

КВАЛИФИКАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ СБОРКИ ГИБКОЙ ОПОРЫ БЛАНКЕТА ИТЭР

Лебедева М.С., Козлов С.А., Власов Д.А., Поддубный И.И., Свириденко М.Н.,
Хомяков С.Э., Паршутин Е.В., Апальков А.А., Усов С.М., Тимофеев С.В. (АО «НИКИЭТ»,
Москва, Россия), Путрик А.Б. (Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия)

Введение

Одним из основных внутрикамерных компонентов термоядерного реактора ИТЭР является защитный бланкет, предназначенный для отвода тепла, защиты от нейтронного потока и формирования границы плазмы. Защитный бланкет состоит из 440 модулей бланкета (МБ), закрепленных на внутренней стенке вакуумной камеры (ВК) с помощью четырех сборок гибких опор (ГО).

В процессе эксплуатации ГО воспринимают механические циклические нагрузки, действующие на МБ, компенсируют температурные расширения МБ и погрешности изготовления и сборки ВК, а также обеспечивают электрическую изоляцию МБ от ВК при срывах плазмы [1].

С целью увеличения диапазона параметров доработки и усталостного ресурса сборки ГО специалисты АО «НИКИЭТ» модернизировали конструкцию сборки ГО, а также провели квалификационные механические статические и циклические испытания для подтверждения работоспособности элементов сборки ГО.

Данная работа содержит описание разработанной конструкции ГО, а также результаты проведенных квалификационных испытаний.

1. Описание конструкции

Общий вид модернизированной конструкции ГО представлен на рисунке 1.

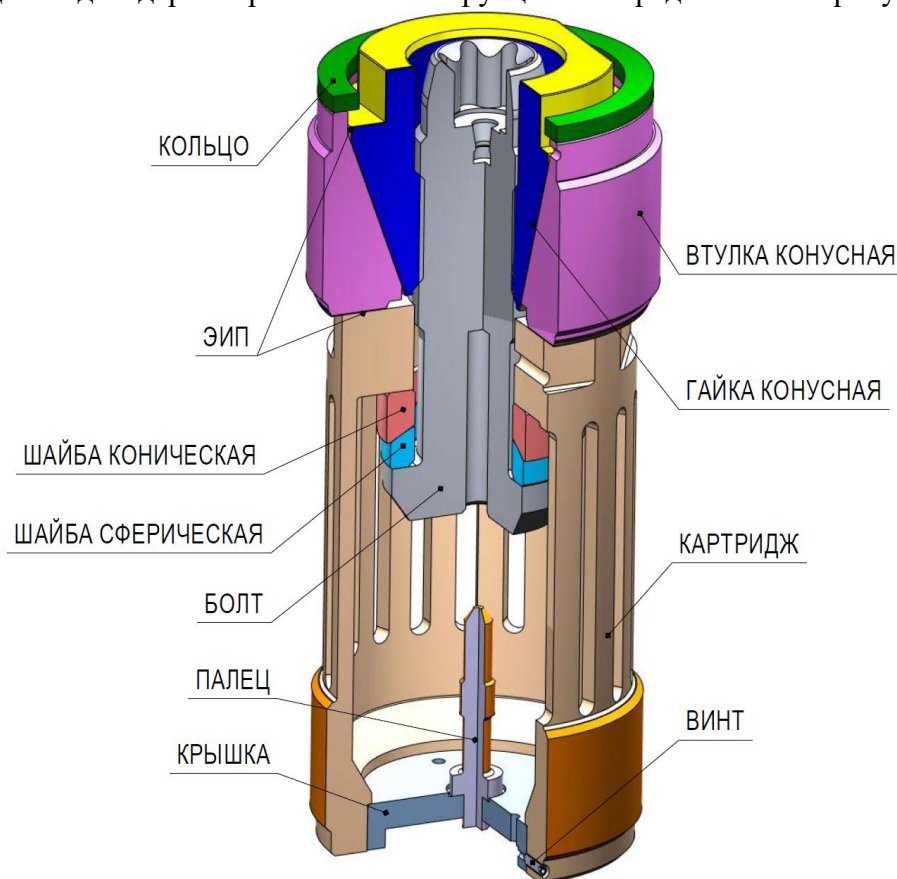


Рис. 1. Конструкция сборки ГО

Основными элементами конструкции ГО являются: гибкий картридж, центральный болт, шайба коническая, шайба сферическая, гайка конусная, втулка конусная и сборка крышки, обеспечивающая позиционирование центрального болта при монтаже. Для обеспечения требуемого осевого усилия в центральном болте при сборке узла ГМО на резьбовые поверхности элементов, а также на поверхности сферической и конической шайб наносится антифрикционное покрытие (АФП) на базе MoS_2 методом магнетронного осаждения в вакууме. Электроизоляционные свойства ГО достигаются за счет нанесения на торец конусной втулки и на внешнюю поверхность конусной гайки электроизоляционного покрытия (ЭИП) на основе Al_2O_3 методом детонационного напыления [2].

Для компенсации погрешности изготовления и сборки ВК каждая ГО подлежит доработке по параметрам, определяемым МО ИТЭР. В опорном фланце картриджа выполняется отверстие под центральный болт, а также картридж дорабатывается по высоте и углу наклона опорной поверхности. В крышке, устанавливаемой в картридж, выполняется отверстие под парковочный винт, соосное с отверстием под центральный болт в картридже. Параметры доработки ГО базовой конструкции и модернизированной представлены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры доработки ГО базовой и модернизированной конструкции

Параметр	Значения для базовой конструкции	Значения для модернизированной конструкции
Угол наклона оси, градус	$\pm 1,5$	± 2
Линейное смещение оси, мм (при максимальной угловой погрешности)	$\pm 8,5$	$\pm 15,9$
Габаритный размер по высоте, мм	± 10	± 10

На рисунке 2 представлена модернизированная конструкция ГО при максимальных параметрах доработки картриджа по углу, линейному смещению относительно оси и при минимальной доработке осевого параметра.

