

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИСПЫТАНИЯ ПОСТАВОЧНЫХ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ БЛАНКЕТА ИТЭР

Власов Д.А., Козлов С.А., Лешуков А.Ю., Могилевский П.Ю., Стребков Ю.С., Свириденко М.Н., Паршутин Е.В., Поддубный И.И., Хомяков С.Э., Томилов С.Н., Трифонова Е.В., Соловьев О.В., Чебурова А.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),
Путрик А.Б. (ЧУ «Проектный Центр ИТЭР», Москва, Россия)

Введение

АО «НИКИЭТ» участвует в реализации проекта ИТЭР в рамках двух Соглашений о поставке внутрикамерного оборудования, подписанных в 2014 году: Соглашение о поставке панелей первой стенки (ППС) и Соглашение о поставке Соединителей модуля blankets (СМБ).

Соглашение о поставке соединителей модулей blankets АО «НИКИЭТ» выполняет как основной поставщик 100 % изделий, входящих в поставочный комплект. Одновременно, в рамках соглашения о поставке теплонапряженных ППС на площадку ИТЭР, АО «НИКИЭТ» принимает участие в изготовлении и поставке 40 % элементов ППС (179 штук). Данное Соглашение о поставке реализуется совместно с АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова».

В зоне ответственности АО «НИКИЭТ» находится разработка конструкций, расчетное и экспериментальное обоснования, а также изготовление полномасштабных квалификационных прототипов внутрикамерных компонентов и поставочного оборудования.

В период 2016–2018 гг. выполнена подготовка предпроизводственной документации и начато серийное изготовление биметаллических пьедесталов электрического соединителя (ЭС).

С 2017 по 2019 г. выполнена подготовка предпроизводственной документации и начата квалификация основных критических технологических процессов, используемых при изготовлении поставочных изделий.

В 2020 году начато изготовление полномасштабных прототипов компонентов ППС и соединителей модулей blankets. А с 2022 года начато серийное изготовление компонентов панелей первой стенки и соединителей модулей blankets.

Данный доклад обобщает результаты работ АО «НИКИЭТ» по соглашениям о поставке внутрикамерного оборудования, выполненных в период 2017–2022 годы.

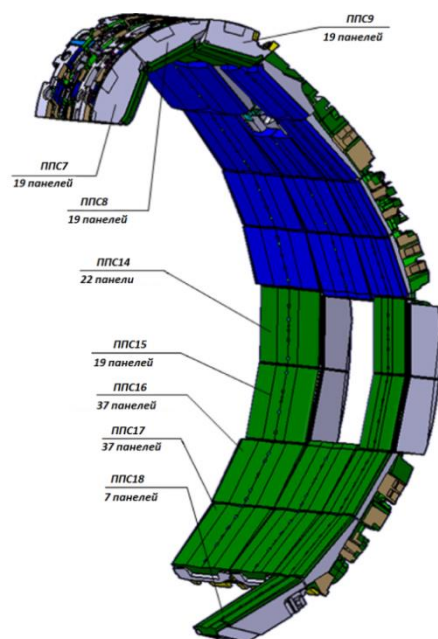
1. Соглашение о поставке теплонапряженных панелей первой стенки

1.1. Описание поставочного комплекта

Соглашение о поставке ППС подписано 13 февраля 2014 года. ППС является теплонапряженным компонентом системы blankets, обращенным к плазме и механически закрепленным на защитном блоке (ЗБ) с помощью системы крепления (СК). Теплонапряженная ППС способна воспринимать тепловой поток до 4.7 МВт/м^2 , действующий из плазмы [1]. АО «НИКИЭТ», совместно с АО «НИИЭФА», изготавливают и поставляют 179 ППС, включая запасные ППС по одной для каждого ряда. ППС, входящие в поставочный комплект, представлены на рисунке 1.

По результатам оптимизации размеров ППС, выполненной в 2022 году, уменьшено количество дополнительных вариантов ППС до 14 и количество основных вариантов до 13 типоразмеров (рисунок 1). Конструкция дополнительных вариантов исполнения ППС отличается от основного варианта наличием дополнительных технологических проходов и пазов под размещение диагностического оборудования.

Каждая ППС является сборочной единицей, включающей теплонапряженные компоненты, обращенные к плазме (пальцы ПС), несущую конструкцию первой стенки (НКПС), СК ППС к ЗБ и систему электрической связи.



Ряд	Количество ППС в поставочном комплекте		
	Основной вариант исполнения	Дополнительный вариант исполнения	с учетом запасных частей
ППС 14	тип А (13 шт.)	тип AND (1 шт.)	22
	тип NDL (1 шт.)	тип ADL (1 шт.)	
	тип NE (1 шт.)	тип ND (2 шт.)	
		тип NC (2 шт.)	
ППС 7	тип А (13 шт.)	тип AR (1 шт.), тип В (5 шт.)	19
ППС 8	тип А (15 шт.)	тип В (4 шт.)	19
ППС 9	тип А (18 шт.)	-	19
ППС 15	тип А (11 шт.)	тип AND (1 шт.)	19
	тип S (3 шт.)	тип ADL (1 шт.)	
	тип NE (1 шт.)	тип NC (1 шт.)	
		тип NCA (1 шт.)	
ППС 16	тип AD (12 шт.)	тип А (20 шт.)	37
	тип S (3 шт.)	тип AICH (2 шт.)	
ППС 17	тип А (36 шт.)	-	37
ППС 18	тип E (3 шт.)	тип В (3 шт.)	7
Всего			179

Рис. 1. Количество и расположение ППС, входящих в поставочный комплект

1.2. Описание конструкции панели первой стенки

В 2016–2017 годах разработана конструкция ППС с использованием технологии орбитальной сварки кольцевых швов патрубков при монтаже сборок пальцев ПС на НКПС [1]. Каждая сборка представляет собой пару пальцев ПС, соединенных 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 сварочного оборудования при финальном монтаже модулей пальцев, при этом соединение с НКПС обеспечивается посредством фрезерованных переходников (2 шт. на один модуль), позволяющих компенсировать погрешности изготовления посредством доработки стыкового соединения перед сваркой. Общий вид ППС тип 14 А представлен на рисунке 2. Крепление пальцев ПС к НКПС реализовано с помощью болтового соединения в периферийной части НКПС и клинового соединения в центральной (рисунок 3).

В период 2018–2022 гг. на базе конструкции ППС ряда 14 тип А разработаны конструкции ППС 17 тип А, нестандартных ППС 14 тип NC и тип NE, расположенных в зоне внешнего blankets [2–3], ППС 8 тип А и 9 тип А, расположенные в зоне потолочного свода вакуумного корпуса (ВК) реактора ИТЭР.

Следует отметить, что в связи со сложной геометрической конфигурацией ППС 8 тип А и ППС 14 тип NC и тип NE применение конструкторских решений ППС 14 тип А невозможно без дополнительной адаптации конструкторских решений непосредственно к каждому типоразмеру ППС.

Конструкции ППС 17 тип А и 9 тип А были доработаны в зоне расположения патрубков с учетом требований доступа сварочного оборудования и геометрических особенностей панелей. Так, для ППС 17 тип А угол наклона патрубков относительно горизонтали составляет 15°, при этом для ППС 9 тип А патрубки удалось расположить горизонтально. Одновременно выполнена оптимизация каналов в центре НКПС для обеспечения отвода тепла, вызванного тепловым излучением плазмы.

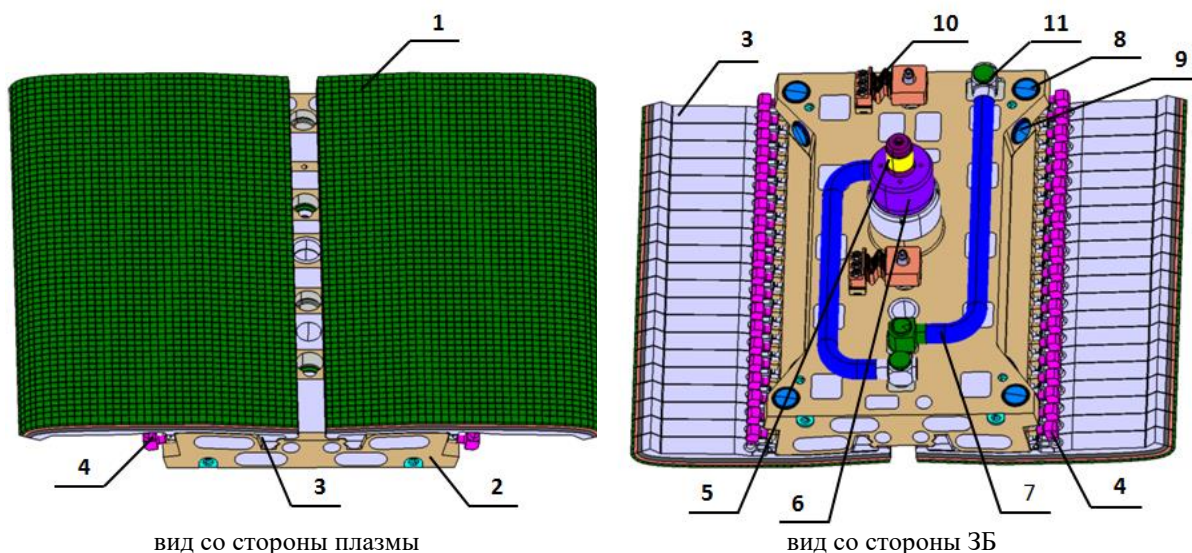


Рис. 2. Общий вид ППС 14 тип А:

