

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИИ И КВАЛИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИХ НАКЛАДОК БЛАНКЕТА ИТЭР

Власов Д.А., Поддубный И.И., Хомяков С.Э., Паршутин Е.В., Трифонова Е.В.,
Чебурова А.В., Козлов С.А., Свириденко М.Н., Соловьев О.В. (АО «НИКИЭТ»,
Москва, Россия), Ульяницкий В.В., Шер Е.С. (ООО «СТЗП», Новосибирск,
Россия), Путрик А.Б. («Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия),
Беляев И.А. (ОИВТ РАН, Москва, Россия),
Беликов А.И. (ООО «Электровакуумные технологии», Москва, Россия)

Введение

Контактные электроизолирующие накладки входят в состав соединителей модулей blankets (СМБ) реактора ИТЭР [1]. Накладки расположены на интерфейсах “панель первой стенки/защитный блок” и “защитный блок/вакуумная камера” и предназначены для восприятия ударных нагрузок, возникающих при срывах плазмы. В рамках соглашения о поставке СМБ, АО «НИКИЭТ» отвечает за изготовление и поставку на площадку ИТЭР порядка 5000 комплектов сборок электроизолирующих накладок.

В рамках программы квалификации в АО «НИКИЭТ» совместно с ООО «СТЗП» (г. Новосибирск) и ООО «Электровакуумные технологии» (г. Москва) изготовлены 20 прототипов межмодульных цилиндрических и призматических накладок модулей blankets, включая элементы крепления и нанесение на изделия электроизолирующего и антифрикционного покрытий.

Программа квалификации контактных электроизолирующих накладок включала в себя ударные испытания, которые проводились совместно с ОИВТ РАН, а также статические циклические испытания, которые проходили в АО «НИКИЭТ». По результатам испытаний подтверждена работоспособность конструкций накладок и сохранение их электроизолирующих свойств, продемонстрирована нецелесообразность нанесения антифрикционного покрытия на контактную сферическую поверхность накладок и шлифовки электроизолирующего покрытия на цилиндрических и конических поверхностях накладок.

По результатам изготовления и испытания накладок в конструкцию и технологию изготовления внесены изменения, позволяющие существенно упростить и оптимизировать технологический процесс и процедуру контроля.

Успешное завершение квалификационных испытаний накладок позволяет перейти к подготовке технической документации для последующего серийного изготовления.

1. Конструкция контактных электроизолирующих накладок

Blanket реактора ИТЭР представляет собой сегментированную конструкцию, состоящую из 440 модулей, установленных вдоль всей внутренней поверхности вакуумной камеры [1]. Модули blankets крепятся к вакуумной камере при помощи четырех гибких механических опор и системы противомоментных ключей. На рисунке 1 показано расположение защитных модулей в вакуумном корпусе и положение накладок на тыльной стороне защитных модулей внутреннего и наружного blankets (рис. 2–3).

Контактные электроизолирующие накладки осуществляют ограничение перемещений модулей blankets относительно ключей вакуумной камеры и воспринимают комбинацию электромагнитных сил, действующих при срыве плазмы, обеспечивая при этом электрическую изоляцию модулей blankets от вакуумной камеры.

Контактные электроизолирующие накладки предполагают несколько типоразмеров в зависимости от конструктивного исполнения МБ:

- призматические накладки;
- призматические накладки модуля 18;
- цилиндрические накладки;
- центрирующие накладки;
- центрирующие накладки модуля 15NDL.