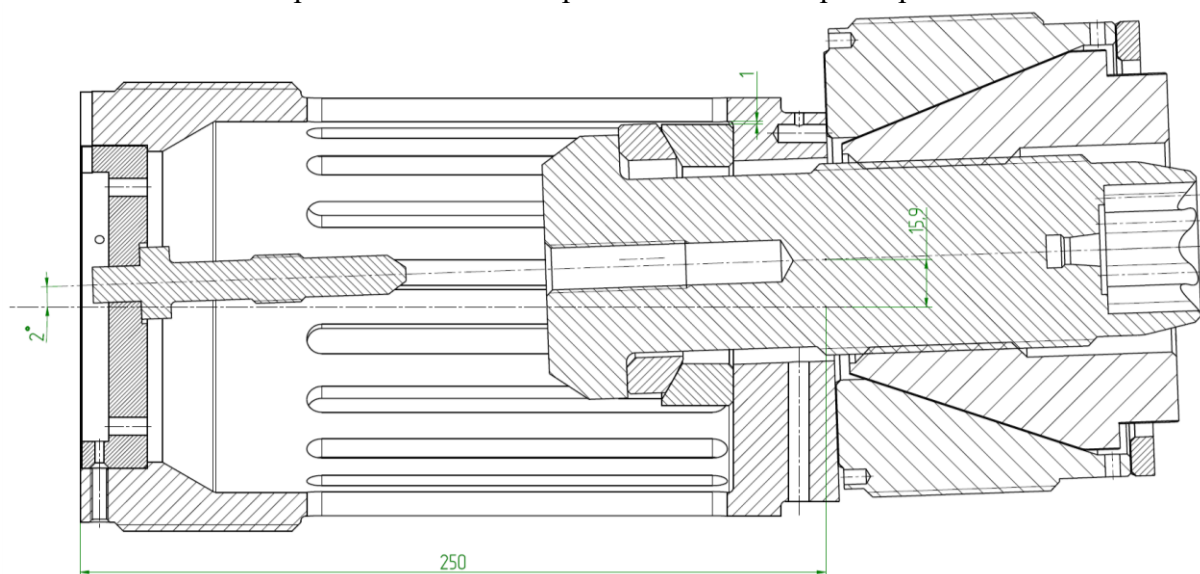


Рис. 2. Модернизированная ГО при максимальных параметрах доработки

Основные изменения узла ГО:

- введение в конструкцию сборки двух шайб с сопряжением сфера-конус позволило увеличить диапазон доработки по углу,
- оптимизация размеров спиц картриджа, диаметра конической шайбы и головки болта с целью увеличения диапазона доработки по линейному смещению,
- уменьшение числа витков резьбы в зацеплении позволило снизить крутящий момент при одновременном сохранении усилия затяга центральных болтов ГО.

Обоснование работоспособности модернизированной сборки ГО включало в себя:

- расчет на прочность в соответствии с нормами SDC-IC [3];
- проведение статических и циклических испытаний элементов конструкции ГО [4].

2. Механические статические испытания

Целью статических испытаний являлось исследование статической прочности картриджа ГО, а также определение коэффициентов запаса по сжимающей силе относительно проектных нагрузок, специфицированных МО ИТЭР. Механические статические испытания проводились с использованием сервогидравлической машины Instron 8806 и датчиков осевого и поперечного перемещения. Оснастка для статических испытаний гибкого картриджа в сборе представлена на рисунке 3.

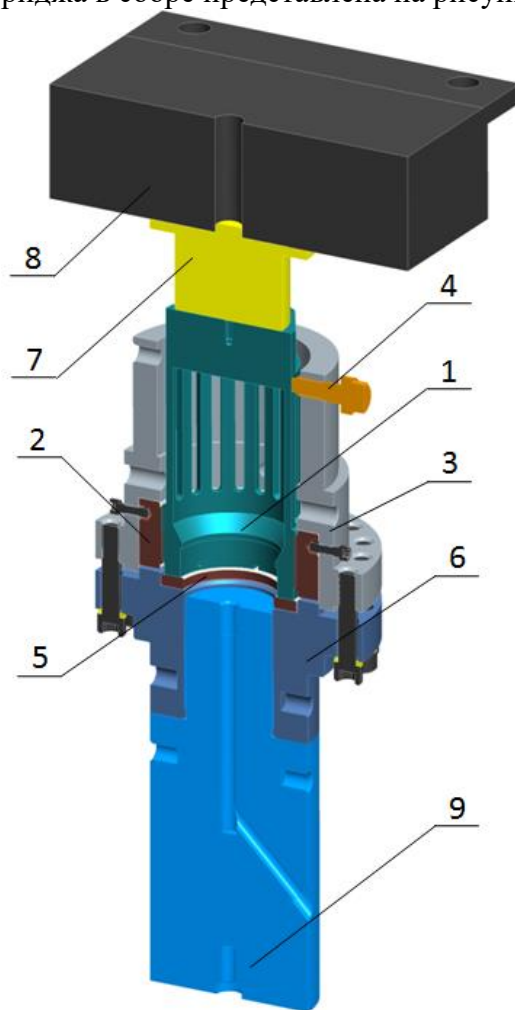


Рис. 3. Оснастка для статических испытаний гибкого картриджа в сборе:
1 – картридж; 2 – вставка; 3 – корпус; 4 – винт; 5 – шайба; 6 – фланец; 7 – плунжер;
8 – нажимная плита; 9 – тяга нижнего захвата

На рисунке 4 представлена схема нагружения и контроля картриджа ГО при проведении статических испытаний.