1 – защитное покрытие; 2 – НКПС; 3 – пальцы ПС; 4 – перепускные патрубки; 5 – болт СК;
6 – резьбовой стакан СК; 7 – патрубок подвода теплоносителя; 8 – радиальные КЭИН;
9 – полоидальные КЭИН; 10 – ЭС; 11 – патрубок отвода теплоносителя

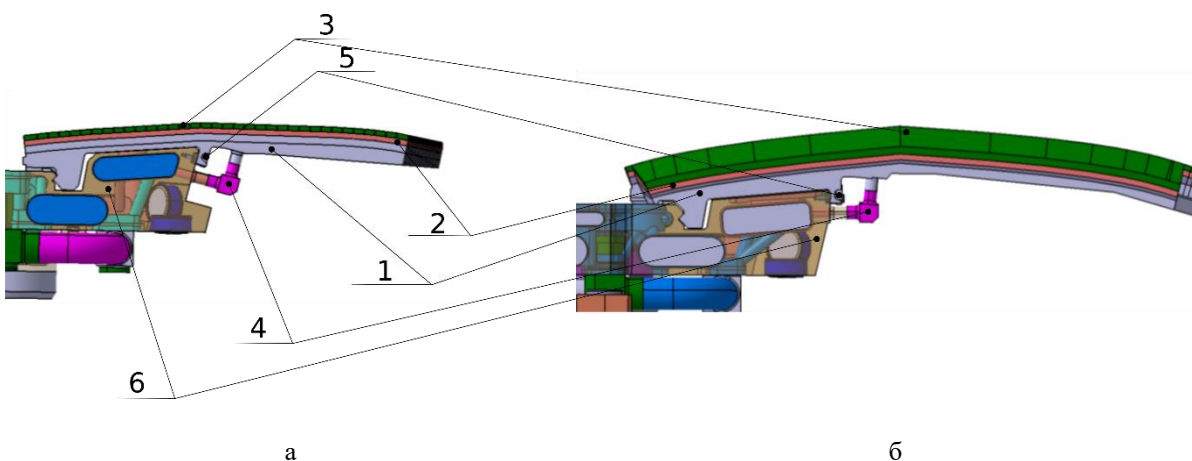


Рис. 3. Механическое крепление «Палец / НКПС» для ППС 9 и 17:

1 – несущая конструкция «пальца»; 2 – теплопроводящий слой; 3 – защитное покрытие;
4 – L-образная (подводящая/отводящая) трубка теплоносителя;
5 – система крепления пальцев ППС; 6 – НКПС

Отдельное внимание следует уделить ППС 14 тип NE, расположенной в зоне экваториального порта, в следствии чего, имеющей сложную и не регулярную геометрическую структуру, не позволяющую использовать решения, принятые для квалификационного прототипа ППС в полном объеме.

Общий вид разработанной ППС 14 тип NE представлен на рисунке 4. Так же, как и в полномасштабном прототипе предполагается использование механического крепления пальцев ПС. Для обеспечения ремонтпригодности патрубки гидравлического соединения наклонены в сторону ЗБ на 10° от горизонтали. В связи с существенными отличиями формы НКПС ППС 14 тип NE от квалификационного прототипа ППС (14 тип А), потребовалась значительная модификация системы охлаждения. Общий вид ППС 14 тип NE представлен на рисунке 4.

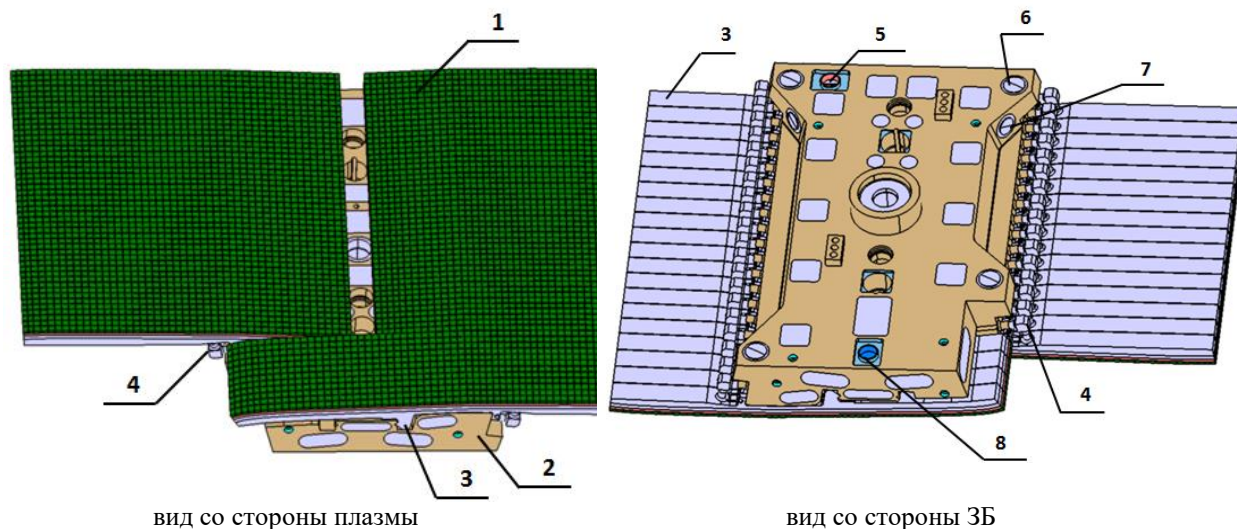


Рис. 4. Общий вид ППС 14 тип NE:

1– защитное покрытие; 2– НКПС; 3 – пальцы ПС; 4– перепускные патрубки; 5 – выходная камера; 6 – радиальные КЭИН; 7 – полоидальные КЭИН; 8 – входная камера

В свою очередь, для ППС 14 тип NC и 8 тип А потребовался пересмотр конфигурации системы охлаждения в силу наклона патрубков подвода/отвода теплоносителя к пальцам ПС по аналогии с ППС 17 тип А, что повлекло перенос камер повода теплоносителя с тыльной поверхности НКПС на фронтальную. Общие виды ППС 8 тип А и 14 тип NC представлены на рисунках 5 и 6 соответственно, а общие виды НКПС 14 тип А и NC, а также 8 тип А показаны на рисунке 7.

