭТ», представляющая собой копёр вертикального типа с падающей массой 460 кг [12], моделирующая ударное взаимодействие КЭИН с ЗБ. Данная установка снабжена силоизмерителем, установленным непосредственно под объектом испытаний, позволяющим фиксировать изменение силы во времени при каждом сбросе. Общий вид оснастки для динамических испытаний (ОДИ) представлен на рис. 7.

Перед испытаниями КЭИН устанавливалась в обойму и закреплялась фиксирующим элементом. Обойма устанавливалась на силоизмеритель и крепилась к основанию ОДИ винтами. Далее через контроллер МС 551 силоизмеритель подключался к компьютеру для регистрации изменения силы во времени (импульса). Боек (жёлтая деталь на рис. 7) поднимался на требуемую высоту с помощью лебёдки. Далее по команде оператора происходил сброс бойка массой 460 кг на ударник.

Рис. 7. Общий вид ОДИ

Для корректного моделирования ударного взаимодействия ударник снабжён пластиной из стали 316L(N)-IG, соответствующей конструкционному материалу ЗБ [8]. КЭИН устанавливалась в обойму из стали 316L(N)-IG и фиксировалась гайкой, закрученной до упора.

Высота подъёма бойка определялась при первых 5—10 сбросах, исходя из требуемого усилия при испытании. Количество циклов (сбросов) взято по аналогии с [12] и составило 500 циклов для каждого объекта испытаний. Запись параметров велась для первых 10 сбросов и далее через каждые 10 сбросов. После каждых 10 сбросов выполнялись демонтаж ударника и осмотр объекта испытаний. Наличие или отсутствие электрического контакта фиксировалось с помощью мультитестера.

Объекты испытаний представлены на рис. 8. На боковую и тыльную поверхности КЭИН детонационным методом нанесён Al_2O_3 . Для обеспечения толщины ЭИП на уровне 0,35 мм выполнена шлифовка боковой и тыльной поверхностей, в результате высота КЭИН составила 27,97 мм. Также была измерена шероховатость сферической контактной поверхности, полученной при изготовлении КЭИН, значения которой составили $Ra = 0,195—0,256$.

Рис. 8. Общий вид модифицированной КЭИ

Тест № 1. Тест № 1 выполнен для КЭИН FW1 с диаметром рабочей части 50 мм. Высота сброса бойка принята равной 100 ± 5 мм, что соответствовало среднему значению силы 724 кН. Данное значение было выбрано исходя из усилия 650 кН, специфицированного МО ИТЭР для КЭИН ППС, плюс запас 10% по аналогии с [12]. Диаграммы изменения силы во времени для сбросов № 100, 250, 350 и 500 представлены на рис. 9, изменение силы от количества сбросов — на рис. 10.

Рис. 9. Диаграммы изменения силы во времени: сброс № 100 (а), сброс № 250 (б), сброс № 350 (в), сброс № 500 (г); длительность 1,91 (а), 1,65 (б), 1,64 (в), 1,73 мс (г); $F_{\max}$ = 753 (а), 722 (б), 713 (в), 753 кН (г)

Рис. 10. Изменение силы от количества сбросов: ◆ — FW1; — — линейная (FW1)

Во время циклического нагружения накладки происходят наклёп контактных поверхностей и упрочнение материала, и для сохранения усилия удара требуется снижение высоты сброса. Отсутствие точной системы позиционирования бойка приводит к дополнительному разбросу в усилиях, фиксируемых на КЭИН, и дополнительному (негативному) снижению контактного усилия, что отражено на рис. 10 кривой линейного тренда.

После 150-го сброса выявлено разрушение ЭИП, расположенного над прижимной поверхностью фиксирующей гайки в двух зонах, симметричных относительно оси КЭИН (рис. 11), после 350-го сброса размер зоны увеличился, при этом электрического контакта «КЭИН—обойма» не зафиксировано. Далее выполнены дополнительные 15 сбросов: пять сбросов с усилием 776—960 кН и 10 сбросов с усилием 1000 кН.