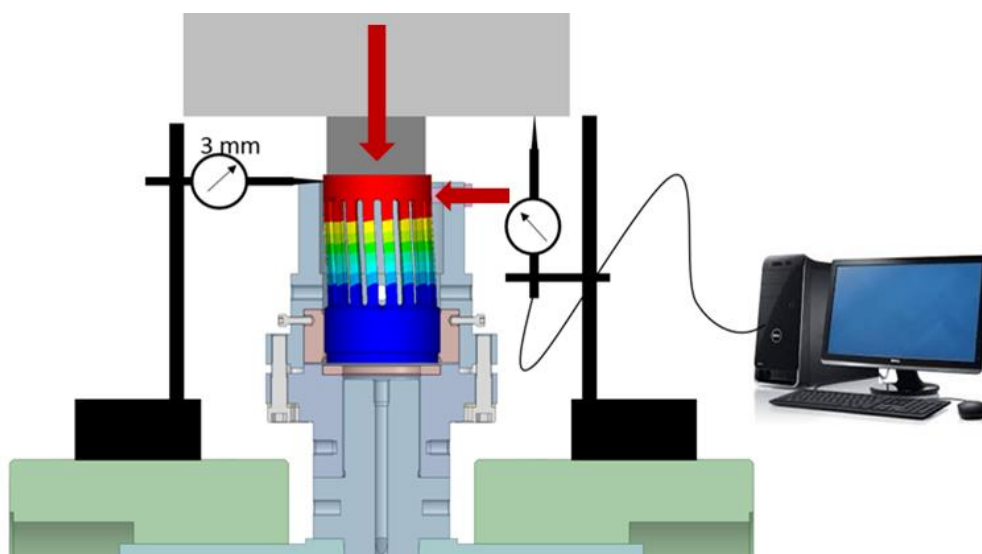


Рис. 4. Схема нагружения и контроля

На первом этапе исследовалась работоспособность картриджа ГО при проектных нагрузках. К картриджу прикладывалось совместное воздействие усилия сжатия равного 1000 кН (рис. 5) и поперечного смещения равного 3 мм, при этом коэффициенты запаса по силе и по смещению равны 2. Было выполнено 5 нагружений картриджа ГО.

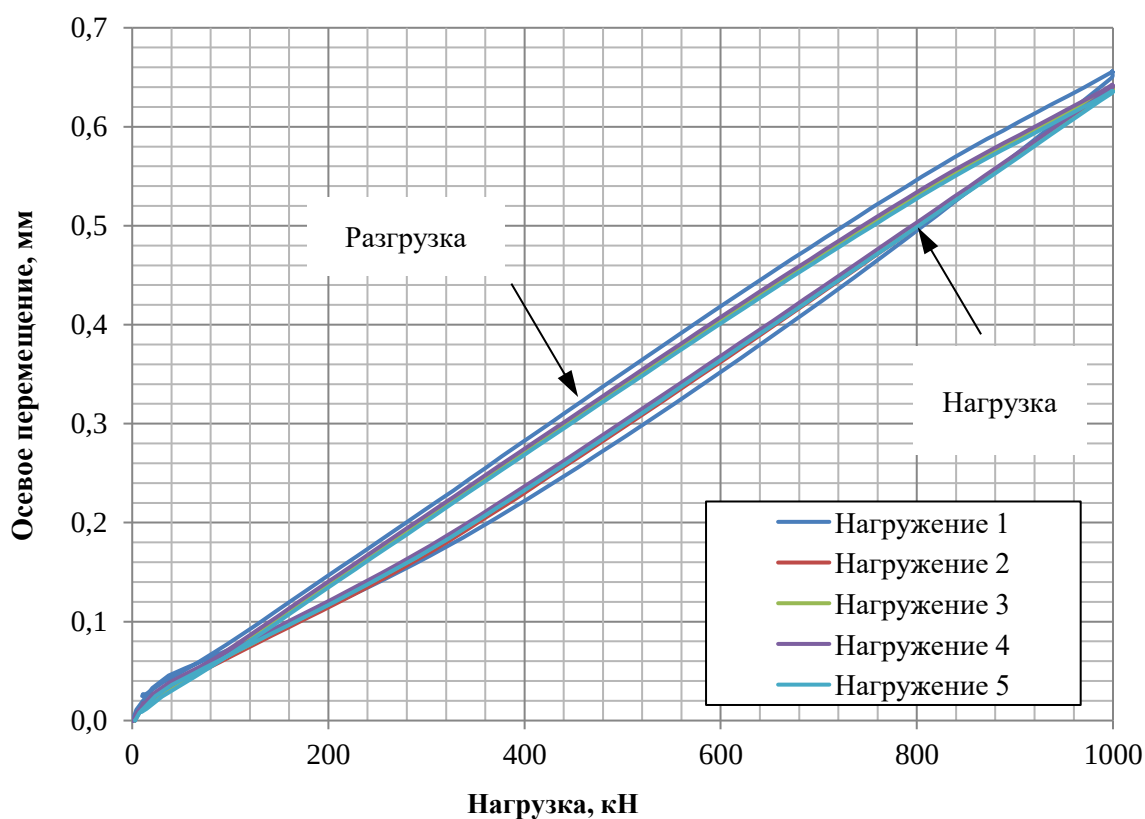
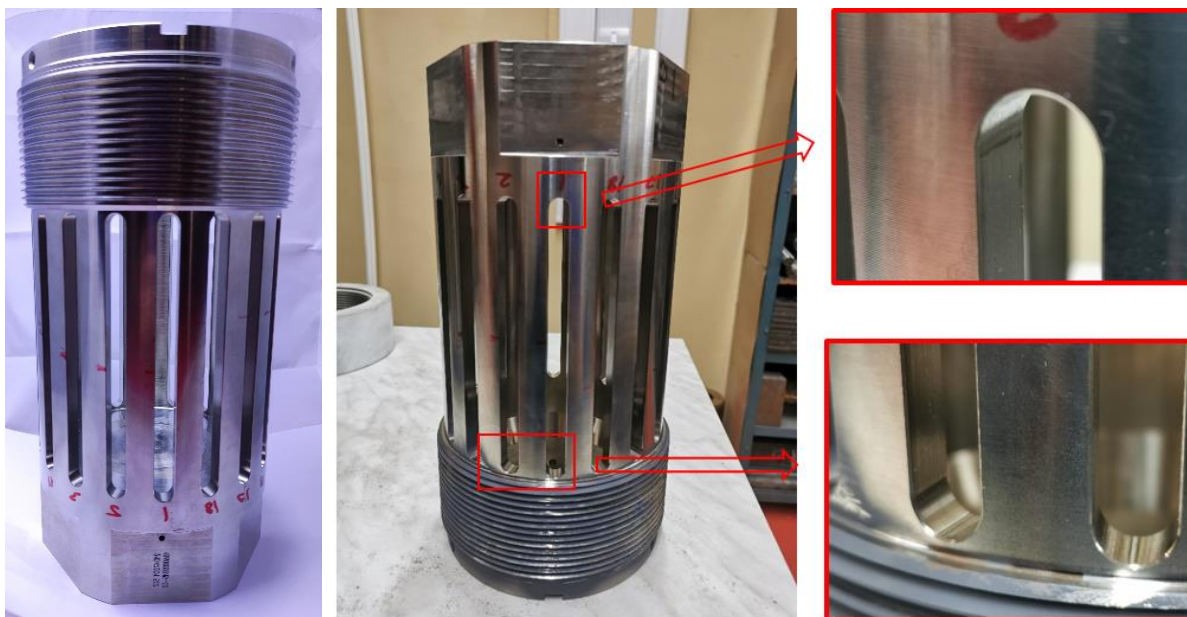