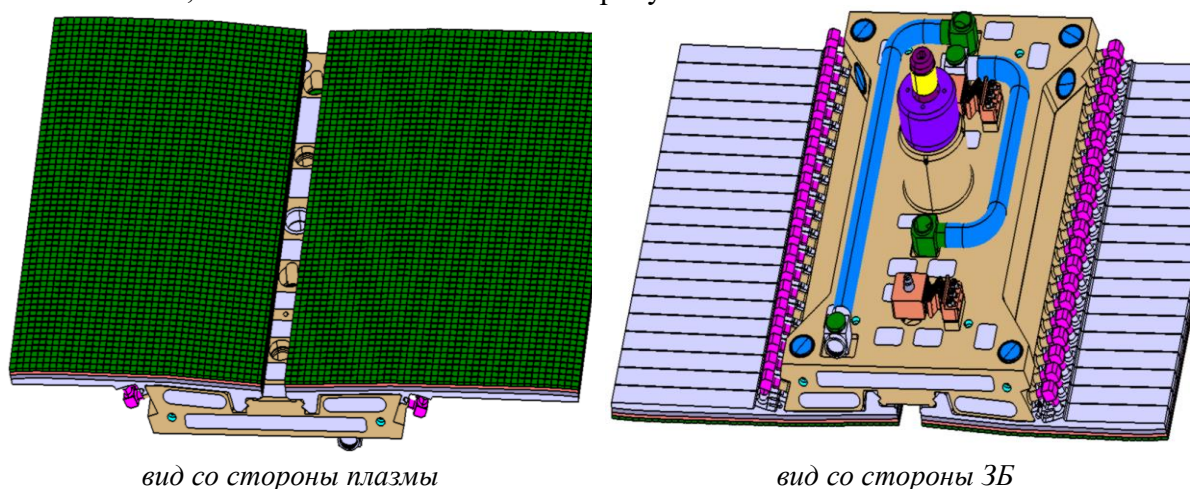


Рис. 5. Общий вид ППС 14 тип NC

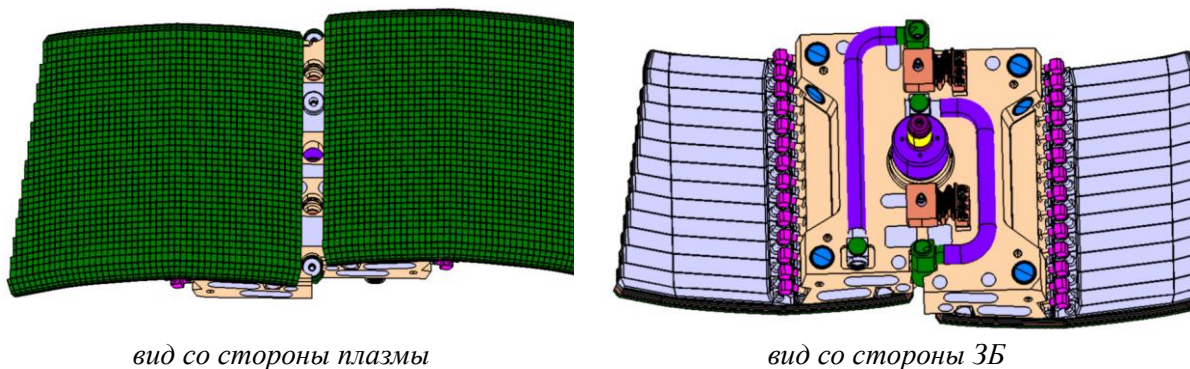


Рис. 6. Общий вид ППС 8 тип А

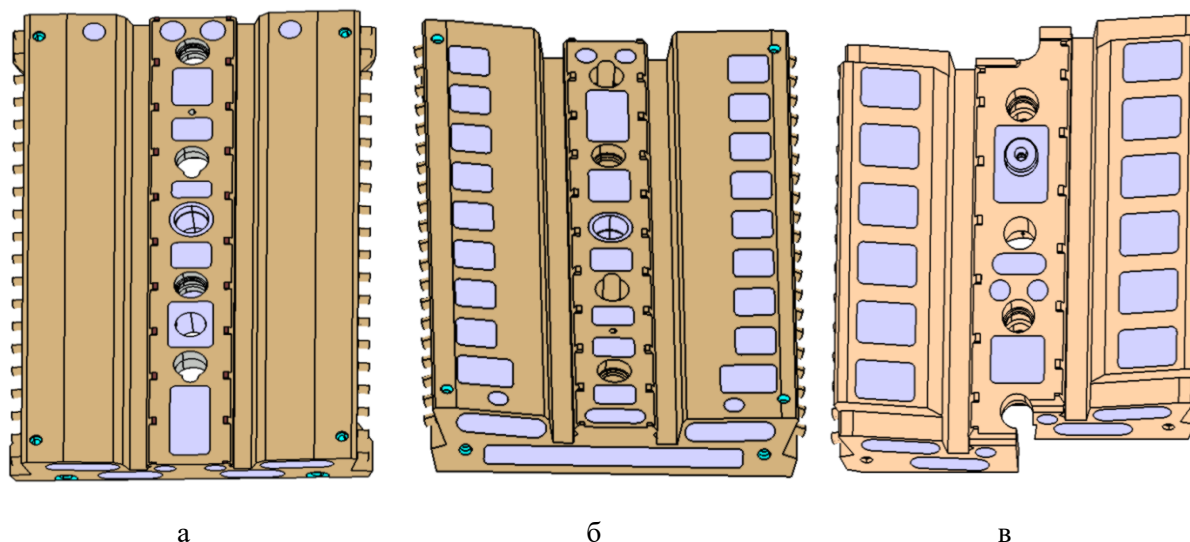


Рис. 7. Общий вид НКПС
 а – ППС 14 мм А; б – ППС 14 мм NC; в – ППС 8 мм А

АО «НИКИЭТ» осуществляет изготовление и поставку в АО «НИИЭФА» следующих компонентов для финальной сборки ППС: корпусов пальцев ПС, НКПС. Элементы СК и электрических соединителей поставляются непосредственно на площадку МО ИТЭР.

Корпуса пальцев ПС представлены на рисунке 8. Каждый корпус пальца ПС включает заготовку корпуса и крышку обратного канала. Приварка крышки обратного канала к корпусу пальца выполняется лазерной сваркой. С целью устранить влияние сварочных деформаций на размеры профиля под последующую приварку биметаллической крышки (316L(N)-IG/CuCrZr) специалистами АО «НИИЭФА» уменьшена толщина сварного шва крышки обратного канала и предусмотрена финишная механическая обработка.

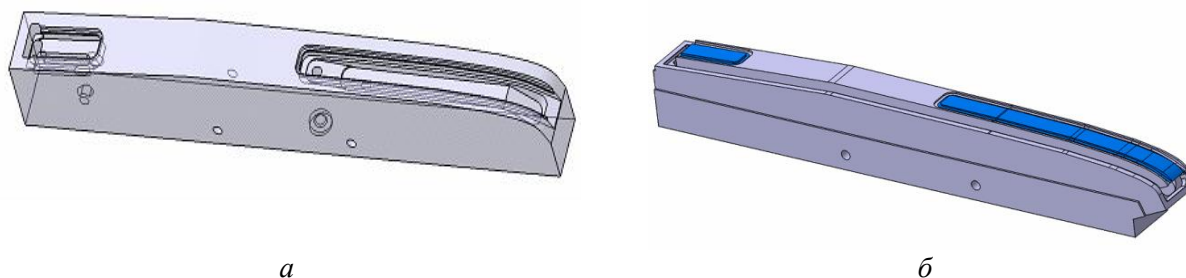


Рис. 8. Корпус пальца ППС:
 а – заготовка корпуса пальца под сварку; б – корпус пальца после приварки крышки обратного канала и финальной механической обработки

СК ППС включает восемь контактных электроизолирующих накладок (КЭИН) и резьбовой стакан с установленным центральным болтом и электроизоляционной и сферической шайбами (рисунок 9).

Полоидальные КЭИН размещены на наклонных поверхностях двутавровых полок НКПС и предназначены для восприятия радиального крутящего момента, при этом четыре радиальных КЭИН размещены на тыльной (обращенной к ЗБ) поверхности НКПС и предназначены для восприятия полоидального крутящего момента. Фиксация КЭИН в цилиндрическом пазе НКПС выполняется гайкой, изготовленной из алюминиевой бронзы (Ni-Al Bronze) [4].

Для обеспечения электрической изоляции НКПС от ЗБ, боковая коническая и тыльная поверхности КЭИН защищены электроизоляционным покрытием (ЭИП), выполненным методом газотермического напыления [5–6].

Для компенсации погрешностей изготовления КЭИН и НКПС в конструкцию добавлен диск с возможностью доработки, что позволяет отказаться от трудоемкого процесса шлифовки боковой поверхности покрытия, и компенсировать отклонения от положения КЭИН в радиальном направлении в пределах 3 мм.

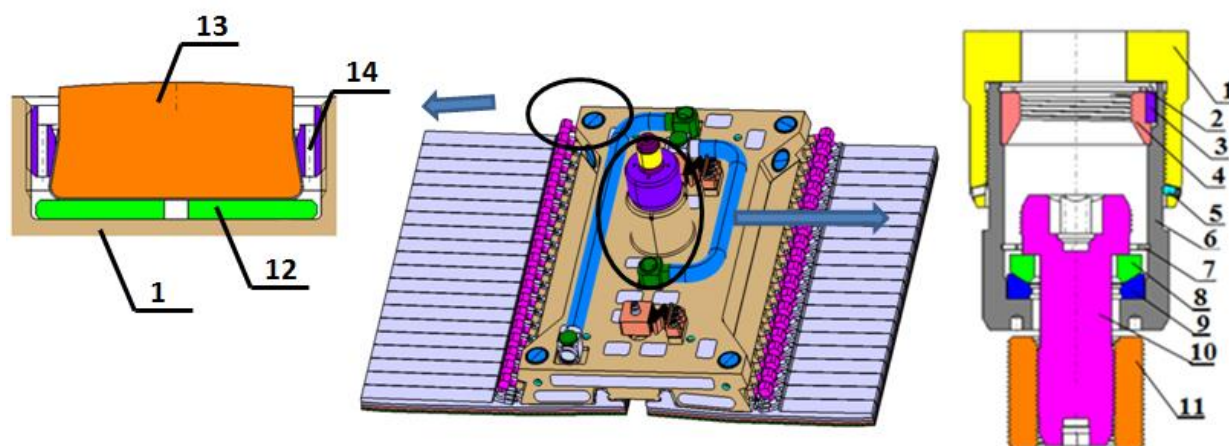


Рис. 9. Общий вид СК ППС:

1 – НКПС; 2 – стопорное кольцо; 3 – шпонка; 4 – парковочная втулка; 5–стопорный винт; 6– стакан; 7– стопорное кольцо; 8–сферическая шайба; 9–коническая шайба с ЭИП; 10–болт, 11– резьбовая втулка защитного блока; 12 – диск; 13– КЭИН; 14 – фиксирующая гайка

Для обеспечения протекания тока при срывах плазмы от ППС к ЗБ в конструкции ППС предусмотрены ЭС [1]. Подробная информация о ЭС представлена в работе [7].

