

ОБОСНОВАНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОЕДИНИТЕЛЯ БЛАНКЕТА ИТЭР

Козлов С.А., Вербицкая К.С., Паршутин Е.В., Толкачев Д.В., Поддубный И.И.,
Свириденко М.Н., Данилов И.В. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),
Путрик А.Б. (ЧУ «ИТЭР-центр», Москва, Россия)

Введение

В рамках реализации Соглашений о Поставке теплонапряженных панелей первой стенки blankets и соединителей модуля blankets (СМБ) ИТЭР для сооружаемого настоящее время во Франции Международного термоядерного экспериментального реактора ИТЭР АО «НИКИЭТ» ответственно за разработку, изготовление, испытания и поставку на площадку ИТЭР более 2000 комплектов электрических соединителей (ЭС).

В конструкции blankets ИТЭР предусмотрены ЭС двух типоразмеров для замыкания токов с поверхности модуля blankets (МБ) на вакуумную камеру (ВК) с целью защиты патрубков подвода и отвода теплоносителя от омического нагрева, а также снижения электромагнитных нагрузок при срывах плазмы на элементы МБ. Два ЭС устанавливаются на интерфейсе “панель первой стенки (ППС) – защитный блок (ЗБ)”, а также 2 шт. на интерфейсе “ЗБ – ВК”.

В работе приводится описание конструкции ЭС, действующих нагрузок, а также результаты экспериментального обоснования работоспособности ЭС.

Описание конструкции

ЭС выполнен в виде моноблочной конструкции прямоугольной формы с волнообразными токопроводящими элементами (ламелями), толщиной 1,2 мм, расположенными между центральным и боковым фланцами. Боковой фланец ЭС устанавливается на МБ при помощи шпилек с усилием затяга каждой (20 – 25) кН, что соответствует моменту на ключе (35 – 44) Н·м. Для создания электрического контакта центральный фланец ЭС притягивают к пьедесталу ВК центральным болтом с усилием затяга (95±5) кН, что соответствует моменту на ключе (210 – 342) Н·м. При этом сам электрический контакт центрального фланца ЭС с ВК осуществляется через биметаллическое соединение CuCrZr-316 L пьедестала ВК (рис. 1).

ЭС выполняется в двух исполнениях в зависимости от величин протекающего тока. Десяти ламельный ЭС (рис. 2а) с размерами – 168×80×47 мм, устанавливается на модули, расположенные в зоне внешнего blankets и позволяет пропускать ток вплоть до 41 кА. В то время как 14 ламельный ЭС (рис. 2б) с размерами – 168×100×47 мм, устанавливается на МБ, расположенных на верхнем своде ВК и в зоне внутреннего blankets, в которых возможно протекание тока значением до 137 кА.

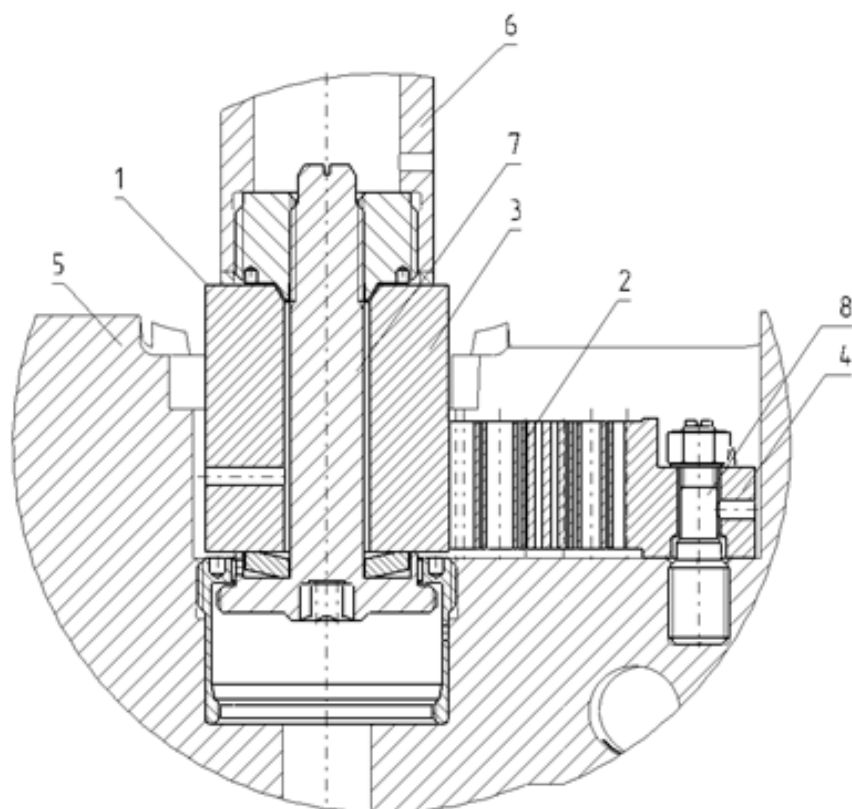


Рис. 1. Сборка ЭС:

1 – ЭС, 2 – токоведущие ламели, 3 – центральный фланец, 4 – боковой фланец, 5 – модуль blankets, 6 – пьедестал ВК, 7 – центральный болт, 8 – шпильки

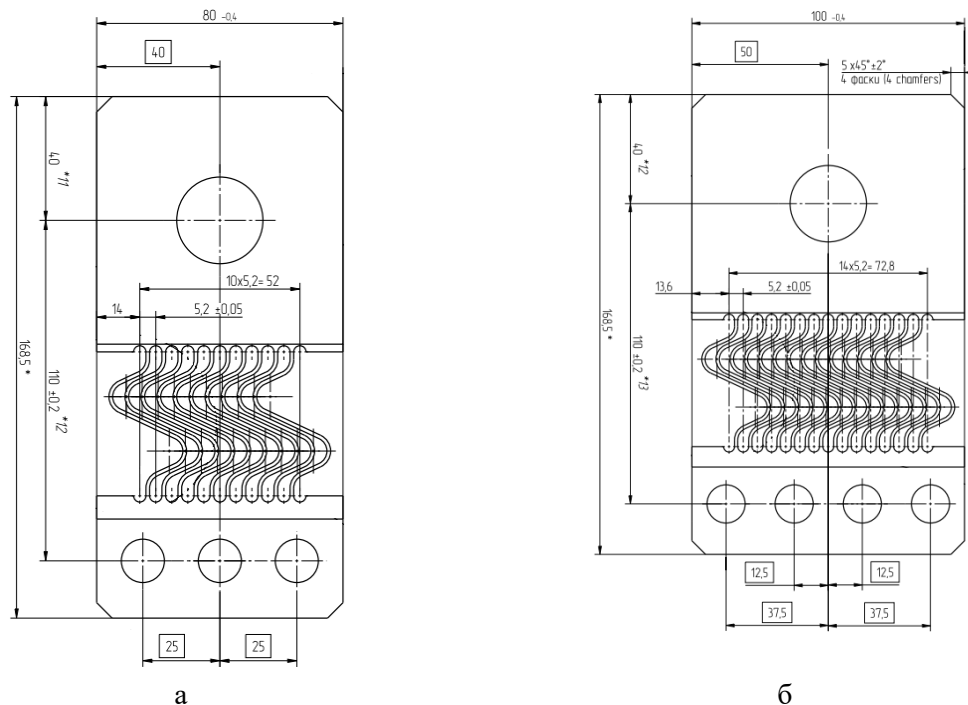


Рис. 2. Электрический соединитель, а – 10 ламельный, б – 14 ламельный

Циклические механические испытания электрического соединителя

При работе токамака ИТЭР на ЭС действуют комплексные нагрузки обусловленные: нейтронным энерговыделением, омическим нагревом, электромагнитными силами, вызванные протеканием электрического тока в магнитном поле, смещения фланцев при

сборке в следствии неточности изготовления вакуумной камеры и blankets. Режим работы реактора ИТЭР носит импульсный характер. Для определения пределов усталостной прочности ламелей в рамках программы квалификации полномасштабных прототипов ЭС были проведены механические испытания.

Квалификационные прототипы были изготовлены в соответствии с утвержденными МО ИТЭР чертежами, также материалы полуфабрикатов соответствует техническим спецификациям Международной организацией ИТЭР. В качестве конструкционного материала использован бронзовый сплав CuCrZr-IG изготовления двух заводов – свойства полуфабрикатов представлены в табл. 1. Carl Schreiber GmbH изготовил полуфабрикаты бронзы в соответствии со спецификацией CuCrZr-IG forgings for Electrical Straps for ITER Blanket Application. Полуфабрикаты бронзы АО «Завод «Красный Выборжец» были изготовлены в соответствии со спецификацией CuCrZr Alloy for Blanket Heat Sink Application.

Таблица 1

Изготовитель ЭС	Количество изготовленных ЭС	Завод изготовитель материала	Средний размер зерна, мкм	Предел текучести для бронзы при температуре 250 °С, МПа
АО «НИКИЭТ»	8	CSN Carl Schreiber GmbH	70	320
ФГУП «ПСЗ»	3			
АО «НИКИЭТ»	3	АО «Завод Красный Выборжец»	100-2000	440

С целью подтверждения технологии изготовления ЭС в соответствии с программой квалификации был проведен контроль параметров ЭС до и после изготовления. Были проведены все необходимые стадии контроля, для прохождения квалификационных испытаний и включали в себя: УЗК заготовок из CuCrZr-бронзы, визуальный и измерительный контроль.

Механические испытания выполняются при температуре 290°C, соответствующей рабочей температуре ЭС ППС. Для поддержания требуемого температурного режима использовалась климатическая камера. При механических испытаниях к фланцам ЭС прикладываются перемещения, соответствующие режиму работы ЭС «модуль blankets/вакуумная камера». Перемещения задавались гидроприводом испытательной машины и регистрировались встроенными датчиками. Механические испытания разделены на три последовательных стадии, стадии описаны в табл. 2.