Рис. 5. Диаграмма «Осевое перемещение – Нагрузка» для картриджа ГО

Картридж до и после испытаний показан на рисунке 6. После проведения испытаний остаточных деформаций и разрушений на картридже не обнаружено.



Картридж до испытаний

Картридж после испытаний

Рис.6. Картридж ГО до и после первого этапа статических испытаний

На втором этапе статических испытаний определялась предельная нагрузка, при которой происходит потеря несущей способности cartridges ГО. Начальное поперечное смещение задавалось равным 3 мм, что соответствует коэффициенту запаса, равному 2. Потеря устойчивости произошла при значении осевой силы 1544 кН, что соответствует минимальному коэффициенту запаса 2,57, максимальное поперечное смещение при этом составило 10 мм. Значение поперечного смещения было ограничено конструкцией испытательной оснастки, моделирующей посадочное гнездо ВК. В соответствии с программой квалификации к cartridge была приложена максимальная нагрузка 1750 кН, соответствующая коэффициенту запаса 3,5. После разгрузки в cartridge наблюдалась остаточная поперечная деформация, равная 7,04 мм. На рисунке 7 представлена диаграмма «поперечное перемещение – нагрузка». Картридж ГО до и после испытаний представлен на рисунке 8.

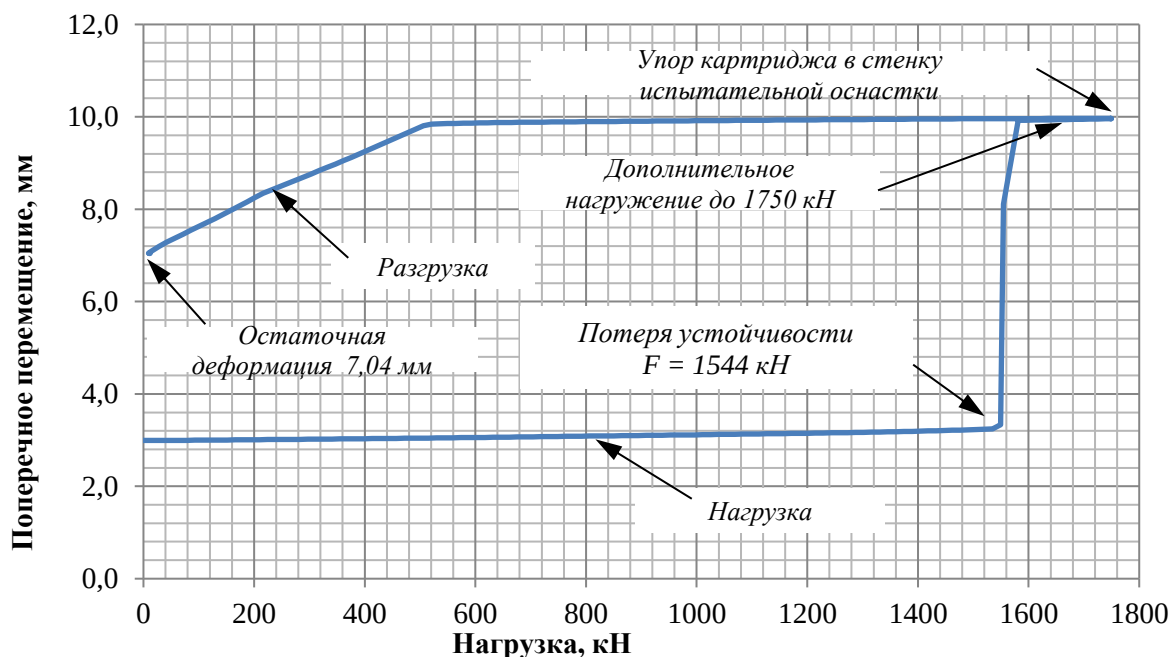


Рис. 7. Диаграмма «Поперечное перемещение – Нагрузка» для cartridge ГО



Картридж до испытаний

Картридж после испытаний

Рис. 8. Картридж ГО до и после второго этапа статических испытаний

Статические испытания картриджа ГО показали наличие двукратного запаса относительно номинальной силы и запаса 2,57 до потери устойчивости.

3. Механические циклические испытания

Целью циклических испытаний картриджа ГО являлось исследование циклической прочности элементов сборки ГО при одновременном воздействии комбинации сжимающей и растягивающей силы, знакопеременного поперечного смещения и наклона верхнего фланца картриджа относительно вертикальной оси, моделирующих режимы работа реактора ИТЭР. А также исследование работоспособности элементов ГО с покрытиями различного функционального назначения в заданных условиях.