В соответствии с пересмотренной стратегией изготовления элементов СК для теплонапряженных ППС АО «НИКИЭТ» будет изготавливать только КЭИН с элементами крепления общим количеством 3968 комплектов, при этом сборка стакана (~ 1770 изделий) будет изготовлена Европейским союзом и Китаем. Данные изменения коснулись и ЭС, а именно, по достигнутой договоренности АО «НИКИЭТ» будет изготавливать два типоразмера ЭС с 10 ТВЛ и 14 ТВЛ в количестве 571 шт. и 416 шт. соответственно. В свою очередь элементы крепления ЭС будут изготовлены также Европейским союзом и Китаем. Пересмотренная МО ИТЭР стратегия поставки стандартных изделий позволила АО «НИКИЭТ» уменьшить количество типоразмеров элементов СК и электрической связи, подлежащих изготовлению в рамках Соглашения о поставке теплонапряженных панелей первой стенки.

2. Соглашение о поставке соединителей модулей blankets

2.1. Описание поставочного комплекта

АО «НИКИЭТ» является ответственным за изготовление и испытания СМБ для 440 МБ [1]. В поставочный комплект входят следующие компоненты и сборки:

- Гибкая механическая опора (ГО) в сборе – 2109 комплектов;
- КЭИН межмодульных полоидальных (866 шт.) и центрирующих ключей (425 шт.) с элементами крепления;
- КЭИН ключей, расположенных на внутренней стенке ВК в зоне внешнего blankets, с элементами крепления (1067 шт.);
- КЭИН межмодульных центрирующих ключей МБ 4 (8 шт.) с элементами крепления;
- ЭС с элементами крепления и биметаллический пьедестал ВК (1052 комплекта)

2.2. Описание конструкции компонентов Соединителей модулей blankets

ГО устанавливается на тыльной поверхности ЗБ и используется для крепления модуля blankets (МБ) на внутренней стенке ВК. МБ использует 4 сборки ГО. Конструкция ГО позволяет закрепить МБ на внутренней стенке ВК, при этом компенсируя тепловое расширение МБ. Основными элементами конструкции являются: картридж, центральный болт, коническая гайка и втулка, сферическая и коническая шайбы. В 2019–2020 годах выполнена оптимизация конструкции узла, позволившая упростить и удешевить процесс изготовления, путем отказа от электроэрозионной обработки пазов гибкого картриджа в пользу механической обработки, за счет увеличения ширины паза с 2 мм до 10 мм, упрощения конфигурации болта. В конструкцию узла введена система шайб с одновременной корректировкой системы фиксации болта в парковочном положении, что позволило увеличить возможный диапазон доработки фланца картриджа по углу до 2°. Для обеспечения электрической изоляции на внешнюю поверхность конической гайки и торец конической втулки газотермическим способом нанесено ЭИП. Узел ГО после модификации представлен на рисунке 10.

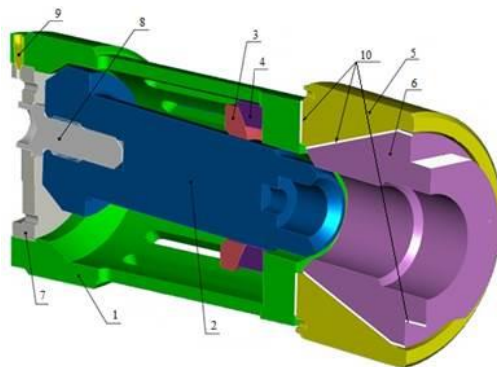


Рис. 10. Общий вид ГО в сборе:

1 – картридж; 2 – болт центральный; 3 – шайба сферическая; 4 – шайба коническая; 5 – втулка конусная; 6 – гайка конусная; 7 – крышка; 8 – палец; 9 – винт крепления; 10 – ЭИП

Конструкционный материал гибкого картриджа, сферической и конической шайб – сплав 718 [4]. Сталь марки 1.4980 (Grade 660) [4] используется в качестве конструкционного материала болта и конической гайки, коническая втулка выполнена из алюминиевой бронзы, крышка и палец изготавливаются из стали 316L.

Для исключения схватывания в резьбовом соединении «болт/коническая гайка» с целью обеспечения возможности монтажа/демонтажа модулей blankets (МБ), а также уменьшения коэффициента трения в резьбе при затяжке болта ГО в конструкцию введено антисхватывающее/уменьшающее трение покрытие на базе MoS₂ [8].

Для восприятия радиальных, полоидальных и тороидальных моментов, действующих на МБ при срывах плазмы, в конструкцию МБ введены КЭИН. Конфигурация КЭИН была также оптимизирована, а именно изменена конфигурация СК призматических и цилиндрических КЭИН, увеличены радиусы боковой поверхности призматических КЭИН. Два типа КЭИН используются в конструкции СМБ: цилиндрические и призматические. Общие виды КЭИН различных вариантов исполнения представлены на рисунке 11. Все конструкции КЭИН являются изготавливаемыми по месту в целях компенсации поводок ВК. На рисунке 11 показаны КЭИН с максимальной и минимальной высотой.

В качестве конструкционного материала КЭИН используется алюминиевая бронза. Следует отметить, что на рабочей поверхности КЭИН выполнена сфера радиусом 300 мм. Для обеспечения электрической изоляции ЗБ от ВК боковая и тыльная поверхности КЭИН защищены ЭИП [5–6] (поверхности отмечены желтым на рисунке

11). Для уменьшения сдвиговых сил, действующих на КЭИН, на сферическую поверхность нанесено уменьшающее трение покрытие на базе MoS₂ [7] (поверхности отмечены синим на рисунке 11).

В силу геометрических особенностей МБ 15, призматические и цилиндрические КЭИН конструктивно отличаются по исполнению, по сравнению с КЭИН, применяемыми для остальных МБ. Общий вид КЭИН МБ 15 после оптимизации также представлен на рисунке 11.

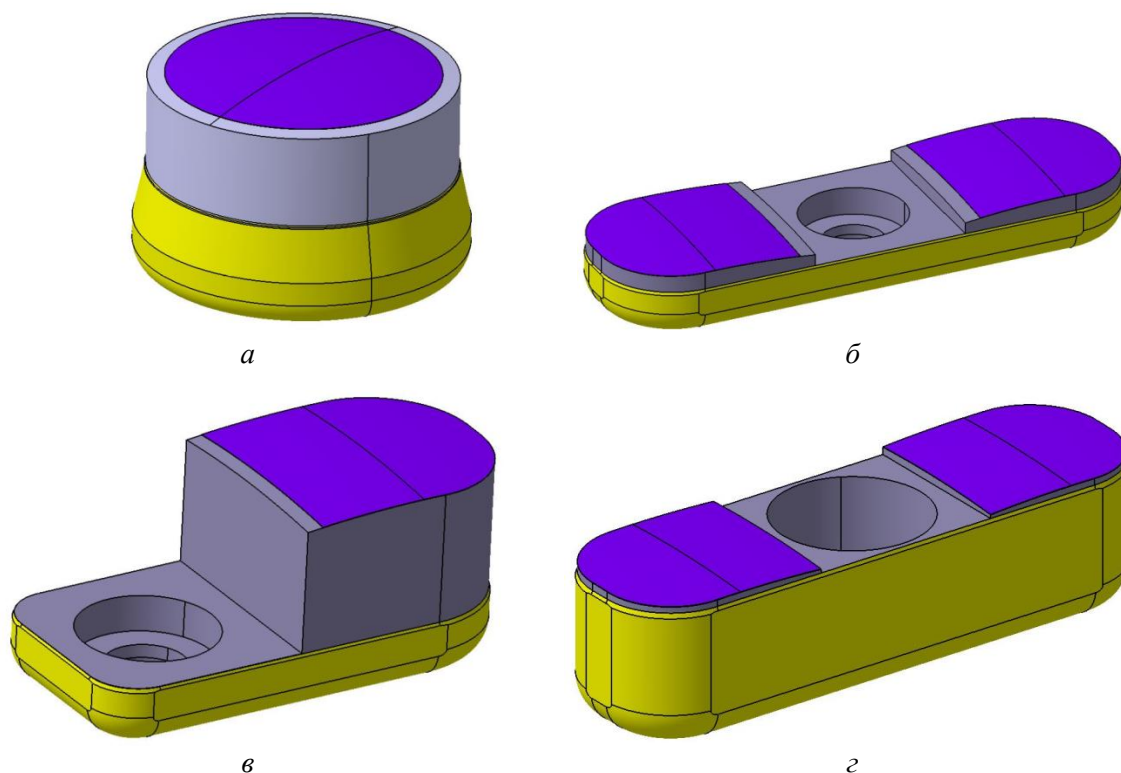


Рис. 11. Общий вид КЭИН ключа ВК:
а – цилиндрическая накладка; б – призматическая накладка; в – накладка МБ №15;
г – тороидально центрирующая накладка

Со стороны ВК выполнен биметаллический пьедестал. Крепление пьедестала к внутренней стенке ВК осуществляется аргонодуговой сваркой (АДС). Общий вид пьедестала представлен на рисунке 12 а. Изготовление биметаллического пьедестала выполняется с использованием технологии горячего изостатического прессования (ГИП) [9]. Заготовки для ГИП представлены на рисунке 12 б.