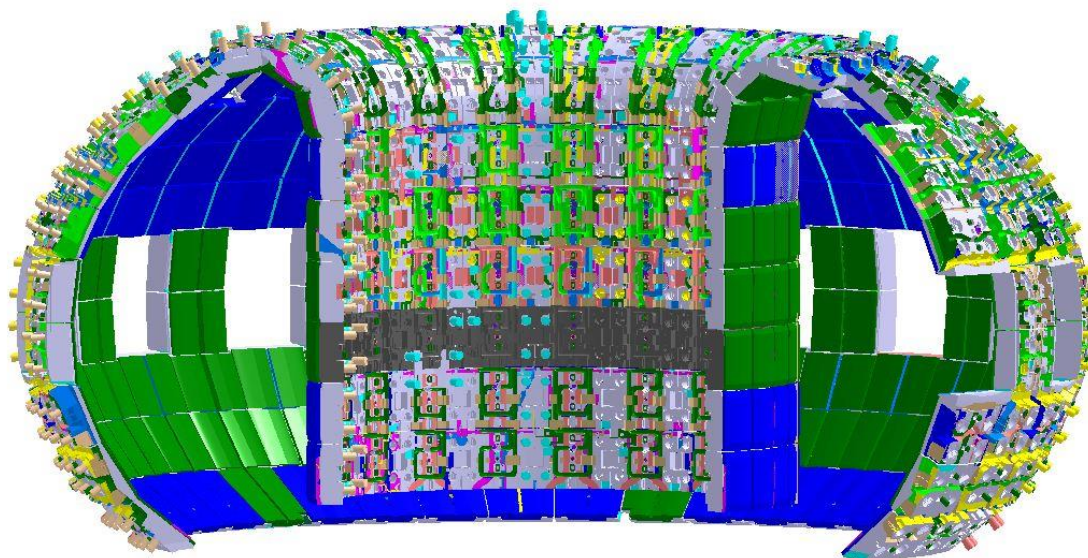


Рис. 1. Расположение модулей blankets реактора ИТЭР

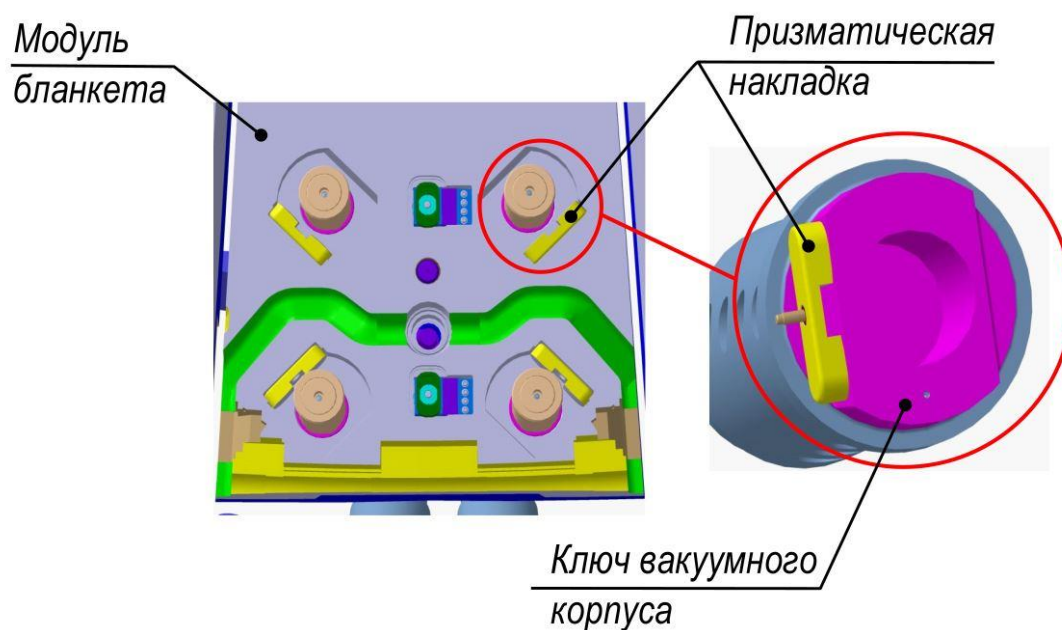


Рис. 2. Призматические накладки внешнего blankets

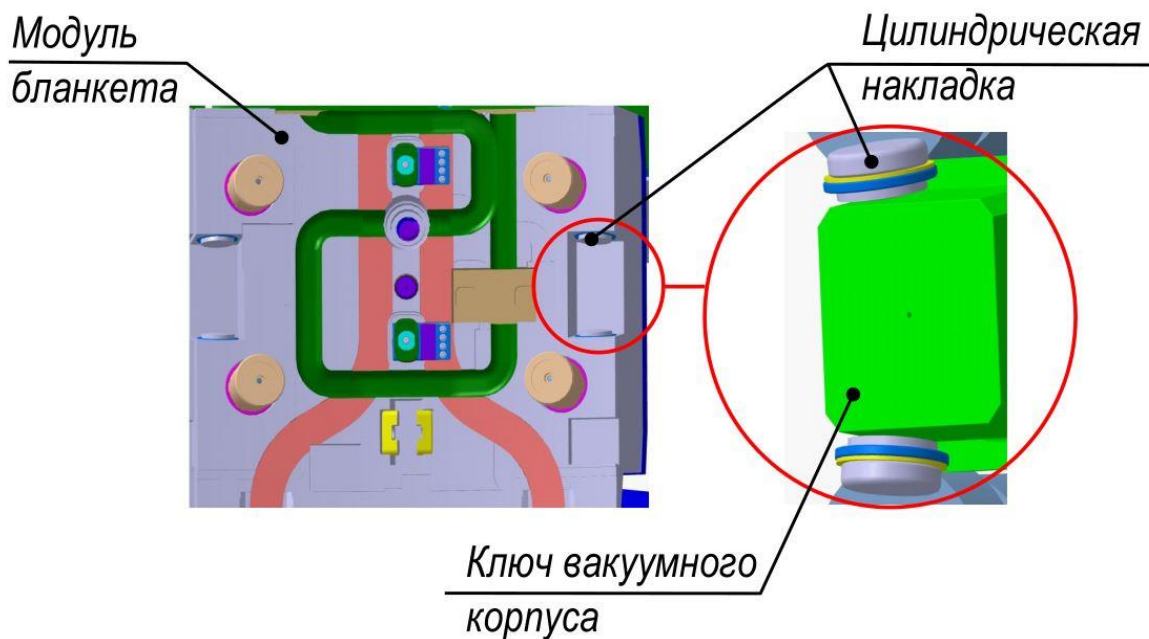


Рис. 3. Цилиндрические накладки внутреннего blankets

В состав сборки призматической накладки (рис. 4) входят накладка и защитная шайба, изготовленные из алюминиевой бронзы [3], и винт из стали марки 316L [4]. На тыльную и боковые поверхности накладки, а также на внешние поверхности защитной шайбы наносится электроизолирующее покрытие (ЭИП) из оксида алюминия Al_2O_3 [5]. Для минимизации возможного износа на сферические контактные поверхности накладки предполагается нанесение антифрикционного покрытия (АФП) из дисульфида молибдена MoS_2 [6]. В призматических