Таблица 2

Параметры циклических механических испытаний

Параметр	Значение	Стадия
Предварительное смещение (растяжение) на захватах машины, мм	1,7	1
Перемещение (амплитуда) подвижного захвата машины, мм	± 0,8	
Число циклов	22000	
Предварительное смещение (растяжение) на захватах машины, мм	1,7	2
Перемещение (амплитуда) подвижного захвата машины, мм	± 1,1	
Число циклов	8000	
Предварительное смещение (растяжение) на захватах машины, мм	1,7	3
Перемещение (амплитуда) подвижного захвата машины, мм	± 2,2	
Число циклов	До разрушения	

Стадии 1 и 2 являются квалификационными циклическими испытаниями, стадия 3 является предельным циклическим испытанием. При успешном прохождении стадий 1–2 допускается прохождение стадии 3. Во время испытаний производилась остановка испытательной машины для контроля целостности ламелей.

Испытания проводились на сервогидравлической машине Instron 8802 (рис. 3) в соответствии с процедурой, разработанной специалистами АО «НИКИЭТ» и утвержденной международной организацией ИТЭР. Объект испытаний – ЭС устанавливается в специальную оснастку, разработанную в АО «НИКИЭТ» (рис. 4) которая позволяет преобразовать вертикальные смещения штока машины в смещение фланцев относительно друг друга, действующее в трех направлениях, данные перемещения имитируют перемещения модуля бланкета во время работы реактора ИТЭР. Испытания проводились в климатической камере при температуре 290 °С, измерение температуры во время испытаний производилось при помощи термоэлектрического преобразователя температуры ТХА(К), установленного непосредственно на ЭС, и цифрового измерительного прибора FLUKE 1587.

Во время испытаний велась непрерывная запись максимальных значений нагрузок при постоянной амплитуде перемещения захвата испытательной машины. Контролировались значения максимальных нагрузок, так как при их снижении фиксируется появление трещин в ламелях, а при обрыве токоведущей график имеет скачкообразный характер.



Рис. 3. Испытательная машина Instron 8802

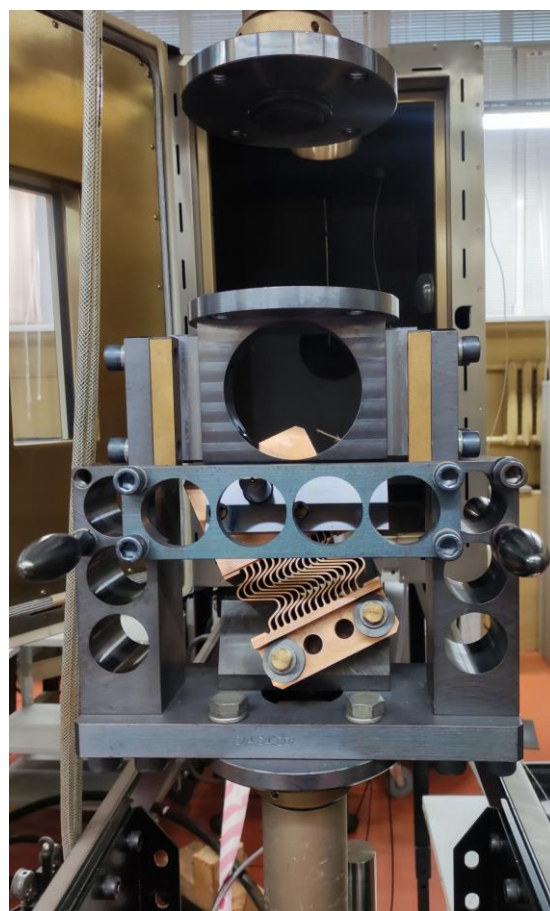


Рис. 4. Объект испытаний в оснастке размещен в захватах машины Instron 8802

Результаты испытаний

В циклических механических испытаниях участвовало 14 ЭС (рис. 5). На рисунке 4 представлены 10- и 14-ламельные ЭС.