Рис. 11. КЭИН FW1 до, во время и после испытаний

По результатам теста № 1 отмечено следующее:

— после 500-го сброса отмечено выглаживание контактной сферической поверхности до зеркальной, но после 350-го сброса в центре поверхности выявлено пятно с более грубой шероховатостью, которое к 500-му сбросу увеличилось примерно в 2 раза, что может быть объяснено попаданием разрушенных частиц ЭИП в зону контакта;

— диаметр контактного пятна на ответной части после 500-го сброса составил 48 мм;

— откручивание фиксирующей гайки не наблюдается;

— обнаружено отслоение/разрушение ЭИП после 515 сбросов по всему цилиндру КЭИН над зоной контакта с гайкой, одновременно обнаружена трещина в зоне галтели на тыльной поверхности КЭИН, тем не менее электрический контакт отсутствует и узел остался работоспособным;

— деформация КЭИН в осевом направлении составила 0,83 мм, при этом контакта ударника и обоймы не зафиксировано, т.е. номинальный зазор 3 мм уменьшился до 2,17 мм из-за деформации КЭИН;

— шероховатость контактной поверхности после испытаний выросла до $Ra = 1,2—1,5$.

Тест № 2. Тест № 2 выполнен для КЭИН FW2 с диаметром рабочей части 50 мм. Высота сброса бойка была принята равной 90 ± 5 мм, обеспечивая среднее значение силы 673 кН, что, в свою очередь, согласуется с усилием 650 кН, специфицированным МО ИТЭР для КЭИН ППС. Диаграммы изменения

силы во времени для 50-го и 500-го сбросов представлены на рис. 12, изменение силы от количества сбросов — на рис. 13.

Рис. 12. Диаграммы изменения силы во времени: сброс № 50 (а), сброс № 500 (б); длительность 1,72 (а), 1,96 мс (б); $F_{\max} = 686$ (а), 699 кН (б)

Рис. 13. Изменение силы от количества сбросов: ■ — FW2; — — линейная (FW2)

Рис. 14. КЭИН FW2 до, во время и после испытаний

Так же, как и для КЭИН FW1, для КЭИН FW2 после 50 сбросов контактная поверхность выгладилась до зеркальной, далее в центре образовалась зона с повышенной шероховатостью. После 150-го сброса также выявлено разрушение ЭИП, расположенного над прижимной поверхностью фиксирующей гайки в двух зонах, симметричных относительно оси КЭИН (рис. 14), после 350-го сброса размер зоны увеличился, при этом

электрического контакта «КЭИН—обойма» не зафиксировано. Размер данной зоны меньше, чем для образца FW1, и составил к 500-му сбросу несколько менее четверти цилиндрической поверхности КЭИН. На тыльной стороне КЭИН FW2 разрушения или трещин покрытия не обнаружено.

По результатам теста № 2 отмечено следующее:

- после 50-го сброса отмечено выглаживание контактной сферической поверхности до зеркальной, к 500-му сбросу в центре сферической поверхности образовалась зона с повышенной шероховатостью, что может быть объяснено попаданием разрушенных частиц ЭИП в зону контакта;
- диаметр контактного пятна на ответной части после 500-го сброса составил 48 мм;
- откручивание фиксирующей гайки не наблюдается;
- обнаружено отслоение/разрушение ЭИП после 500 сбросов с двух сторон по цилиндру КЭИН над зоной контакта с гайкой (размер каждой зоны несколько менее четверти цилиндрической поверхности), тем не менее электрический контакт отсутствует и узел остался работоспособным;
- деформация КЭИН в осевом направлении составила 0,55 мм, при этом контакта ударника и обоймы не зафиксировано, т.е. номинальный зазор 3 мм уменьшился до 2,45 мм из-за деформации КЭИН;
- шероховатость поверхности после испытаний выросла до $Ra = 0,5—0,75$.