накладках имеется центральное отверстие под винт крепления с защитной шайбой. В защитной шайбе выполнены два отверстия для дегазации. Призматические накладки устанавливаются на защитных блоках модулей внешнего blankets ВМ11 – ВМ17. С целью компенсации погрешностей изготовления вакуумной камеры предусмотрена доработка каждой накладки для обеспечения требуемых зазоров между МБ и ВК, необходимых при сборке и работе реактора. Диапазон доработки призматической накладки составляет 25 мм по высоте.

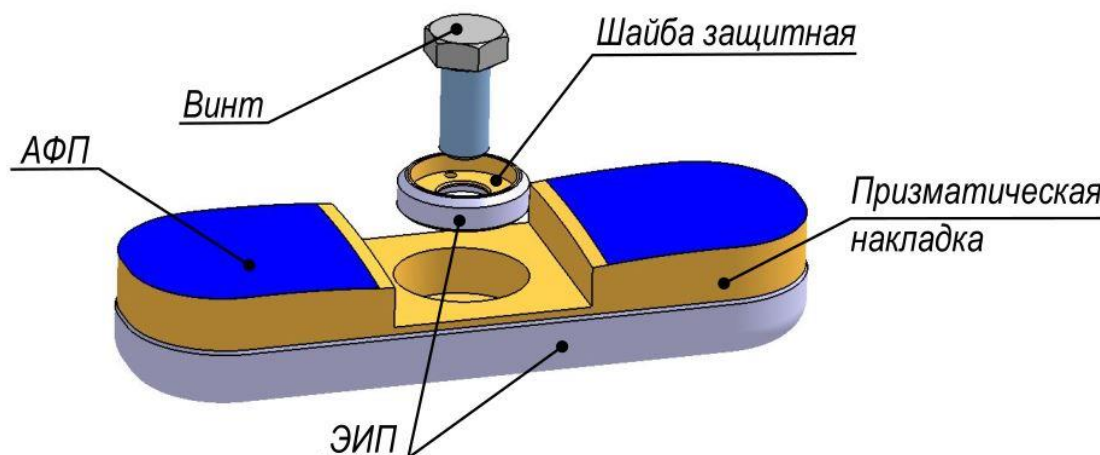


Рис. 4. Призматическая накладка

Узел цилиндрической накладки (рис. 5) включает накладку и резьбовое кольцо, изготовленные из алюминиевой бронзы [3]. ЭИП наносится на тыльную и боковые поверхности накладки, а АФП – на контактную сферическую поверхность.