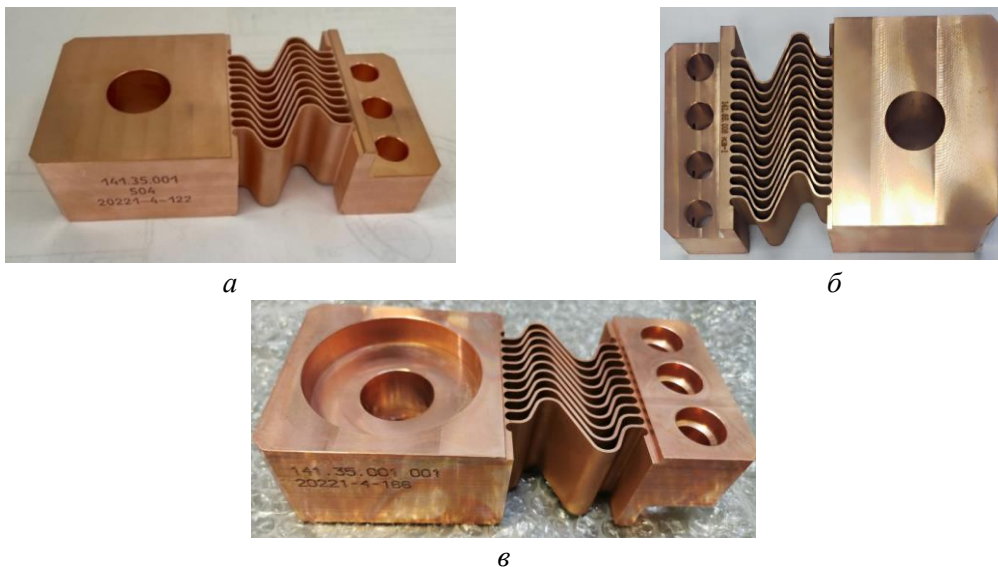


Рис. 5. ЭС модулей бланкета ИТЭР до испытаний:
а – изготовленные ФГУП «ПСЗ»; б, в – изготовленные АО «НИКИЭТ»

Первые 8 ЭС изготовлены в АО «НИКИЭТ» по технологии, предполагающей заход проволоки электроэрозионного станка на сгибах токопроводящих ламелей (рис. 6). При прохождении визуального контроля до испытаний на ламелях ЭС обнаружены следы от захода проволоки, являющиеся концентраторами напряжений и вызвавшие развитие трещин, которые под циклической нагрузкой приводят к разрушению ламелей. В дальнейшем при изготовлении были учтены результаты испытаний и место захода проволоки было перенесено в зону центрального блока.

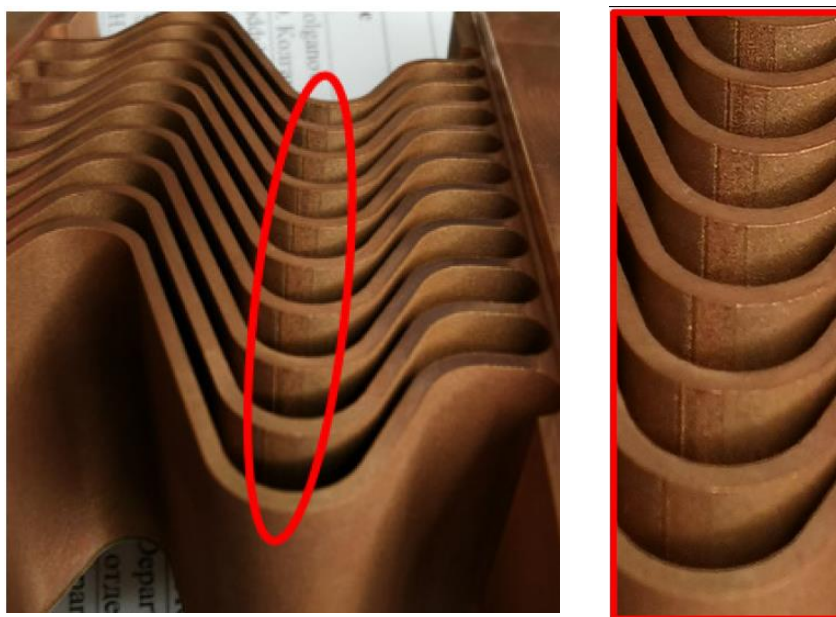


Рис. 6. Следы от захода проволоки при электроэрозионной обработке ламелей ЭС

Электрический соединитель 141.35.003 006

На рисунке 7 показаны диаграммы «Максимальное усилие цикла – номер цикла» для ЭС 141.35.003 006 для стадий 1–3. После первых двух стадий испытаний на токоведущих ламелях ЭС трещин не обнаружено. На рисунке 8 представлен ЭС 141.35.003 006 после прохождения квалификационных механических циклических испытаний по стадиям 1–2 и предельных испытаний стадии 3.

На стадии испытаний 3 после 800 цикла нагружения началось плавное снижение величин максимальных нагрузок цикла, обусловленное ростом усталостных трещин в ламелях. После 1750 цикла на графике видно скачкообразное изменение силы, которое соответствовало разрушению каждой из ламелей. Коэффициент запаса для данного ЭС составил 2,59; столь низкое значение обусловлено заходом проволоки в области ламелей (рис. 9). В результате испытаний 90 % ламелей оказались разрушены, в оставшихся трещины составляли более половины высоты.