Тест № 3. Тест № 3 выполнен для КЭИН FW3 с диаметром рабочей части 50 мм. Высота сброса бойка уменьшена и принята равной 50 ± 5 мм, что соответствовало среднему значению силы 428 кН. Данное усилие принято для испытаний в соответствии с предложением специалистов Международной организации ИТЭР об уменьшении значения силы при ударных испытаниях КЭИН до 400 ± 50 кН. Диаграммы изменения силы во времени для 50-го и 500-го сбросов представлены на рис. 15, изменение силы от количества сбросов — на рис. 16.

Рис. 15. Диаграммы изменения силы во времени: сброс № 50 (а), сброс № 500 (б); длительность 1,95 (а), 1,83 мс (б); $F_{\max} = 463$ (а), 475 кН (б)

Рис. 16. Изменение силы от количества сбросов: ■ — FW3; --- — линейная (FW3)

Так же, как и для КЭИН FW1, для КЭИН FW2 после 50 сбросов поверхность выгладилась до зеркальной, далее осталась практически без изменения до 500-го сброса. После 500-го сброса на сферической поверхности КЭИН отмечены две небольшие зоны с повышенной шероховатостью. Разрушение ЭИП, расположенного над прижимной поверхностью фиксирующей гайки, не обнаружено (рис. 17), но отмечено, что ширина зоны контакта «КЭИН—гайка» составляет всего 2—3 мм, однако этого достаточно для обеспечения отсутствия самооткручивания гайки в течение 500 сбросов. Электрического контакта «КЭИН—обойма» также не зафиксировано.

Рис. 17. КЭИН FW3 до, во время и после испытаний

По результатам теста № 3 отмечено следующее:

- после 50-го сброса отмечено выглаживание контактной сферической поверхности до зеркальной, к 500-му сбросу качественно поверхность не меняется;
- диаметр контактного пятна на ответной части после 500-го сброса составил 38 мм;
- откручивание фиксирующей гайки не наблюдается;
- отслоение/разрушение ЭИП после 500 сбросов не обнаружено, электрический контакт отсутствует;
- деформация КЭИН в осевом направлении составила 0,34 мм, при этом контакта ударника и обоймы не зафиксировано, т.е. номинальный зазор 3 мм уменьшился до 2,66 мм из-за деформации КЭИН;
- шероховатость поверхности после испытаний в зоне контакта составила $Ra = 0,02—0,05$, при этом вне зоны контакта значение шероховатости поверхности осталось прежним — на уровне $Ra = 0,3$.

Рис. 18. КЭИН FW4 до испытаний

вне зоны контакта значение шероховатости поверхности осталось прежним — на уровне $Ra = 0,3$.

Тест № 4. Тест № 4 выполнен для КЭИН FW4 с диаметром рабочей части 50 мм. Высота сброса бойка принята равной 50 ± 5 мм, что соответствовало среднему значению силы 425 кН.

КЭИН FW4 прошла испытания без шлифовки ЭИП, т.е. в состоянии после нанесения ЭИП денауационным методом, поэтому её высота перед испытанием составила 28,16 мм (рис. 18). Шероховатость боковой поверхности КЭИН FW4 составила $Ra = 3,9—4,9$ и $4,6—5,6$ для тыльной поверхности (см. рис. 18).

Диаграммы изменения силы во времени для 50-го и 500-го сбросов представлены на рис. 19, изменение силы от количества сбросов — на рис. 20.

Рис. 19. Диаграммы изменения силы во времени: сброс № 60 (а), сброс № 500 (б); длительность 1,95 (а), 1,88 мс (б); $F_{\max} = 414$ (а), 432 кН (б)

Рис. 20. Изменение силы от количества сбросов: ♦ — FW4; --- — линейная (FW4)

После 50 сбросов сферическая контактная поверхность выгладилась до зеркальной, далее осталась практически без изменения до 500-го сброса. После 500-го сброса на сферической поверхности КЭИН отмечена небольшая зона с повышенной шероховатостью. Разрушение ЭИП, расположенного над прижимной поверхностью фиксирующей гайки, не обнаружено (рис. 21), но отмечено, что ширина зоны контакта «КЭИН—гайка» составляет всего 2—3 мм, однако этого достаточно для обеспечения отсутствия самооткручивания гайки в течение 500 сбросов. Электрического контакта «КЭИН—обойма» также не зафиксировано. На тыльной поверхности наблюдается неравномерный контакт, обусловленный отсутствием шлифовки покрытия.