Цилиндрические накладки устанавливаются на защитных блоках модулей внутреннего blankets ВМ1 – ВМ10. Диапазон доработки призматической накладки составляет 29 мм по высоте.

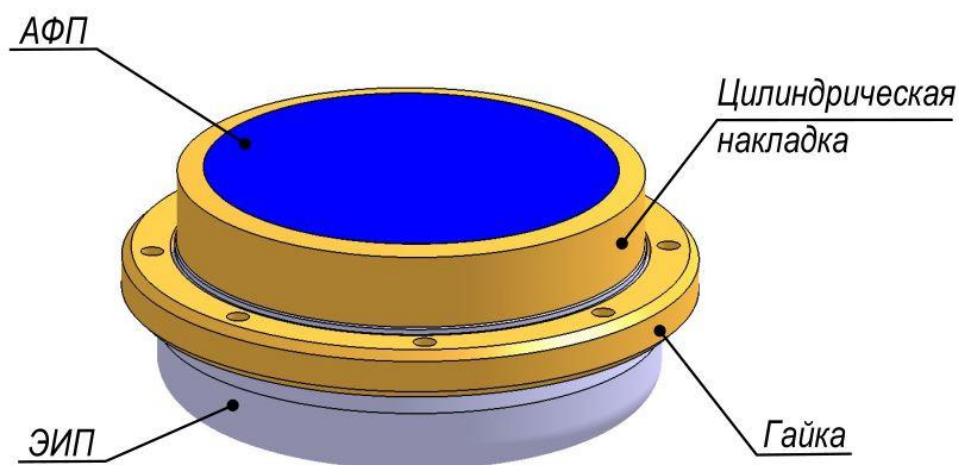


Рис. 5. Цилиндрическая накладка

2. Изготовление квалификационных образцов электроизолирующих накладок

В рамках подготовки к серийному изготовлению и проведению квалификационных испытаний в 2021–2022 годах были изготовлены полноразмерные прототипы цилиндрических и призматических накладок. Процесс производства прототипов осуществляется на трех производственных площадках и состоит из пяти этапов:

- 1) изготовление металлических заготовок выполняется АО «НИКИЭТ» (рис. 6);
- 2) нанесение ЭИП выполняется ООО «Сибирские технологии защитных покрытий». На изготовленные прототипы накладок наносится ЭИП (толщиной $[0,4]_{-(-0,1)}^{}$ мм) методом детонационного напыления (рис. 7);
- 3) шлифовка ЭИП – выполняется АО «НИКИЭТ» (рис. 8);
- 4) доработка накладок по высоте и выполнение сферических поверхностей осуществляется в АО «НИКИЭТ» (рис. 9);
- 5) нанесение АФП выполняется ООО «Электровакуумные технологии». На контактную сферическую поверхность накладок наносится АФП толщиной 6 ± 2 мкм методом физического осаждения в вакууме (магнетронным методом) (рис. 10).



Рис. 6. Металлические заготовки накладок



Рис. 7. Заготовки накладок после нанесения ЭИП



Рис. 8. Заготовки накладок после шлифовки ЭИП



Рис. 9. Накладки после доработки сферической поверхности

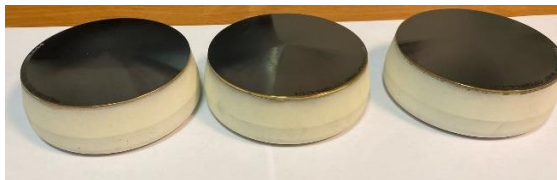


Рис. 10. Накладки после нанесения АФП

Для квалификационных ударных и циклических испытаний было изготовлено по 10 образцов цилиндрических и призматических накладок (5 с максимальным осевым габаритом и 5 с минимальным), чтобы продемонстрировать работоспособность узлов накладок в предельных условиях. АФП было нанесено на 12 накладок каждого типа с максимальным и минимальным осевым габаритом. С целью проведения

сравнительных испытаний, которые должны подтвердить (или опровергнуть) целесообразность использования АФП, на 8 соответствующих накладок покрытие не наносилось.