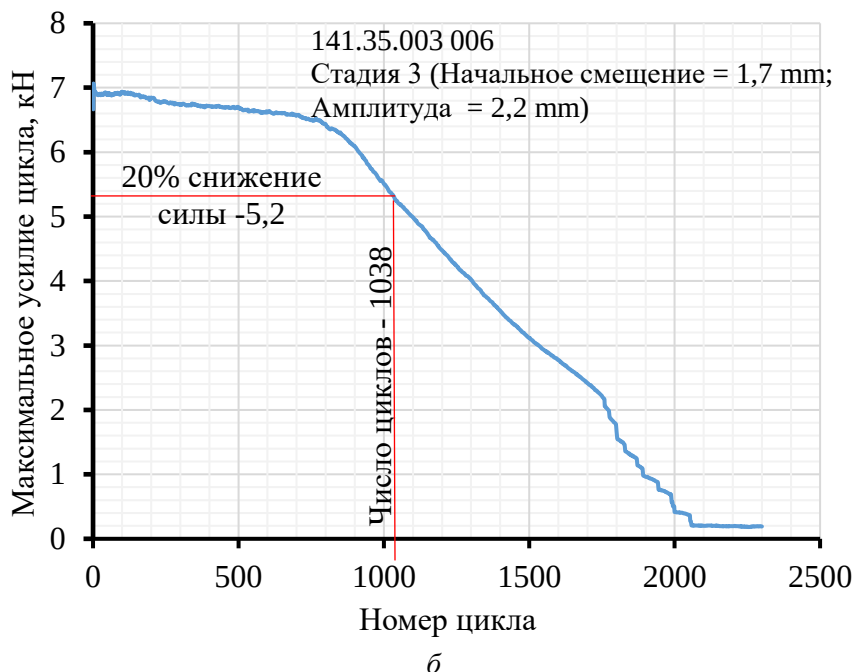
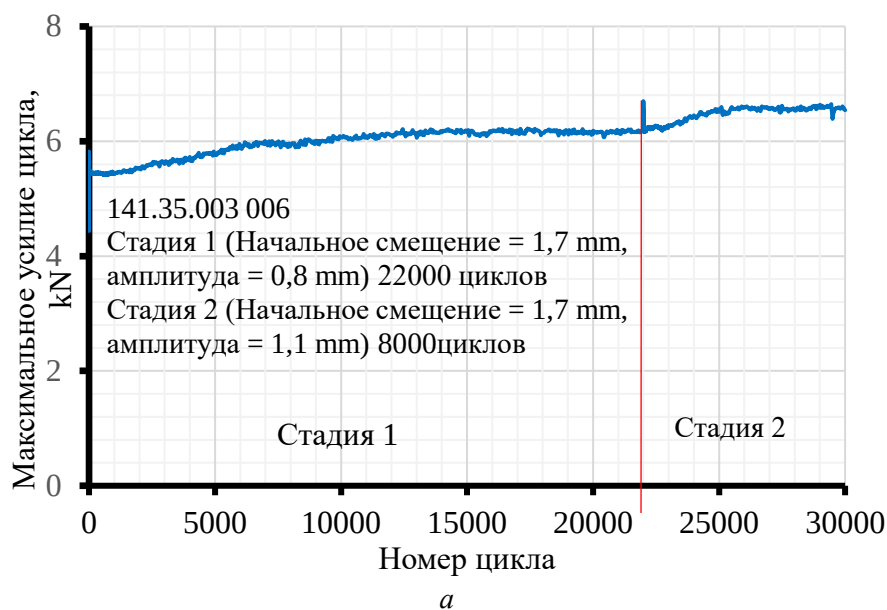


Рис. 7. Диаграммы «Максимальное усилие цикла – номер цикла»: а – испытание на стадиях 1 и 2; б – испытание на стадии 3