Рис. 21. КЭИН FW4 до, во время и после испытаний

По результатам теста № 4 отмечено следующее:

- после 50-го сброса отмечено выглаживание контактной сферической поверхности до зеркальной, к 500-му сбросу качественно поверхность не меняется;
- диаметр контактного пятна на ответной части после 500-го сброса составил 38 мм;
- откручивание фиксирующей гайки не наблюдается;
- отслоение/разрушение ЭИП после 500 сбросов не обнаружено, электрический контакт отсутствует;
- деформация КЭИН в осевом направлении составила 0,35 мм, при этом контакта ударника и обоймы не зафиксировано, т.е. номинальный зазор 3 мм уменьшился до 2,65 мм из-за деформации КЭИН;
- шероховатость поверхности после испытаний в зоне контакта составила $Ra = 0,05—0,07$, при этом в центре значение шероховатости поверхности составило $Ra = 0,24$.

ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЙ

Результаты ударных испытаний позволили получить новые данные, необходимые для более детального понимания факторов, влияющих на работоспособность элементов системы крепления ППС при импульсных нагрузках, характерных для ИТЭР.

Обобщая результаты проведённых испытаний, можно отметить следующее:

- впервые проведены динамические циклические испытания, подтвердившие работоспособность КЭИН ППС с конической боковой поверхностью при различных условиях нагружения, характерных для ИТЭР;
- характер поведения КЭИН при динамических испытаниях отличается от результатов механических испытаний, приведённых в [1], а именно деформацией КЭИН в радиальном направлении и состоянием контактной сферической поверхности. Полученная зависимость деформации от осевого усилия, представленная на рис. 22, показывает, что при увеличении осевой силы происходит увеличение деформации по линейному закону;

Рис. 22. Зависимость деформации КЭИН от осевого усилия

— КЭИН со шлифованными боковой и тыльной поверхностями, снабжёнными ЭИП, и накладка без шлифовки ЭИП прошли испытания с одинаковым результатом, что позволяет отказаться от шлифовки при изготовлении, однако в конструкцию необходимо добавить промежуточный элемент, расположенный на дне паза НКПС с целью компенсации отклонений высоты КЭИН, вызванных отсутствием шлифовки. Данный подход позволит существенно упростить процесс изготовления КЭИН, а также обеспечить возможность компенсации положения КЭИН по высоте при монтаже ППС;

— отсутствие самоотвинчивания фиксирующей гайки в процессе испытаний подтвердило

возможность использования конического сопряжения с углом 10° при вершине для фиксации КЭИН в пазах НКПС. Стопорение гайки является следствием осевой деформации КЭИН, в результате которой боковая поверхность КЭИН более плотно прижимает гайку к НКПС, создавая натяг в резьбовом соединении;

— выглаживание сферической поверхности КЭИН существенно снижает шероховатость поверхности, позволяя отказаться от использования покрытия, уменьшающего трение на сферической поверхности КЭИН.

Несмотря на отсутствие электрического контакта «КЭИН—гайка», следует обратить внимание на разрушение/отслоение ЭИП на поверхности над гайкой, вызванное пластической деформацией боковой цилиндрической поверхности. Данное явление может привести к попаданию фрагментов ЭИП как в зону контакта «КЭИН—ЗБ», образуя зоны с высокой шероховатостью и износом контактной поверхности, так и к попаданию фрагментов ЭИП и частиц металла в резьбу, что, в свою очередь, может привести к невозможности замены ППС.