Рис. 12 – Общий вид пьедестала ЭС:
а – пьедестал ЭС; б – заготовки для ГИП

3. Материалы для изготовления внутрикамерных компонентов

Для обеспечения изготовления изделий в соответствии с требованиями Соглашений о поставке АО «НИКИЭТ» должно закупить в период до 2024 г. полуфабрикаты различных материалов (таблица 1).

Таблица 1

Перечень используемых материалов

Материал	Масса, т	
	Соединители модулей бланкета	Панели первой стенки
CuCrZr бронза	20,63	5,1
Ni-Al бронза	73,3	18,5
Сплав 718	133,5	2,5
Сталь 1,4980 (Grade 660)	46,4	6,1
316L / 316L(N)-IG	27,5	862,5

Закупка материала выполняется в соответствии с требованиями МО ИТЭР, регламентирующими как согласование предпроизводственной документации МО ИТЭР, так и утверждение МО ИТЭР отчетов об изготовлении полуфабрикатов, включающих результаты приемочных заводских испытаний. С целью реализации закупок материала в АО «НИКИЭТ» разработана процедура закупок, позволившая закупить в 2016–2022 годах кованые полуфабрикаты из стали 316L(N)-IG в объеме 704 т и полностью закрыть потребность по пруткам из сплава 718 и стали 1.4980 (Grade 660).

4. Квалификация процессов изготовления

В соответствии с требованиями МО ИТЭР АО «НИКИЭТ» должно выполнить квалификацию технологических процессов, используемых при изготовлении квалификационных полномасштабных макетов и компонентов поставочных комплектов, включающих:

- формирования ЭИП детонационным методом на основе оксида алюминия (Al_2O_3);
- нанесения антисхватывающего/уменьшающего трение покрытия на резьбовые соединения компонентов системы бланкета ИТЭР;
- изготовление резьбы болтов ППС и ГО;
- изготовление электрических соединителей;
- изготовление картриджа ГО.

4.1 Ударные испытания КЭИН

КЭИН являются элементами ППС и ЗБ, воспринимая комбинацию полоидального, тороидального и радиального моментов, возникающих при срывах плазмы. Конструкция КЭИН ППС представляет собой тело вращения с рабочей (контактной) сферической поверхностью радиусом 300 мм. Как было указано выше, для обеспечения электрической изоляции на боковую и тыльную поверхности КЭИН нанесено ЭИП на базе Al_2O_3 [5–6].

Основываясь на результатах расчетного и экспериментального обоснования [10–11] наиболее представительными для подтверждения работоспособности КЭИН являются динамические (ударные) испытания, имитирующие механическое воздействие, характерное для срывов плазмы.

Для реализации ударных испытаний АО «НИКИЭТ» разработало и изготовило установку, представляющую собой копер вертикального типа с падающей массой 460 кг [12], для контроля усилия установка снабжена силоизмерителем, установленным

непосредственно под объектом испытаний [13]. Общий вид КЭИН в процессе испытаний представлен на рисунке 13.

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 испытаний, можно отметить, что характер поведения КЭИН при динамических испытаниях отличается от результатов механических испытаний, приведенных в [9], а именно деформацией КЭИН в радиальном направлении и состоянием контактной сферической поверхности. Полученная зависимость деформации от осевого усилия, показывает, что при увеличении осевой силы происходит увеличение деформации по линейному закону.

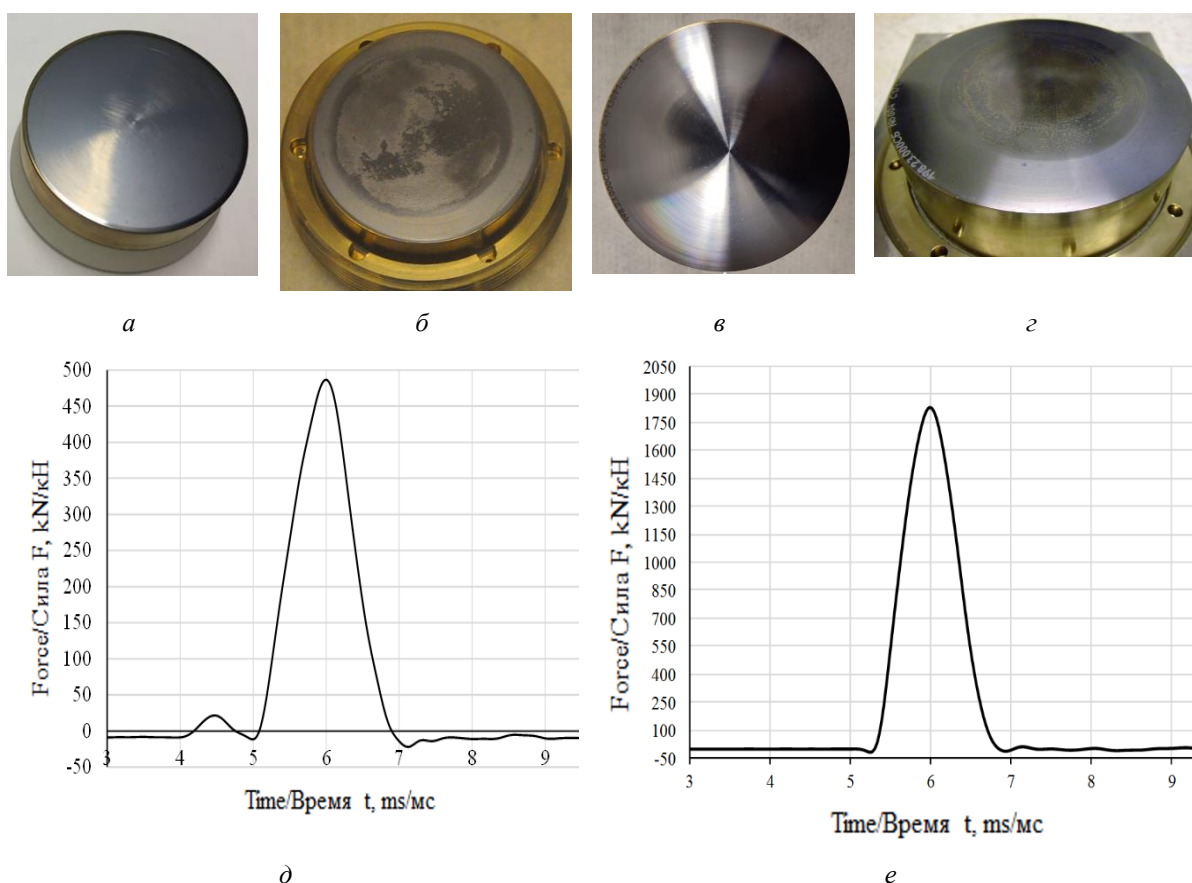


Рис. 13. Общий вид КЭИН до и после испытаний:
а – КЭИН ППС с АФП до испытаний; б – КЭИН ППС с АФП после испытаний;
в – КЭИН БМС с АФП до испытаний; г – КЭИН БМС с АФП после испытаний;
д – зависимость «Сила-время» при испытаниях КЭИН ППС;
е – зависимость «Сила-время» при испытаниях КЭИН БМС

В тоже время, КЭИН со шлифованными боковой и тыльной поверхностями, покрытыми ЭИП, и накладка без шлифовки ЭИП прошли испытания с одинаковым результатом, что позволяет отказаться от шлифовки при изготовлении.

Отмечено, что выглаживание сферической поверхности КЭИН существенно снижает шероховатость поверхности, позволяя отказаться от использования уменьшающего трение покрытия на сферической поверхности КЭИН [13].

4.2 Исследование самостопорящих свойств резьбовых пар ППС и СМБ

В целях обеспечения возможности монтажа/демонтажа внутрикамерных компонентов в конструкцию введены резьбовые соединения [14–15]. В тоже время,

циклический режим работы реактора ИТЭР (Inductive I) и события, обусловленные срывами плазмы с различной длительностью и уровнем электромагнитных сил, приводят к многочастотному знакопеременному нагружению внутрикамерных компонентов, а следовательно, и резьбовых соединений, что может привести к снижению усилия затяга в резьбовых элементах, и в пределе к полному развинчиванию, и вызвать перераспределение усилий в конструкциях. Поэтому одним из условий сохранения работоспособности системы является требование гарантированного исключения самоотвинчивания в резьбовых соединениях. В виду ограниченного пространства и сложности дистанционного обслуживания конструкций, в ИТЭР планируется использование специальной самостопорящей резьбы типа Spirallock® или его аналога EMUGE Self-lock [16–17], предполагающие использование модифицированного профиля резьбы гайки, позволяющего обеспечить смятие в контактирующих деталях, что обеспечивает самостопорящие свойства данной резьбы. В тоже время негативным моментом резьбы Spirallock ® является увеличение крутящего момент, как правило на 10–20%, что обусловлено перенаправлением усилий из осевого направления в радиальное для создания фиксации резьбового элемента [16].