Испытания проводились с использованием сервогидравлической машины Instron 8806. Усилие затяга сборки ГО контролировалось с помощью тензометрического силоизмерителя ТС64 производства АО «НИКИЭТ», установленного между головкой болта и сферической шайбой. Контроль поперечных смещений и поворота верхнего фланца картриджа ГО проводился с применением метода корреляции цифровых изображений (КЦИ), реализованного с помощью оптической системы измерения поверхностных деформаций "Correlated Solutions VIC-3D" (Vic-3D-LS-10) [5]. Основные параметры проведения циклических испытаний представлены в таблице 2. Общий вид оснастки для циклических испытаний в сборе представлен на рисунке 9.

Параметры проведения циклических испытаний сборки ГО

Параметр	Значение
Параметры доработки картриджа:	
высота картриджа, мм;	260
угол наклона фронтального фланца, град;	1,5
смещение оси отверстия в фронтальном фланце, мм	8,5
Предварительный затяг центрального болта, кН	880±40
Осевое усилие, кН	±700
Боковое смещение, мм	±(2,6 - 0,1)
Разворот верхнего фланца картриджа, мрад	±(2,5 ± 0,5)
Длительность цикла нагружения, с	60
Число циклов нагружения	2000

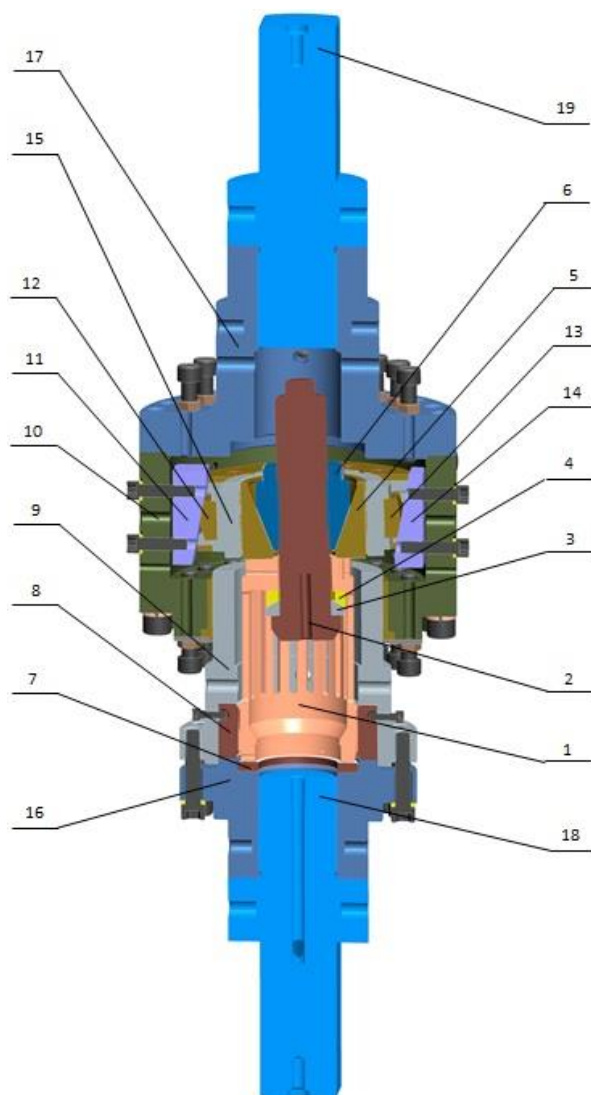


Рис. 9. Оснастка для циклических испытаний гибкого картриджа в сборе:

1 – картридж; 2 – высокопрочный болт; 3 – сферическая шайба; 4 – коническая шайба; 5 – коническая втулка; 6 – коническая гайка; 7 – кольцо; 8 – втулка; 9 – нижний корпус; 10 – верхний корпус; 11 – верхний клин; 12, 13 – накладки; 14 – нижний клин; 15 – шайба; 16 – нижний фланец; 17 – верхний фланец; 18 – тяга нижнего захвата; 19 – тяга верхнего захвата

Элементы сборки ГО до испытаний представлены на рисунке 10.