3. Квалификационные испытания

3.1. Ударные испытания в ОИВТ РАН

Целью ударных испытаний является экспериментальное исследование работоспособности электроизолирующих накладок и стойкости электроизолирующего Al_2O_3 и антифрикционного MoS_2 покрытий в условиях циклических ударных нагрузок, а также сравнение результатов испытаний накладок с АФП и без него.

Испытания проводились Объединенным институтом высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН). Оснастка для динамических испытаний была спроектирована и изготовлена в АО «НИКИЭТ» (рис. 11).

В процессе испытаний продолжительность и амплитуда ударной нагрузки измерялись с помощью динамометра, спроектированного, изготовленного и откалиброванного в АО «НИКИЭТ» и подключенного к измерительной системе ОИВТ РАН.

Параметры испытаний представлены в табл. 1. Профиль ударного воздействия имеет форму, близкую к полусинусоиде, а длительность ударного воздействия не превышает 3 мс, (рис. 12б). Графическое представление сил, действующих на цилиндрическую накладку в течение первых 500 ударов, представлены в виде диаграммы размаха «ящик с усами» на примере цилиндрической накладки на рисунке 12а. Значение медианы силы, зарегистрированное за 500 ударов, составляет 1847 кН. На первых 15 ударах осуществляется подбор параметров удара, поэтому значения силы ниже специфицированных. 97,5% ударов лежит в диапазоне (1740–1907) кН, что соответствует требованиям программы квалификации.

Таблица 1

Требуемые условия нагружения

Категория нагружения	Максимальная сила, кН		Число циклов	Длительность, мс
	Сборка цилиндрической накладки	Сборка призматической накладки		
Категория II	1800±100	1200±100	500	(1–3)
Категория III	2200±100	1500±100	20	(1–3)



Рис. 11. Оснастка для ударных испытаний смонтированная на испытательной площадке ОИВТ РАН

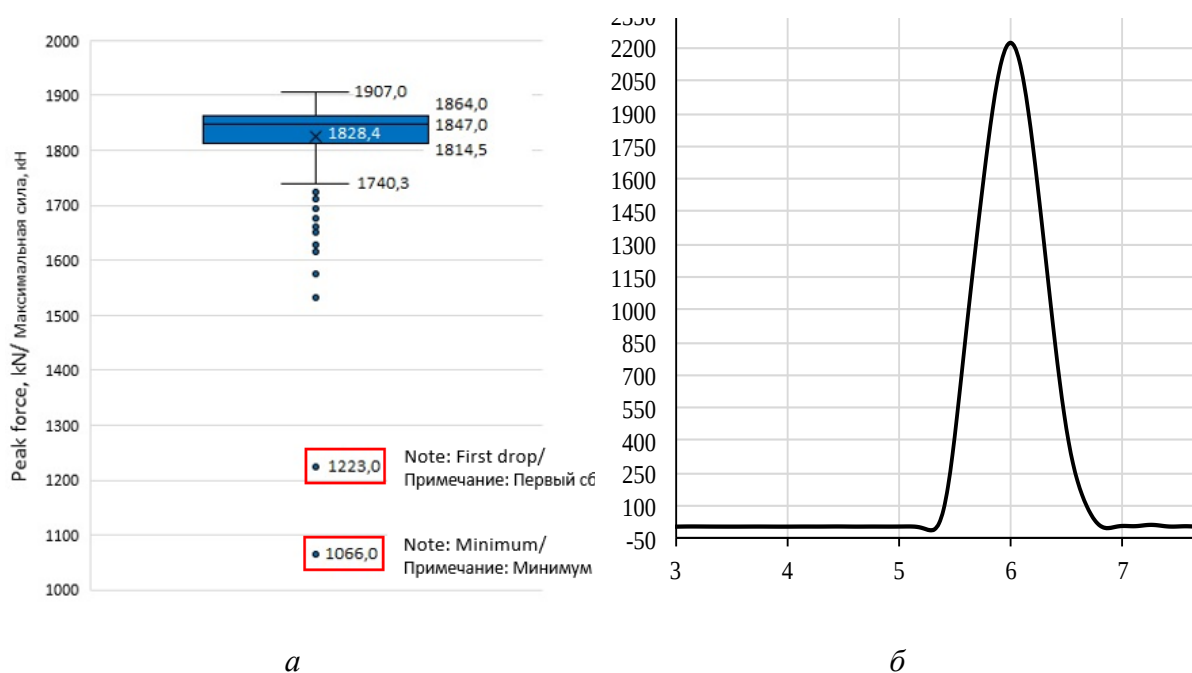


Рис. 12. Параметры ударных испытаний для цилиндрической накладки:
 а – диаграмма размаха «ящик с усами» для первых 500 ударов;
 б – профиль удара на усиленную нагрузку