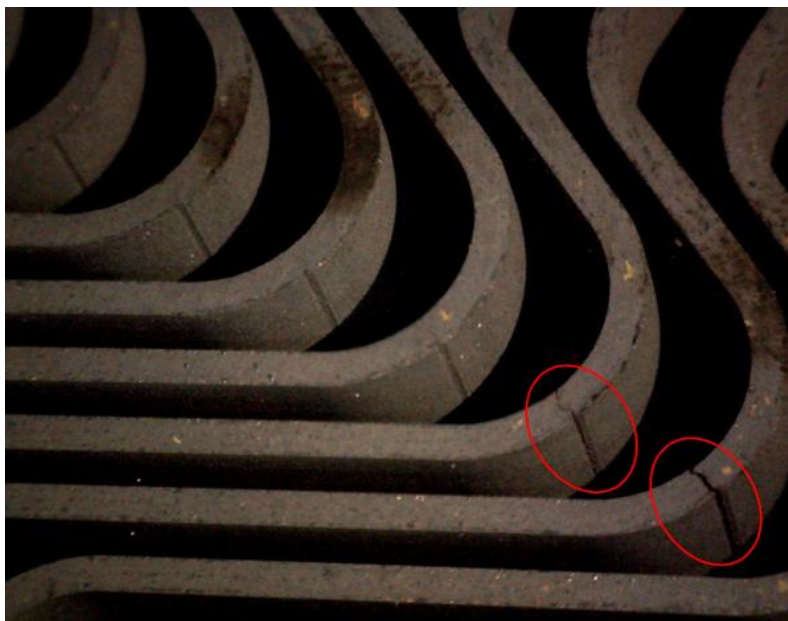


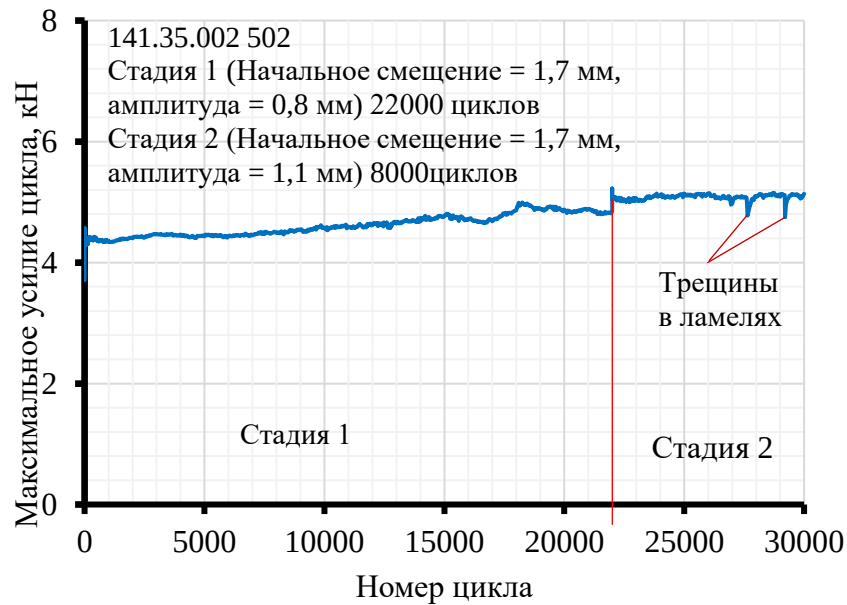
Рис. 8. Зарождение трещин в ламелях ЭС после стадии 1 и 1200 циклов на стадии 3



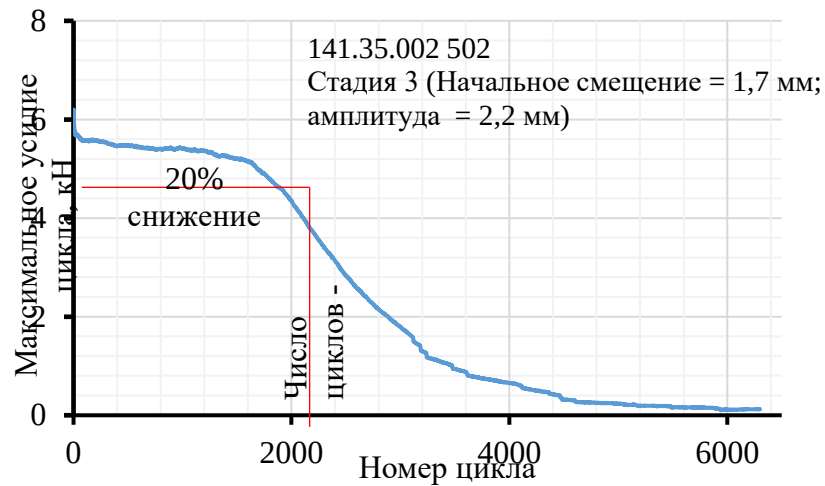
Рис. 9. ЭС 141.35.003 006, изготовленный в АО «НИКИЭТ» после стадии 3

Электрический соединитель 141.35.002 502

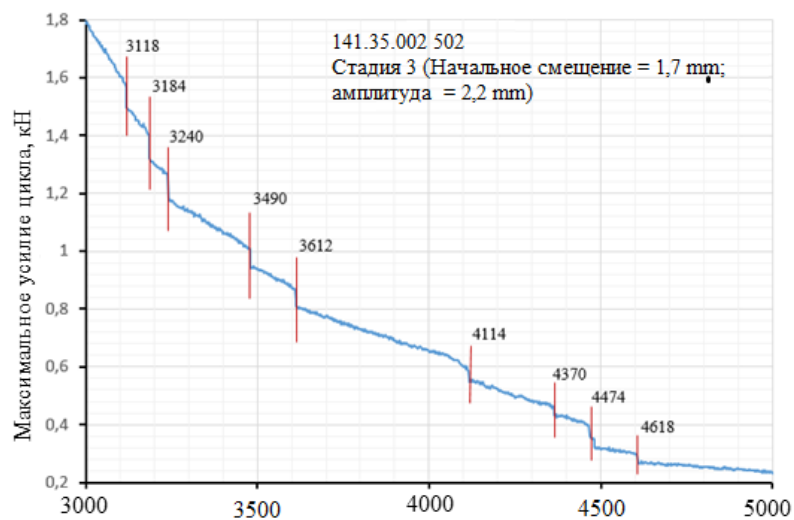
На рисунке 10 показаны диаграммы «Максимальное усилие цикла – номер цикла» для ЭС 141.35.002 502 для стадий 1–3. После стадии 1 на токоведущих ламелях ЭС трещин не обнаружено, однако под конец 2 стадии были обнаружены небольшие трещины, на ламелях, составляющие менее 0,1 высоты ламели. Данные надрывы ламелей отчетливо видны на графике (рис. 10а) на цикле 27650 и 29201.