Картридж



Сферическая шайба с АФП



Коническая шайба с АФП



Конусная втулка с ЭИП



Конусная гайка с ЭИП

Рис. 10. Элементы сборки узла ГО с покрытиями различного функционального назначения до циклических испытаний

На рисунке 11 представлена схема нагружения картриджа ГО при проведении циклических испытаний.

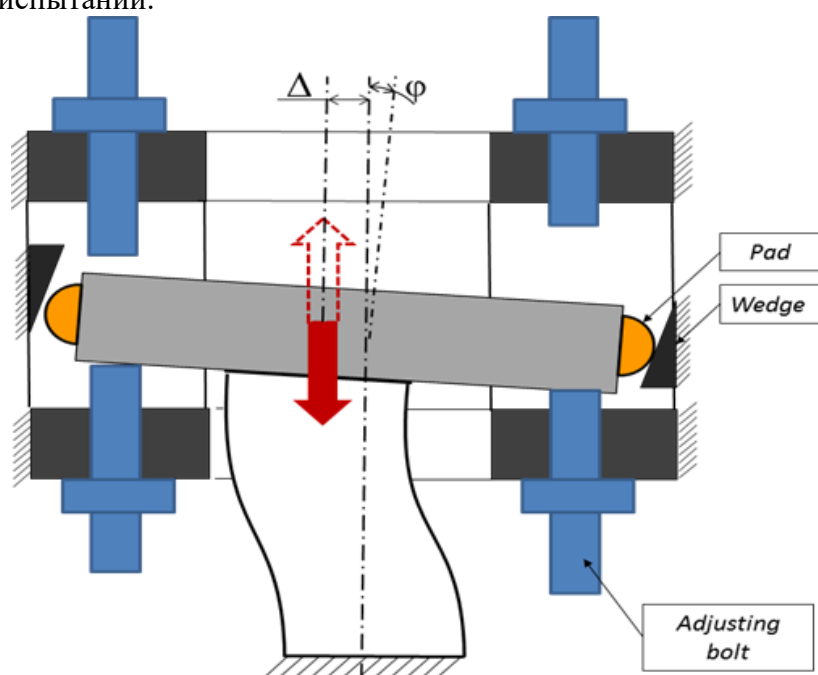


Рис. 11. Схема нагружения

На рисунке 12 представлена диаграмма «Нагрузка-Время» для первых пяти циклов нагружения.

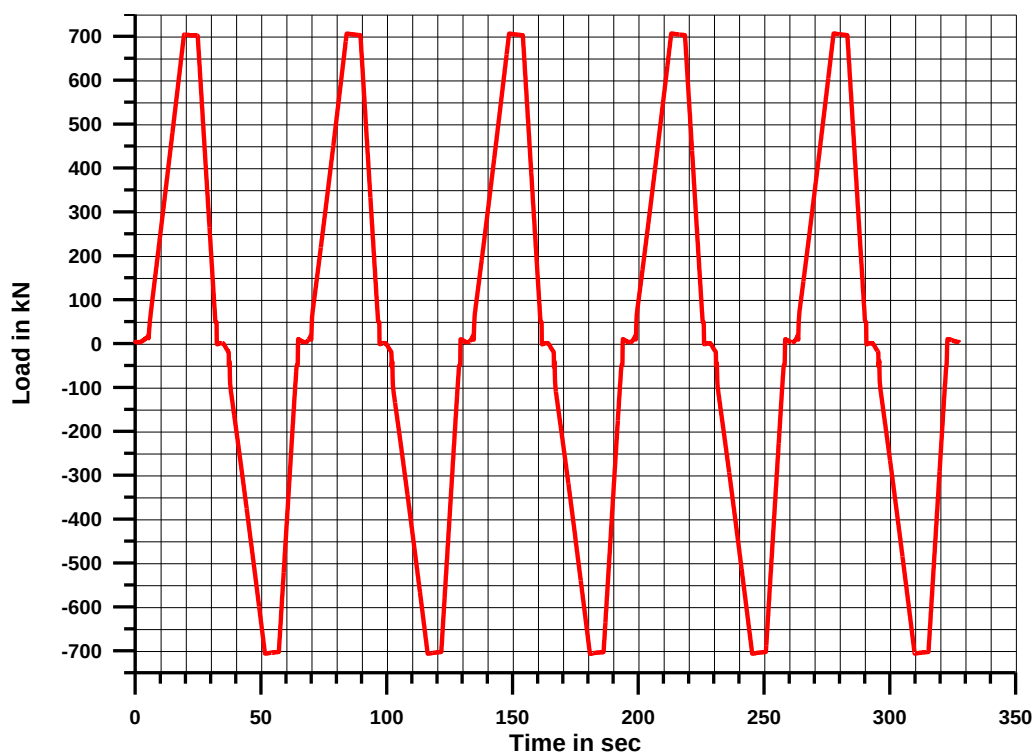


Рис. 12. Диаграмма «Нагрузка – Время» при циклических испытаниях картриджа ГО

Диаграммы зависимости поперечного перемещения и угла разворота верхнего фланца картриджа ГО, полученные методом КЦИ на основании обработки перемещений спекл-структур для циклов нагружения: 400–404, 1000–1004 и 1996–2000 представлены на рисунках 13 и 14 соответственно.