По результатам испытаний при воздействии циклической ударной нагрузки нарушения целостности ЭИП не зафиксировано. Электрический пробой также не зафиксирован ни в одном из испытаний.

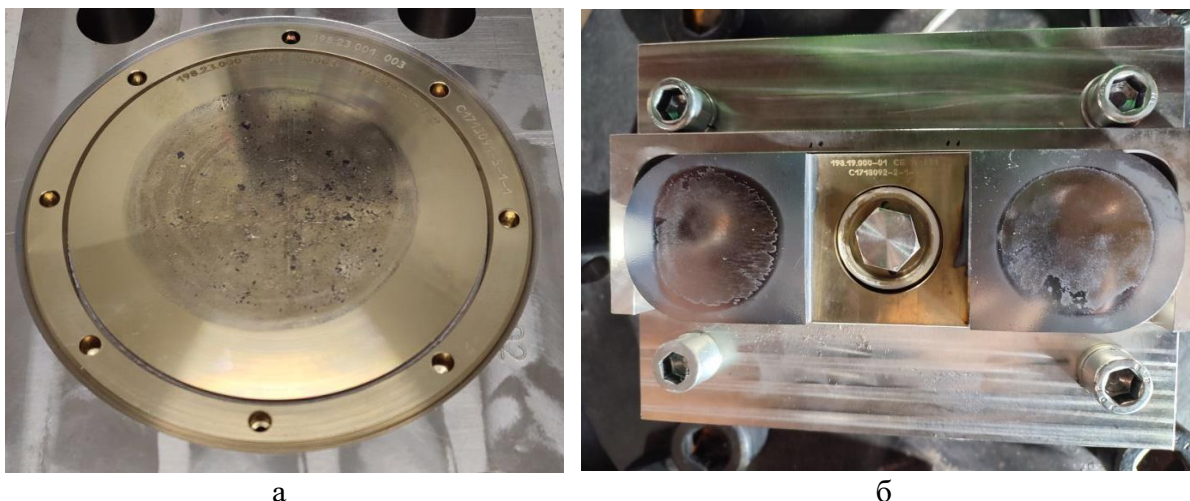


Рис. 13. Электроизолирующие накладки с покрытиями различного функционального назначения в сборе после испытаний:

а – сборка цилиндрической накладки без АФП; б – сборка призматической накладки;

Сопоставление результатов испытаний накладок показывает, что величина шероховатости сферической контактной поверхности накладок с АФП и без него находилась на одном уровне, что делает нецелесообразным нанесение АФП на сферическую контактную поверхность. До испытаний шероховатость сферических поверхностей на накладках составляла Ra (1–1,5), после испытаний Ra (0,3–0,6). На рисунке 13 представлены сборки цилиндрической накладки без АФП и призматической накладки с АФП после полного цикла ударных испытаний.

3.2. Циклические статические испытания в АО “НИКИЭТ”

Все накладки были испытаны в АО “НИКИЭТ” на испытательной машине Instron 8806. В испытаниях участвовало одновременно две накладки, которые устанавливались в обоймах (рис. 14). Обоймы располагаются под углом 30° на центральном клине оснастки (рис. 15). Такое расположение накладок позволило реализовать проектное соотношение нормальных и касательных нагрузок на накладках [1].

Параметры испытаний представлены в табл. 2–3.