a



б



в

Рис. 10. Диаграммы «Максимальное усилие цикла – номер цикла»:
a – испытание на стадиях 1 и 2; *б* – испытание на стадии 3, *в* – моменты обрыва ламелей

На 3 стадии испытаний после 1300 цикла нагружения началось плавное снижение величин максимальных нагрузок цикла (рис. 10б), обусловленное ростом усталостных трещин в ламелях. После 3100 цикла на графиках (рис. 10б и 10в) видно скачкообразное изменение силы, которое соответствовало разрушению одной из ламелей и далее поочередно. Коэффициент запаса для данного ЭС составил 5,05 (2020 циклов), возрастание коэффициента запаса обусловлено переносом места захода проволоки станка электроэрозионной обработки в область корня центрального фланца. В результате испытаний после 5000 циклом с перемещением 2,2 мм 95 % ламелей оказались разрушены, в оставшихся трещины составляли более половины высоты.

На рисунке 11 представлен ЭС 141.35.002 502 после прохождения квалификационных механических циклических испытаний по стадиям 1–2 и предельных испытаний стадии 3.



Рис. 11. ЭС 141.35.002 502 изготовленный в ФГУП «ПСЗ» после 3 стадии испытаний

Электрический соединитель 141.65.005 КВ-1

На рисунке 12 показаны диаграммы «Максимальное усилие цикла – номер цикла» для ЭС 141.65.005 КВ-1, изготовленного из бронзы производства АО «Завод «Красный Выборжец» для стадий 1 – 3. После 1 и 2 стадий испытаний на токоведущих ламелях ЭС трещин не обнаружено. На рисунке 13 представлен ЭС 141.65.005 КВ-1 после прохождения квалификационных механических циклических испытаний по стадиям 1–2 и предельных испытаний стадии 3.

На 3 стадии испытаний после 3436 цикла нагружения началось плавное снижение величин максимальных нагрузок цикла, обусловленное ростом усталостных трещин в ламелях. После 5902 цикла на графике видно скачкообразное изменение силы, которое соответствовало разрушению одной из ламелей. Коэффициент запаса для данного ЭС составил 11,75. Значительное отличие в пройденном числе циклов связано с различным различными механическими свойствами полуфабрикатов. Предел текучести для бронзы, предоставленной CSN Carl Schreiber GmbH при температуре 250 °С составляет в среднем 320 МПа в то время как для бронзы из АО «Завод «Красный Выборжец» данное значение составило более 440 МПа. Различие в прочностных свойствах сказалось в увеличении коэффициента запаса. В результате испытаний 10% ламелей полностью разрушены, в 90 % ламелях имеются трещины в зонах изгиба, которые составляли более половины высоты. Профили разрыва трещин не равномерные, трещины не лежат в одной плоскости, расположены на сгибах ламелей со стороны бокового и центрального фланцев. Далее в таблице 3 приведены результаты по всем прошедшим испытания ЭС.