Аналогом технологии Spirallock® на российском рынке является технология EMUGE Self-lock, однако, по требованию МО ИТЭР самостопорящие свойства резьбы EMUGE Self-lock требуют экспериментального подтверждения.

Одним из признанных методов определения качества самостопорящих свойств резьбовых элементов являются испытания по методу Юнкера. АО «НИКИЭТ» предложил реализовать поперечное смещение фланцев, характерное методу Юнкера, с помощью испытательной оснастки, закрепленной на захватах стандартной испытательной машины. Параметры испытаний выбраны в соответствии со стандартом ISO 16130, а именно: амплитуда не более 0,8 мм, частота 10 Гц, количество циклов не более 2000. Усилие затяга резьбовой пары М24 принято (95 ± 5) кН, что соответствует номинальному значению затяга болта узла электрического соединителя.

Испытания по методу Юнкера проводилось с помощью испытательной оснастки, схема которой представлена на рисунке 14, установленной на захватах сервогидравлической машины Instron 8802 (рисунок 15). В процессе испытаний на каждом цикле нагружения фиксировалось осевое усилие в болте с помощью датчика силы KMR/400kN.

В соответствии с ISO 16130 испытания проводились для метрической резьбовой пары и резьбовой пары, выполненной по технологии EMUGE Self-lock.

Усилие затяга составило 100 кН для метрической пары, диаграмма изменения усилия затяга во времени (1000 циклов нагружения) показана на рисунке 16 а. Далее были проведены испытания с гайкой EMUGE Self-lock, при усилии затяжки 108 кН резьбовая пара полностью раскрутилась за 1000 циклов нагружения. Диаграмма изменения усилия затяга во времени (1000 циклов нагружения) показана на рисунке 16 б. Далее были выполнены дополнительные испытания резьбы EMUGE Self-lock с увеличением силы затяга резьбовой пары до 150 кН (рисунок 16 в).

По результатам испытаний можно сделать следующие выводы и рекомендации:

1) резьба Selflock с нанесенным антифрикционным покрытием обладает удовлетворительными самостопорящими свойствами.

2) необходимо увеличить усилие затяга болта до (140 ± 10) кН в резьбовых парах с самостопорящей резьбой Selflock и антифрикционным покрытием с целью исключения самопроизвольно раскручивания в процессе эксплуатации в ИТЭР.

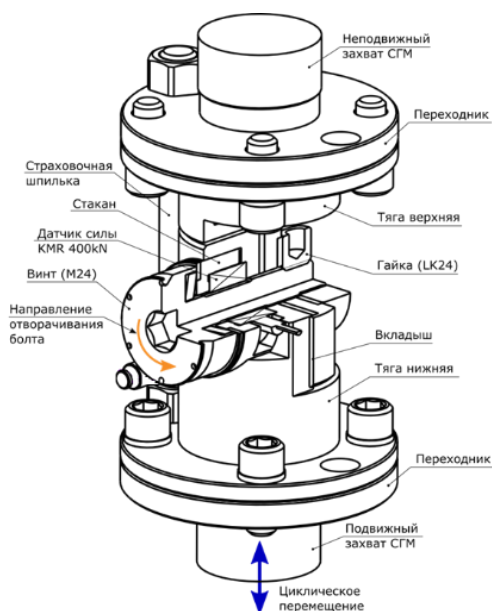


Рис. 14. Схема испытательной оснастки

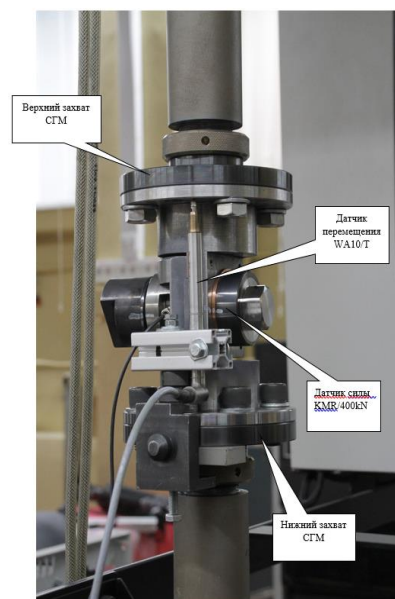


Рис. 15. Испытательная оснастка

Испытания самостопорящих свойств резьбовых пар М64 и М52 бланкета ИТЭР будут выполнены с использованием вышеуказанного подхода, однако результаты неприемлемых самостопорящих свойств резьбы EMUGE Self-lock ставят вопрос о надежности крепления ППС к ЗБ при усилии в центральном болте ниже 400 кН, что может быть достигнуто в ИТЭР [12] и требует отдельного исследования.

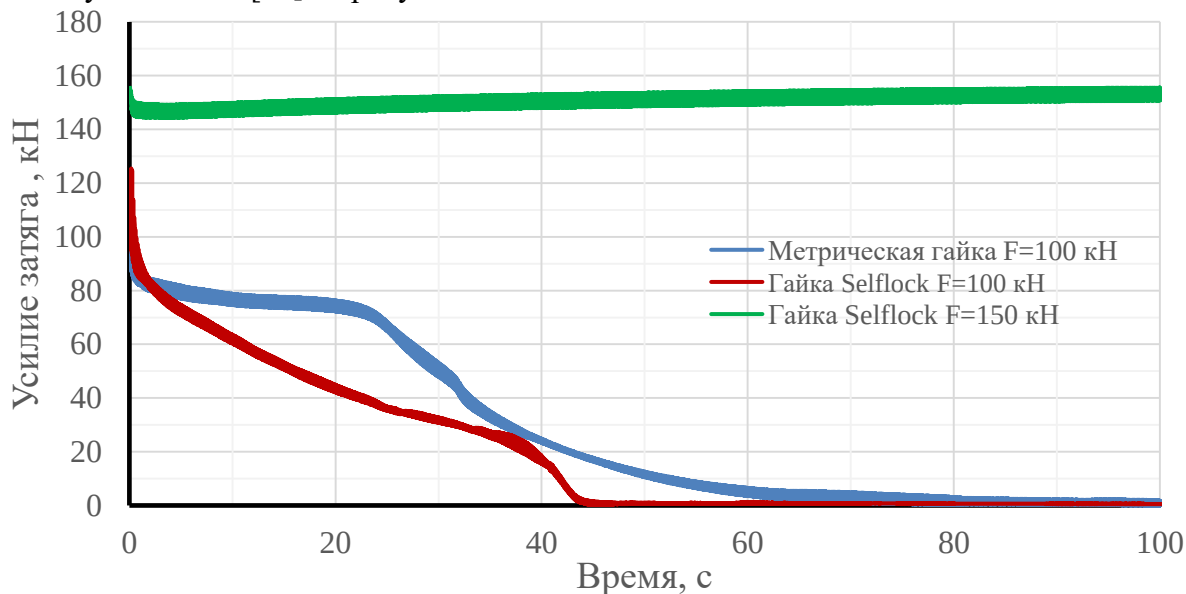


Рис. 16. Диаграмма изменение усилия затяга от времени

4.3 Испытания болтов, входящий в поставочный комплект ППС и СМБ

Процесс изготовления болтов, входящих в поставочные комплекты ППС и СМБ, требует квалификации процесса изготовления, включающего как изготовление компонентов, так и механические испытания. Испытания проводились в два этапа, включающих испытание резьбы на срез при 7 витках в зацеплении, что в случае удачно проведенных испытаний обеспечивает запас 2 по силе, и испытание несущей способности болта при закручивании болта на полную резьбу. Изготовленные компоненты представлены на рисунке 17, а модель испытательной оснастки в сборе, установленной в захватах испытательной машины представлена на рисунке 18. Всего

изготовлено три типоразмера болтов: Болт М64×4 ППС, болт М64×4 СМБ и болт М52×4 СМБ. В качестве конструкционного материала использована сталь 1.4980 (Grade 660) [4].

На первом этапе испытаний болт вкручивался в оснастку на 7 витков, далее выполнялось перемещение верхнего захвата испытательной машины со скоростью 3 мм/мин до разрушения. По результатам первого этапа испытаний определено усилие среза 7 витков для каждого типоразмера болта, при этом полученный коэффициент запаса составил порядка 2.14 для болта М64×4 ППС, 2.73 для болта М64×4 СМБ и 2.8 для болта М52×4 СМБ. Общий вид болтов после испытаний представлен на рисунке 19.