Рис. 14. Электроизолирующие накладки с покрытиями различного функционального назначения в сборе:

а – сборка цилиндрической накладки; б – сборка призматической накладки;

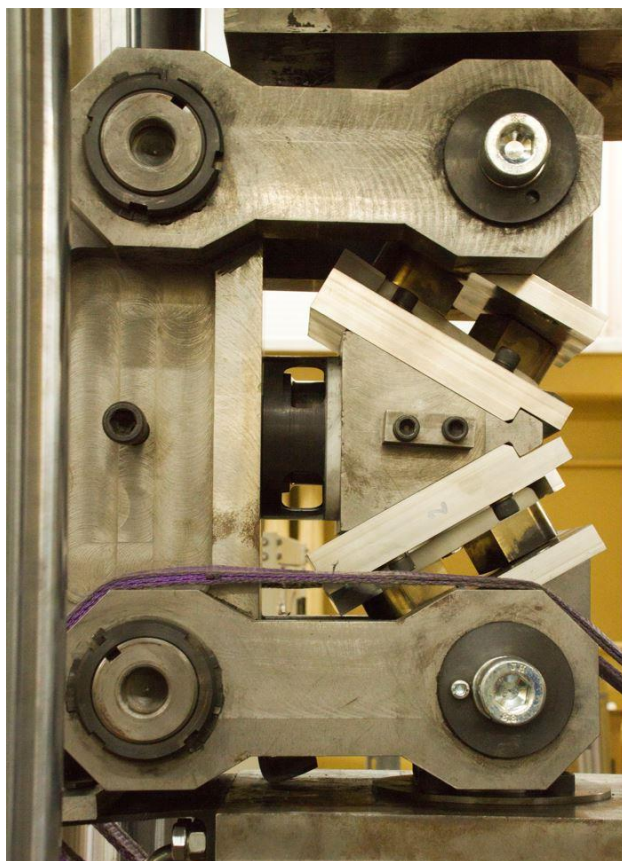


Рис. 15. Испытательная оснастка в сборе

Таблица 2

Параметры статических испытаний для категории нагружения II

Параметры	Значение	
	Цилиндрические накладки	Призматические накладки
Тип нагружения	Циклическое сжатие	
Максимальная циклическая сила, кН	1500	1000
Период, с	3–15	
Время нарастания/снижения нагрузки, с	1–5	
Число циклов	8000	

Таблица 3

Параметры статических испытаний для категории нагружения III

Параметры	Значение	
	Цилиндрические накладки	Призматические накладки
Тип нагружения	Ступенчатое сжатие	
Максимальная циклическая сила, кН	От 1000 до 1750	От 1000 до 1200
Шаг нарастание силы, кН	125	50
Длительность шага нагружения, с	50	
Число циклов	20	

Характерные диаграммы нагружения и общий вид сборок опытных образцов после 8000 циклов испытаний на примере цилиндрической и призматической накладок представлены на рис. 15–18.

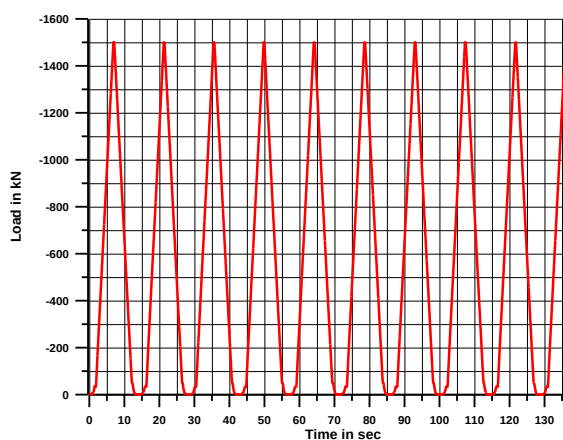


Рис. 15. Диаграмма «Сила от времени» для цилиндрической накладки

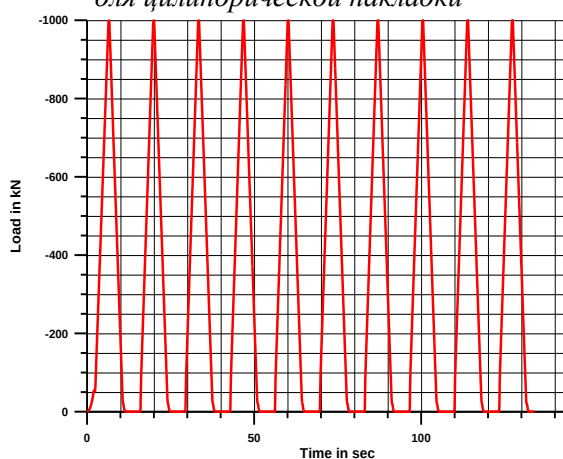


Рис. 17. Диаграмма «Сила от времени» для призматической накладки



Рис. 16. Сборка цилиндрической накладки после 8000 циклов испытаний



Рис. 18. Сборка призматической накладки после 8000 циклов испытаний

По результатам статических циклических испытаний нарушения целостности ЭИП не зафиксировано, электрическое сопротивления сборок накладок составляет не менее 50 МОм.