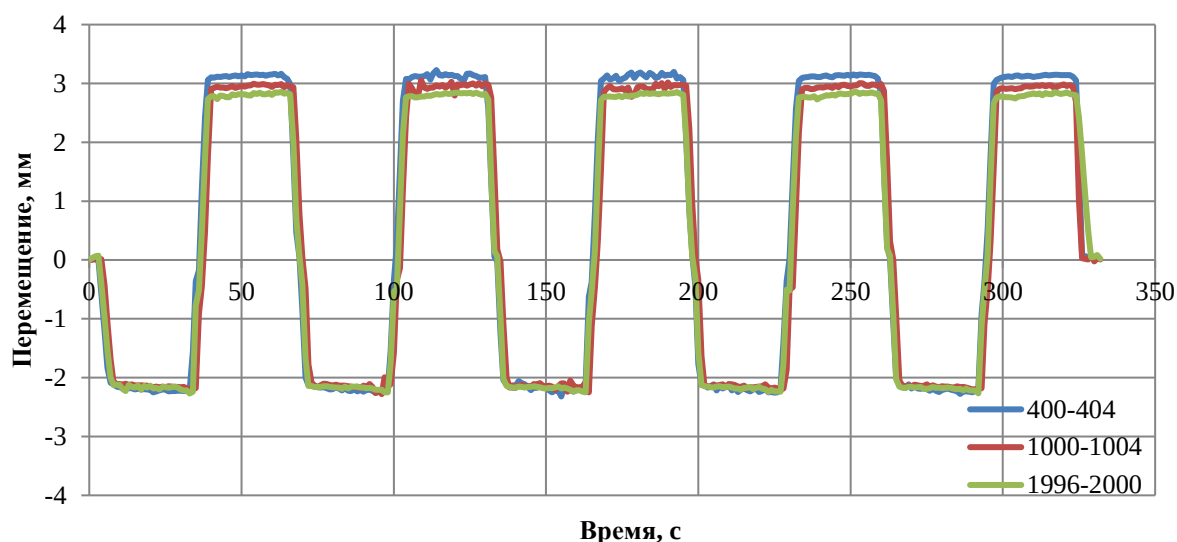


Рис. 13. Диаграмма «Поперечное перемещение – Время» для картриджа ГО. Циклы 400–404, 1000–1004 и 1996–2000

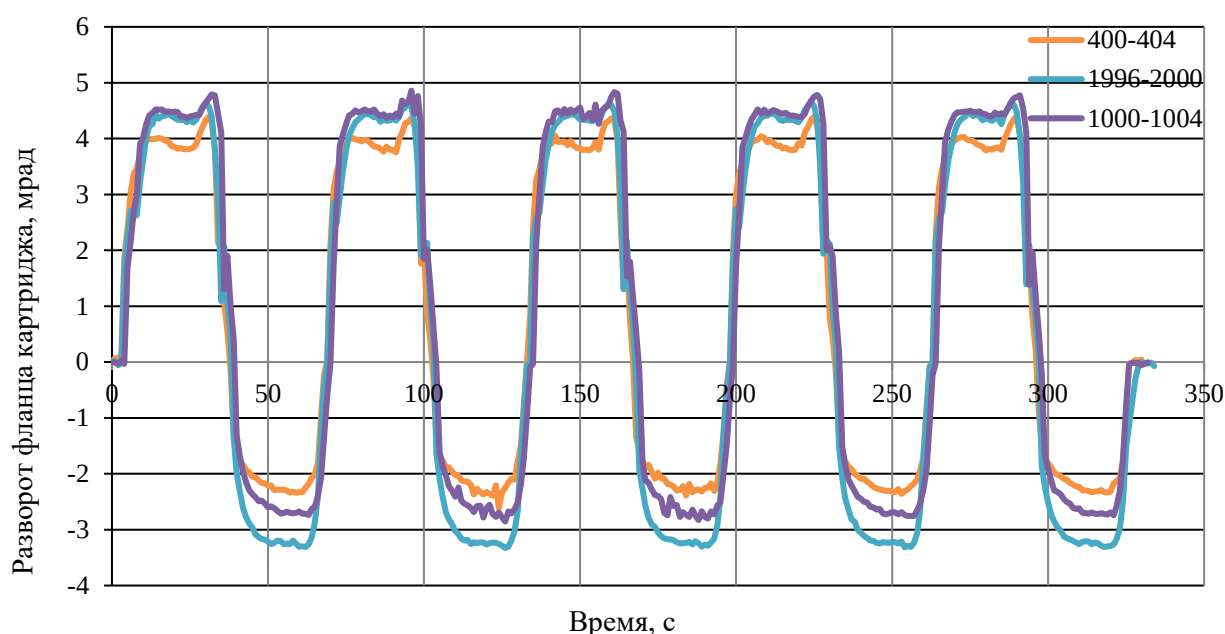


Рис. 14. Диаграмма «Разворот фланца картриджа – Время». Циклы 400–404, 1000–1004 и 1996–2000

Полученные диаграммы (рис. 13, 14) соответствуют условиям нагружения, указанным в процедуре проведения циклических испытаний. По окончании циклических испытаний конструкция картриджа ГО сохранила свою целостность. Разрушений и трещин в корнях спиц картриджа не обнаружено. На контактных поверхностях шайб с АФП обнаружены характерные следы контакта с истиранием покрытия, однако полного истирания покрытия на контактных поверхностях не зафиксировано. На конической поверхности втулки обнаружены характерные следы контакта с конической поверхностью гайки, покрытой ЭИП. При этом электрического пробоя или разрушения ЭИП на конической поверхности конусной гайки не зафиксировано, но наблюдается перенос частиц бронзы на поверхность с ЭИП. Элементы сборки узла ГО с покрытиями различного функционального назначения после циклических испытаний представлены на рисунке 15.