REFERENCES

1. **Dragunov Yu.G., Leshukov A.Yu., Strebkov Yu.S., Kirillov S.Yu., Makarov S.V., Trofimovich P.D., Elkin V.N., Sviridenko M.N., Razmerov A.V., Parshutin E.V., Khomyakov S.E., Kolganov V.Yu., Safronov V.M., Putrik A.B.** Development of design, manufacture and experimental proof of operational availability of ITER blanket components. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 4, pp. 13—26 (in Russian).
2. **Sviridenko M.N.** Analyses results of the EHF FW panel with welded fingers. — FED, 2014, vol. 89, pp. 937—948.
3. **Danilov I.V., Leshukov A.Yu., Razmerov A.V., Sviridenko M.N., Strebkov Yu.S., Mazul I.V., Gervash A.A., Labusov A.N.** Design development and analysis results for the EHF FW panels of ITER blanket. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2013, vol. 36, issue 1, pp. 17—41 (in Russian).
4. **Nakamichi M., Kawamura H.** Out-of-pile characterization of Al_2O_3 coating as electrical insulator. — FED, 2001, vol. 58—59, pp. 719—723.
5. **Shakhova I. et al.** Thermo-electrical properties of the alumina coatings deposited by different thermal spraying technologies. — Ceramics International, 2017, vol. 43, pp. 15392—15401.
6. **Ulianitsky V. et al.** Computer-controlled detonation spraying: From process fundamentals toward advanced applications. — J. of Thermal Spray Technology, 2011, vol. 20, pp. 791—801.
7. **Sviridenko M.N., Leshukov A.Yu., Razmerov A.V., Tomilov S.N., Parshutin E.V., Strebkov Yu.S.** Mechanical attachment system of the first wall panels in ITER blanket. — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 2, pp. 29—43 (in Russian).
8. **Barabash V.** Materials challenges for ITER — current status and future activities. — J. Nucl. Mater., 2007, vol. 367—370, pp. 21—32.
9. **Hirai T., Barabash V., Escourbiac F., Durocher A., Ferrand L., Komarov V., Merola M.** ITER divertor materials and manufacturing challenges. — FED, 2017, vol. 125, pp. 250—255.
10. **Thompson V., Eaton R., Raffray R., Egorov K.** Properties of low friction anti-seize coatings for fusion applications. — FED, 2019, vol. 146, pp. 345—348.
11. **Leshukov A.Yu., Strebkov Yu.S., Kirillov S.Yu., Makarov S.V., Sviridenko M.N., Parshutin E.V., Khomyakov S.E., Kolganov V.Yu., Tomilov S.N., Trifonova E.V., Solov'ev O.V., Mogilevskiy P.Yu., Safronov V.M., Putrik A.B.** Development of design, manufacture and experimental proof of the ITER blanket components, delivered by JSC «NIKIET». — In coll.: Reports collection of the V International scientific technical conference «Innovative projects and technologies of nuclear energetics», 2—5 October 2018, Moscow, pp. 139—154 (in Russian).
12. **Kolganov V., Poddubnyi I., Timofeev S., Sviridenko M., Razmerov A., Strebkov Yu., Danilov I., Khomiakov S., Parshutin E., Malyshev A., Tagiev R., Putrik A., Safronov V., Egorov K., Eaton R., Raffray R.** Optimization and adjustment of impact set-up for testing of insulated pads of ITER blanket module connectors and first wall. — FED, 2019, Part B, vol. 146, pp. 2474—2478.

AUTHORS

Sviridenko M.N. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; sviridenko@nikiet.ru

Tomilov S.N. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; tomilov@nikiet.ru

Poddubnyi I.I. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; poddubnyii@nikiet.ru

Kolganov V.Yu. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; wlk@nikiet.ru

Tagiev R.A. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; tagil@nikiet.ru

Leshukov A.Yu. Joint Stock Company «N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering» (JSC «NIKIET»), ul. M. Krasnosel'skaya 2/8, 107140 Moscow, Russia; leshu@nikiet.ru

Received 27 September 2019

Revised 27 September 2019

Accepted 30 September 2019

Problems of Atomic Science and Technology

Ser. Thermonuclear Fusion, 2019, vol. 42, issue 4, pp. 72—84