АФП после циклических испытаний местами стерто. На контактной поверхности накладок зафиксированы следы износа. До испытаний шероховатость сферических поверхностей на накладках составляла $Ra\ 1,5$, после испытаний $Ra\ 4$, в некоторых местах шероховатость достигала $Ra\ 10$. На поверхности нажимных пластин зафиксировано наличие смеси из частиц АФП и бронзы (конструкционный материал накладок). По результатам статических циклических испытаний, учитывая результаты ударных испытаний, предложено отказаться от нанесения АФП на контактные поверхности. Целесообразность данного решения подтверждается результатами испытаний накладок без АФП на сферах, для которых наблюдается тот же уровень шероховатости порядка $Ra\ 4$ на контактных поверхностях.

Заключение

1. В рамках программы квалификации электроизолирующих накладок в АО «НИКИЭТ» при поддержке ООО «СТЗП» и ООО «Электровакуумные технологии» изготовлено по 10 опытных образцов призматических и цилиндрических накладок.
2. В АО «НИКИЭТ» и ОИВТ РАН успешно проведены статические циклические и ударные испытания накладок.
3. Электрическое сопротивление сборок накладок до и после испытаний составляет не менее 50 МОм. Целостность ЭИП на всех накладках сохраняется. Отсутствуют сколы, трещины и отслоение ЭИП.
4. АФП на сферических контактных поверхностях накладок после испытаний местами отсутствует. Зафиксированы следы износа основного материала накладок. Наблюдался перенос бронзы с накладок на нажимные пластины. На поверхностях нажимных пластин и сферических поверхностях накладок образовалась смесь из частиц антифрикционного покрытия и бронзы. Целесообразность нанесения АФП на данный момент является дискуссионной.
5. По результатам изготовления и испытания накладок в конструкцию и технологию изготовления внесены изменения, позволяющие существенно упростить и оптимизировать технологический процесс и процедуру контроля.
6. Успешное завершение квалификационных испытаний накладок позволяет перейти к подготовке технической документации для последующего серийного изготовления.

Работы выполнены в рамках государственных контрактов с ГК «Росатом» от 11.05.2021 г. № Н.4а.241.19.21.1038, от 14.02.2022 г. № Н.4а.241.19.22.1123 и от 18.01.2023 г. № Н.4а.241.19.23.1014.

Список литературы

1. S. Khomiakov, I. Poddubnyi, V. Kolganov, A. Zhmakin, E. Parshutin, I. Danilov, Yu. Strebkov, K. Skladnov, D. Vlasov, A. Cheburova, A. Romannikov, R. Raffray, K. Egorov, Ph. Chappuis, S. Sadakov, B. Calcagno, R. Roccella. ITER blanket module connectors. Design, analysis and testing for procurement arrangement // Fusion Engineering and Design 109–111 (2016). P. 261–266;
2. Mario Merola, Frederic Escourbiac, Alphonse Rene Raffray, Philippe Chappuis, Takeshi Hirai, Stefan Gicquel. Engineering challenges and development of the ITER Blanket System and Divertor // Fusion Engineering and Design. 2015. P 34–41;
3. V. Barabash, A. Pokrovsky, S. Fabritsiev. The effect of low-dose neutron irradiation on mechanical properties, electrical resistivity and fracture of NiAl bronze for ITER // Journal of Nuclear Materials. 2007. V. 367–370. P. 1305–1311;
4. T. Hirai, V. Barabash, F. Escourbiac, A. Durocher, L. Ferrand, V. Komarov, M. Merola. ITER divertor materials and manufacturing challenges // Fusion Engineering and Design. 2017. P. 250–255;
5. Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С., Штерцер А.А. Детонационные покрытия из оксидов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. №9. С. 37–44;
6. Vaughan Thompson, Russell Eaton, Rene Raffray, Konstantin Egorov. Properties of low friction anti-seize coating for fusion applications // Fusion Engineering and Design. 2019. V. 146 P. 345–348.