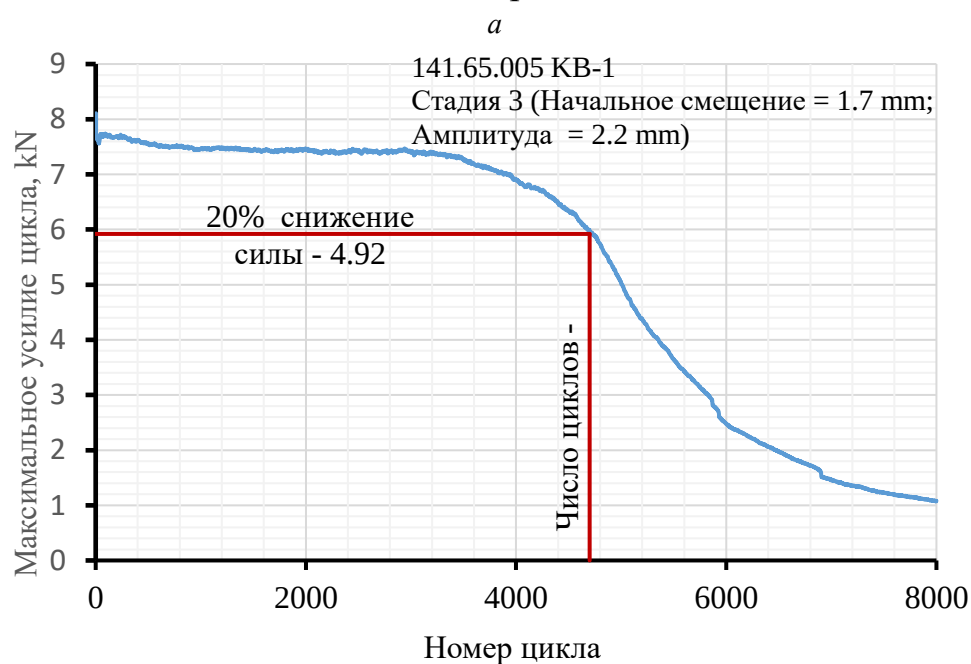
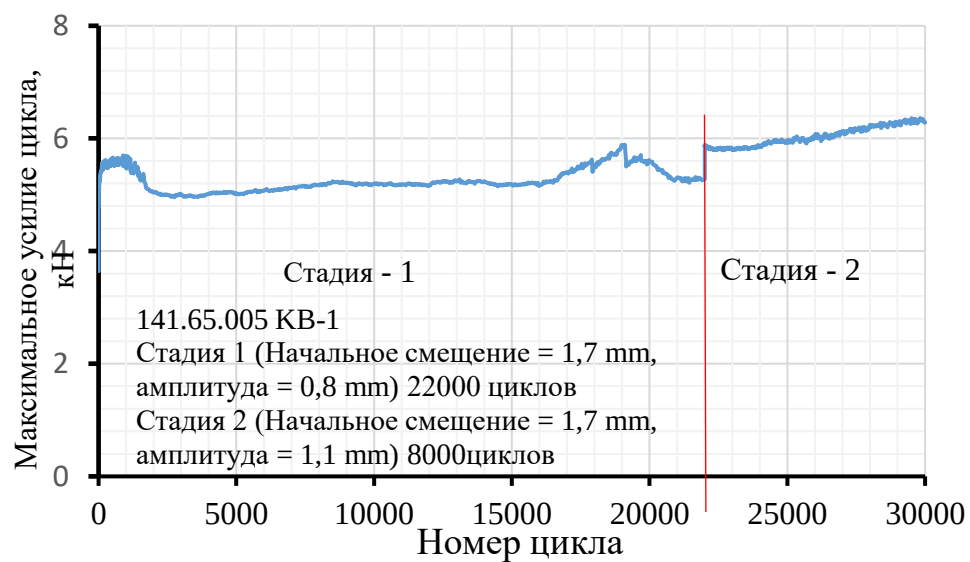


Рис. 12. Диаграммы «Максимальное усилие цикла – номер цикла»:
а – испытание на стадиях 1 и 2; б – испытание на стадии 3



Рис. 13. ЭС 141.65.005 KB-1, изготовленный в АО НИКИЭТ из бронзы
АО «Завод «Красный Выборжец» после 3-й стадии испытаний

Таблица 3

Результаты циклических механических испытаний 3 стадии

№	Маркировка	Число циклов с учетом допустимого разрушения (2 ламелли: снижение на 14(20) % по силе)	Требуемое значение	Коэффициент запаса
Изготовитель – АО «НИКИЭТ», материал – CSN Carl Schreiber GmbH				
1	141.35.002 001	1246	400	3,11
2	141.35.003 005	1684		4,21
3	141.35.003 006	1038		2,59
4	141.35.003 007	855		2,13
5	141.35.003 008	1500		3,75
Изготовитель - ФГУП «ПСЗ», материал – CSN Carl Schreiber GmbH				
6	141.35.002 502	2023	400	5,05
7	141.35.002 503	2086		5,21
8	141.35.001 504	4000		10
Изготовитель – АО «НИКИЭТ», материал - АО «Завод «Красный Выборжец»				
9	141.65.005 KB-1	4700	400	11,75
10	141.65.005 KB-2	7700		19,25
11	141.65.005 KB-3	4200		10,5

Заключение

Специалистами АО «НИКИЭТ» разработана конструкция ЭС бланкета ИТЭР, принятая в МО ИТЭР. Подготовлено РКД, разработаны план контроля размеров, процесс изготовления и процедуры, необходимые для серийного изготовления ЭС. Производством АО «НИКИЭТ» была отработана технология и изготовлены экспериментальные образцы ЭС 11 шт., а также 3 шт. были изготовлены в ФГУП «ПСЗ».

Специалистами АО «НИКИЭТ» были проведены как квалификационные механические циклические испытания ЭС так и предельные циклические испытания при температуре 290 °С. Было испытано 14 ЭС двух типоразмеров.

Конструкция ЭС полностью удовлетворяет критериям приемки, предъявляемым МО ИТЭР. Все ЭС прошли стадии испытаний 1 и 2, которые являются квалификационными, без замечаний.

Квалификационные испытания ЭС показали целесообразность изменения технологии изготовления ЭС: перенесения места захода проволоки при вырезании ламелей со сгибов ламелей к корню в районе центрального фланца.

Предельные циклические испытания показали, что минимальный коэффициент запаса относительно требуемых 400 циклов до момента, когда не более двух ламелей разрушено, составляет – 2,13 (855 циклов для ЭС 141.35.003 007 до доработки технологии изготовления), максимальный 19,25 (7700 циклов 141.65.005 KB-2) при проектных нагрузках, специфицированных МО ИТЭР.

В данный момент АО «НИКИЭТ» идет подготовка всех необходимых документов для начала серийного изготовления ЭС ППС и СМБ.