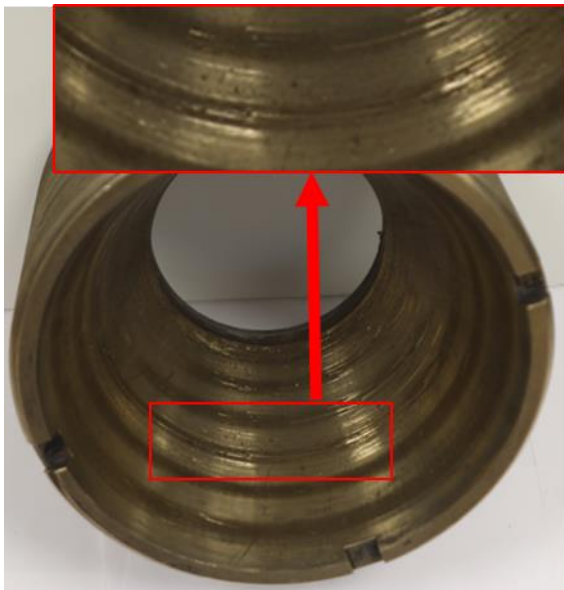
Сборка ГО



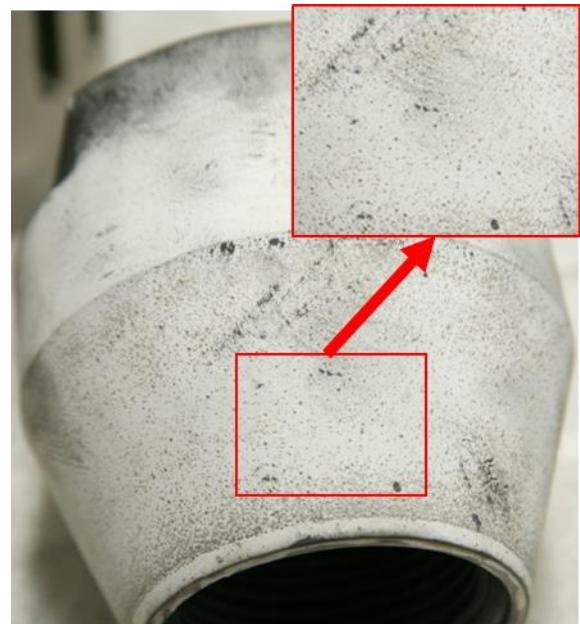
Сферическая шайба с АФП



Коническая шайба с АФП



Конусная втулка с ЭИП



Конусная гайка с ЭИП

Рис. 15. Элементы сборки узла ГО с покрытиями различного функционального назначения до циклических испытаний

4. Заключение

1) Специалистами АО «НИКИЭТ» разработана модернизированная конструкция ГО, удовлетворяющая требованиям МО ИТЭР по компенсации погрешностей изготовления и сборки ВК (возможная угловая компенсация расположения оси до ± 2 градусов, возможная компенсация линейного смещения оси до $\pm 15,9$ мм), при этом диапазон возможной доработки существенно увеличен по сравнению с базовой конструкцией узла ГО.

2) По результатам статических испытаний, разработанная конструкция картриджа ГО обеспечила работоспособность при осевом усилии 1000 кН, при этом предельная нагрузка, при которой происходит потеря устойчивости, составила 1544,4 кН, что соответствует коэффициенту запаса 2,57.

3) По результатам циклических испытаний конструкция картриджа ГО выдержала 2000 циклов без разрушений, обеспечивая коэффициент запаса по количеству циклов, равный 5.

Проведенные испытания подтвердили работоспособность модернизированной конструкции сборки ГО в условиях нагружения, характерных для работы blanket ИТЭР, что позволило МО ИТЭР утвердить разработанную конструкцию в качестве базового решения для серийного изготовления, а специалистам АО «НИКИЭТ» приступить к подготовке технической документации для последующего серийного изготовления поставочных комплектов.

Работы выполнены в рамках государственных контрактов 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. S. Sadakov, S. Khomiakov, B. Calcagno, Ph. Chappuis, G. Dellopoulos, V. Kolganov, M. Merola, I. Poddubnyi, R. Raffray, J.J. Raharijaona, M. Ulrickson, A. Zhmakin, All contributors to the BIPT effort, “Status of ITER blanket attachment design and related R&DS”, Fusion Engineering and Design 88 (2013) 1853 – 1857.

2. Ульяницкий В.Ю., И.С. Батраев, Штерцер А.А. Детонационные покрытия из оксидов. Упрочняющие технологии и покрытия. 2015 № 9, с. 37–45.

3. ITER IO. In-vessel Components, SDC-IC, ITER_D_222RHC, v3.0, 2012.

4. Sannazzaro G., Barabash V., Kang S.C. e.a., “Development of design criteria for ITER in-vessel components”, Fusion Engineering and Design 88 (2013) 2138 – 2141.

5. И.Н. Одинцев, А.А. Апальков, А.М. Кокуров, Т.П. Плугатарь, С.М. Усов, Применение оптико-корреляционных методов в задачах экспериментальной механики// Прогрессивные технологии и системы машиностроения № 1(51)2015, 2015 г., с. 152–751.