Рис. 17. Общий вид болтов, входящих в поставочный комплект ППС и СМБ

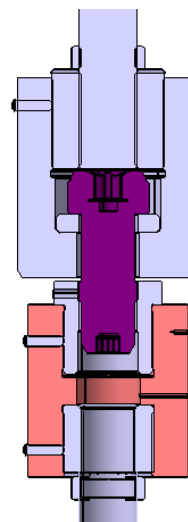


Рис. 18. Общий вид испытательной оснастки



болт М64×4 ППС



болт М64×4 СМБ

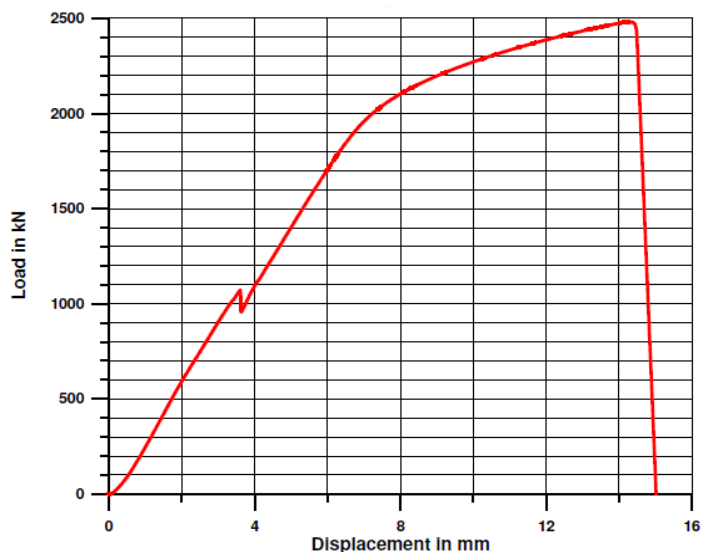


болт М52×4 СМБ

Рисунок 19. Общий вид болтов после испытаний на срез резьбы (этап 1)

На втором этапе испытаний болты вкручивались в оснастку на полную резьбу (15 витков) далее выполнялось перемещение верхнего захвата испытательной машины со скоростью 3 мм/мин до разрушения болта. По результатам второго этапа испытаний определено усилие для двух типоразмеров болтов, при этом полученный коэффициент запаса составил 2.48 для болта М64×4 ППС и 3.17 для болта М52×4 СМБ. Разрушение болта М64×4 СМБ не было достигнуто в связи с достижением предельного усилия испытательной машины (2500 кН), при этом зафиксировано образование шейки под

головкой болта. Общий вид болтов после испытаний и диаграммы «Усилие-перемещение» представлен на рисунке 20.



болт М64×4 ППС

Рис. 20. Общий вид болтов после испытаний на предельное усилие (этап 2)

По результатам испытаний подтверждена прочность болтов в соответствии с критериями МО ИТЭР, одновременно аттестован процесс изготовления болтов, который будет использован при изготовлении элементов крепления поставочных комплектов ППС и СМБ.

4.4 Испытания ЭС, входящий в поставочный комплект ППС и СМБ

Процесс изготовления ЭС требует квалификации с целью подтверждения работоспособности конструкции под действием нагрузок, имитирующих комбинацию электромагнитных сил и моментов, а также возможные поводки ВК, возникающие при сварке, что может приводить к преднагрузению ЭС, выраженному в относительном смещении фланцев [18]. Специалистами АО «НИКИЭТ» разработана программа квалификации и изготовлена уникальная оснастка, позволяющая проводить испытания в климатической камере при температуре 290 °С, соответствующей рабочей температуре ЭС в ИТЭР (рисунок 21).

Испытания проводились в соответствии с требованиями программы квалификации ЭС, а именно выполнялось предварительное смещение бокового фланца относительно центрального на 1.7 мм, далее выполнялось 22000 циклов с амплитудой $\pm 0,8$ мм (стадия 1) и на последнем этапе выполнялось 400 циклов с амплитудой $\pm 2,2$ мм (стадия 2). Далее выполнялось нагружение амплитудой $\pm 2,2$ мм до полного разрушения объекта испытаний (стадия 3).

По результатам испытаний подтверждена циклическая прочность ЭС на стадиях 1 и 2. В тоже время по результатам стадия 3 показаны возможные направления по оптимизации конструкции ЭС в случае возможного увеличения проектных нагрузок, вызванного отклонениями при изготовлении ВК и ЗБ реактора.



а



б

Рис. 21. Испытания ЭС:

а – ЭС, установленный в оснастке в климатической камере;

б – ЭС после испытаний, стадия 2

5. Отработка технологии изготовления компонентов поставочных комплектов

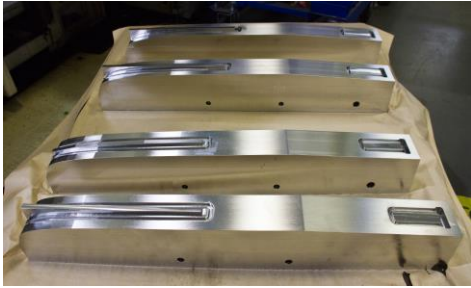
С целью обеспечения изготовления деталей и сборочных единиц, входящих в поставочные комплекты, в АО «НИКИЭТ» организована открытая производственная площадка, оснащенная новым высокоточным оборудованием. На базе производственных мощностей новой площадки выполняется подготовка к будущему серийному изготовлению компонентов поставочных комплектов, а именно отработка технологии и изготовление полномасштабных опытных макетов.

В период 2018–2022 годы изготовлены следующие опытные макеты и серийные изделия, общий вид которых представлен на рисунке 22:

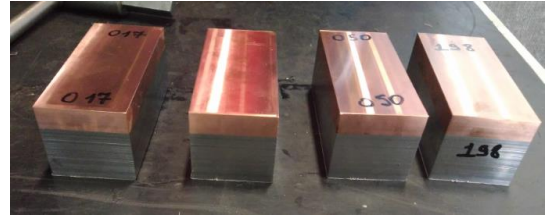
- корпуса пальцев ППС;
- полномасштабные макеты НКПС;
- КЭИН (на боковой и тыльной поверхностях КЭИН газотермическим методом, нанесено ЭИП, а на сферическую контактную поверхность нанесено АФП);
- Электрические соединители с 10 и 14 токоведущими ламелями;
- Полномасштабные прототипы высокопрочных болтов ППС и СМБ;
- Пьедесталы ЭС ППС;
- Элементы крепления пальцев ППС;
- серийный НКПС панелей 14 ряда.

В июне 2020 г. начато изготовление НКПС полномасштабного квалификационного прототипа. В 2022 году завершено изготовление 80 корпусов энергонапряженных компонентов и НКПС полномасштабного квалификационного прототипа панели первой стенки. Изделия переданы АО «НИИЭФА» на финальную сборку.

В 2022 году АО «НИКИЭТ» закончил изготовление и отправил в МО ИТЭР последнюю партию биметаллических пьедесталов. Необходимо отметить, что стопорение резьбы втулки в пьедестале выполняется штифтом, что предполагает выполнение полуотверстий в пьедестале и втулке резьбовой, то после выполнения полуотверстий втулка резьбовая становится парной только к одному пьедесталу, резьбовые втулки после доработки будут отправлены на площадку ИТЭР на стадии финальной сборки после 2026 года. Общие виды пьедесталов и втулок резьбовых представлены на рисунке 23.



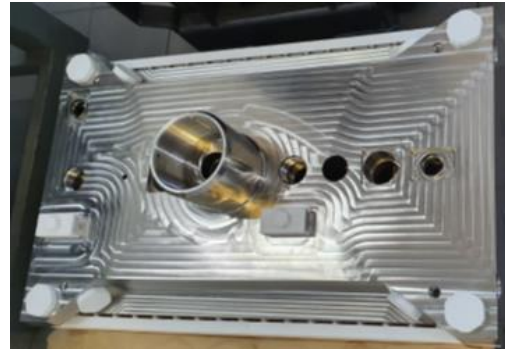
*Корпус энергонапряженного компонента ПС
после механической обработки под сварку*



Пьедесталы ЭС ППС



*Полномасштабный прототип НКПС
(после приварки крышек)*



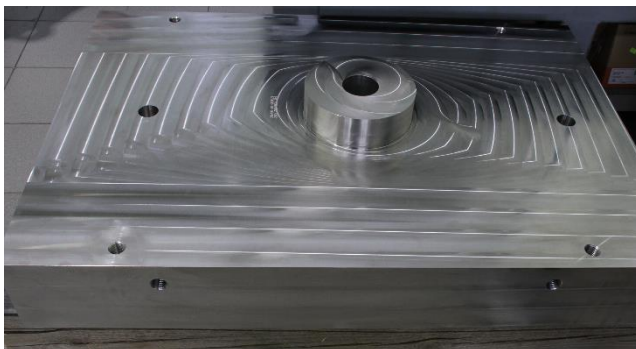
*Полномасштабный прототип НКПС
(стадия финальной мехобработки)*



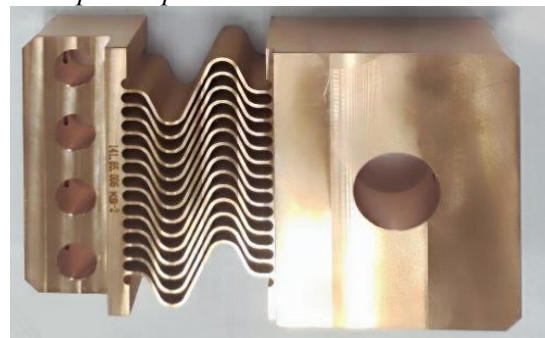
КЭИН с ЭИП и АФП



*Элементы крепления
энергонапряженного компонента ПС*



*Серийный НКПС (стадия предварительной
механической обработки)*



*Электрические соединители
с 14 токоведущими ламелями*

Рис. 22. Изготовленные компоненты ППС

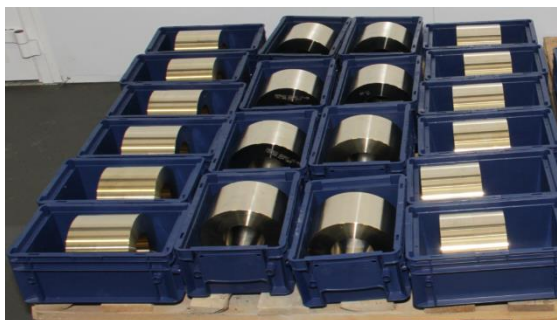


Рис. 23. Общий вид пьедесталов ЭС с резьбовыми втулками

В тоже время с 2022 года в АО «НИКИЭТ» начато серийное изготовление компонентов СМБ на стадии предварительной механической обработки для следующих изделий:

- картриджи внутреннего бланкета;
- болты узла гибкой опоры внешнего и внутреннего бланкета;
- втулки узла гибкой опоры внутреннего бланкета;
- болты электрического соединителя вакуумной камеры.

Общий вид изготовленных компонентов представлен на рисунке 24.



а



б



в



г

Рис. 24. Общий вид изготовленных компонентов СМБ на стадии предварительной механической обработки:

а – втулки конические сборки гибкой опоры внутреннего бланкета; б – болты сборки гибкой опоры внешнего бланкета; в – болты электрического соединителя вакуумной камеры; г – картридж сборки гибкой опоры внешнего бланкета

Заключение

- Выполнено изготовление и поставка в АО «НИКИЭТ» полуфабрикатов конструкционных материалов соответствии с требованиями МО ИТЭР, общим весом более 800 тонн.
- Завершена квалификация процесса изготовления высокопрочных болтов ППС и СМБ.
- Выполнена отработка технологии изготовления основных компонентов ППС и СМБ. Изготовлены опытные макеты основных узлов ППС и СМБ.
- Выполнено экспериментальное исследование резьбовых пар, выполненных по технологии EMUGE Self-lock, подтвердившее самостопорящие свойства для резьбовых пар М24, используемых для узла ЭС.
- Завершены квалификационные испытания полномасштабных прототипов накладок ППС и СМБ;
- Завершены изготовление и испытания, подтвердившие работоспособность ЭС в условиях нагружения ИТЭР
- Начато серийное изготовление компонентов ППС и СМБ.

Работа выполнена частично в рамках договора № 76-21 до от 16.06.2021 года между Частным Учреждением «Проектный центр ИТЭР» (Заказчик) и АО «НИКИЭТ» (Исполнитель), государственные контракты с ГК «Росатом» от 11.05.2021 № Н.4а.241.19.21.1038, от 14.02.2022 № Н.4а.241.19.22.1123 и от 18.01.2023 № Н.4а.241.19.23.1014.

Список литературы

1. Лешуков А.Ю., Стребков Ю.С., Кириллов С.Ю., Макаров С.В., Свириденко М.Н., Паршутин Е.В., Хомяков С.Э., Колганов В.Ю., Томилов С.Н., Трифонова Е.В., Соловьев О.В., Могилевский П.Ю., Сафронов В.М., Путрик А.Б., “Разработка конструкции, изготовление и экспериментальное обоснование компонентов системы бланкета ИТЭР, поставляемых АО «НИКИЭТ»”. – В сб.: Сборник докладов V Международной научно-технической конференции «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики», 2–5 октября 2018 г., Москва, с. 139–154.
2. M. Sviridenko, A. Leshukov, S. Tomilov, Yu. Strebkov, M. Khokhlov, E. Okuneva, A. Gervash, V. Safronov, R. Raffray, R. Eaton, S. Gicquel, B. Calcagno, “Analysis of Enhanced Heat Flux First Wall behavior under ITER Pulsed Loads”, FED 158 (2020) 111897.
3. S.Tomilov, M.Sviridenko, A.Leshukov, S.Kozlov, E.Okuneva, V.Safronov, B.Calcagno, R.Eaton, S.Gicquel, R.Raffray, “Implementation of the full-scale prototype pipe option design into non-standard first wall panel”, FED, Volume 158 (2020) 111844.
4. T. Hirai, “ITER divertor materials and manufacturing challenges”, FED 125 (2017) 250–255.
5. M. Nakamichi, “Out-of-pile characterization of Al₂O₃ coating as electrical insulator”, FED 58-59 (2001), 719–723.
6. Ulianitsky V. et al. Computer-controlled detonation spraying: From process fundamentals toward advanced applications. J. of Thermal Spray Technology, 2011, vol. 20, p. 791–801
7. Лешуков А.Ю., Стребков С.Ю., Кириллов С.В. и др. Разработка конструкции, изготовление и экспериментальное обоснование компонентов системы бланкета ИТЭР, поставляемых АО «НИКИЭТ». Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики [Электронный ресурс]: сб. докладов V Международной научно-технической конференции (2–5 октября 2018 г., Москва).

8. Thompson V., Eaton R., Raffray R., Egorov K. Properties of low friction anti-seize coatings for fusion applications. FED, 2019, vol. 146, p. 345—348.
9. Махина Д.А. Структура и механические свойства биметаллических материалов, полученных методом горячего изостатического прессования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Москва, 2020.
10. Данилов И.В., Лешуков А.Ю., Размеров А.В., Свириденко М.Н., Стребков Ю.С., Мазуль И.В., Гervаш А.А., Лабусов А.Н. “Несущая конструкция первой стенки модуля бланкета ИТЭР.”, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 1, с. 17–41.
11. Свириденко М.Н., Лешуков А.Ю., Размеров А.В., Томилов С.Н., Паршутин Е.В., Стребков Ю.С. Система механического крепления панелей первой стенки бланкета ИТЭР. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 2, с. 29–43.
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, p. 2474—2478.
13. М.Н. Свириденко, С.Н. Томилов, И.И. Поддубный, В.Ю. Колганов, Р.А. Тагиев, А.Ю. Лешуков, “Динамические испытания компонентов системы механического крепления панели первой стенки бланкета ИТЭР”, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, вып. 4.
14. M. Sviridenko, A.Leshukov, S.Tomilov, I.Poddubnyi, E.Parshutin, Yu.Strebkov, V.Safronov, R.Raffray, R.Eaton, S.Gicquel, “Experimental validation of enhanced heat flux first wall panel mechanical attachment system”, Fusion Engineering and Design, Volume 146, Part B, September 2019, Pages 1963–1966.
15. A.Yu. Leshukov, Yu. G. Dragunov, Yu. S. Strebkov, S.Yu. Kirillov, S.V. Makarov, P.D. Trofimovich, G.V. Dubinin, V.A. Maksimov, M.N. Sviridenko, A.V. Razmerov, E.V. Parshutin, S.E. Khomyakov, V.Yu. Kolganov, A.V. Zhmakin, V.A. Belyakov, I.V. Mazul, A.A. Gervash, V.M. Safronov, A.N. Romannikov, R. Eaton, K. Egorov, «Overview of JSC “NIKIET” activity on ITER Procurement Arrangements», FED 109–111 (2016) 61–72.
16. A.S. Tremsin et.al. Examination of Loads in Regular and Self-locking Spirallock Threads. Strain (2016), 52, 548–558.
17. Каталог «Резьбовой инструмент для изготовления внутренней резьбы, устойчивой к самопроизвольному ослаблению и развинчиванию при эксплуатации» <http://www.emuge-franken.ru/5materials/brachur/ZP10026.html>
18. M.Sviridenko, A.Leshukov, A.Razmerov, I.Poddubnyi, K.Skladnov, A.Bushkov, V.Elkin, V.Kolganov, S.Kirillov, Yu.Strebkov, V.Safronov, A.Putrick, R.Raffray, R.Eaton, K.Egorov, B.Calcagno, “Design, analysis and manufacturing of electrical strap for enhanced first wall panel”, Fusion Engineering and Design, Volume 123, November 2017, Pages 326–330.