

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ САМОСТОПОРЯЩИХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ КРЕПЛЕНИЯ БЛАНКЕТА ИТЭР

Поддубный И.И., Козлов С.А., Свириденко М.Н., Данилов И.В., Паршутин Е.В.,
Тимофеев С.В., Апальков А.А., Усов С.М. (АО «НИКИЭТ», Москва, Россия),
Путрик А.Б. («Проектный центр ИТЭР», Москва, Россия)

Бланкет реактора ИТЭР состоит из 440 модулей. Модули бланкета (МБ) закреплены на вакуумной камере реактора с помощью резьбовых соединений, выполненных по специальной технологии EMUGE Self-lock, обеспечивающей самостопорящие свойства в резьбовом соединении. В следствии чего, поставочные комплекты АО «НИКИЭТ» включают резьбовые соединения М24, М52 и М64, выполненные с применением технологии EMUGE Self-lock.

Циклический режим работы реактора ИТЭР и события, обусловленные срывами плазмы с различной длительностью и уровнем электромагнитных сил, может привести к многочастотному знакопеременному нагружению резьбовых соединений, что требует гарантированного исключения самоотвинчивания в резьбовых соединениях, и обуславливает использование специальной резьбы типа EMUGE Self-lock, а в объем квалификационных испытаний включены тесты резьбовых пар на циклические нагрузки по методу Юнкера.

Данный метод предлагает сравнительные испытания двух резьбовых пар – пары с метрической резьбой в качестве реперного значения и пары с повышенными свойствами самостопорения. Пары нагружаются поперечной сдвигающей силой. Амплитуда подбирается такой, что за 1000 циклов нагружения в референсной паре усилие затяга падает практически до нуля. Далее, используя подобранные параметры (частота, амплитуда), испытывается пара с повышенными стопорящими свойствами. По уровню снижения усилия затяга болта по окончанию заданного числа циклов нагружения делается вывод о стопорящих свойствах.

В работе представлены результаты экспериментов по методу Юнкера пар М24 (реперная) и EMUGE Selflock-M24. В процессе испытаний достигнута рекомендованная стандартами частота 10 Гц. Амплитуда смещений принята в соответствии с требованием стандарта на тест Юнкера и составила $\pm 0,8$ мм. Проведены испытания как при проектных усилиях затяга резьбовых пар (90–105) кН, так и при повышенных значениях (130–155) кН.

В работе отмечено, что метрическая резьба обладает неудовлетворительными самостопорящими свойствами, так же, как и резьба EMUGE Self-lock в комбинации с антифрикционным покрытием при уровне средних напряжений в теле болта менее 35 % от предела текучести. Однако при средних напряжениях в теле болта достигающих (40–50) % от предела текучести раскручивания резьбой пары не происходит.

1. Постановка задачи

Бланкет реактора ИТЭР состоит из 440 модулей бланкета [1]. Каждый МБ состоит из защитного блока (ЗБ) и панели первой стенки (ППС), соединенных между собой механически и электрически [2]. Механическая связь ЗБ с ППС осуществляется с помощью сборки резьбового стакана, состоящей из бронзового стакана, центрального болта М64, изготавливаемого из высокопрочной стали марки 1.4980 (Grade 660) [3], и системы шайб. В зависимости от полоидального расположения ППС на ВК усилие затяга центрального болта М64 варьируется от (140–800) кН [4]. Крепление ЗБ к вакуумной камере (ВК) осуществляется с помощью гибких опор, входящих в состав системы соединителей МБ [5]. Одним из основных силовых элементов гибкой опоры является высокопрочный болт. В зависимости от полоидального расположения ЗБ на

своде ВК используются болты М64 и М52, затягиваемые с усилием 800 кН и 500 кН соответственно. Внутрикамерные компоненты ИТЭР представлены на рисунке 1.

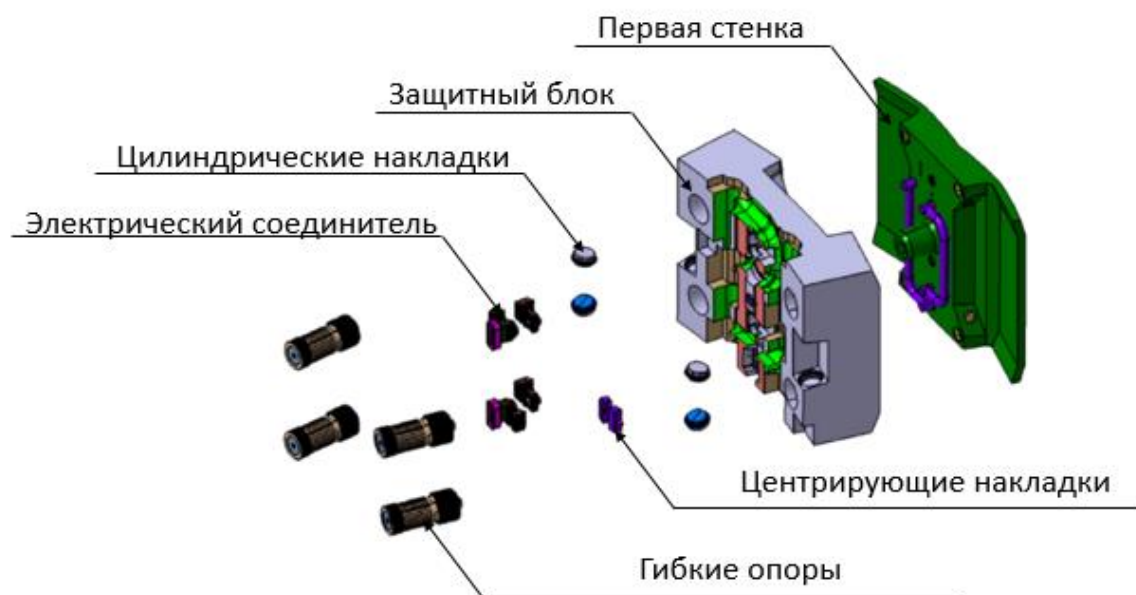


Рис. 1. Внутрикамерные компоненты ИТЭР

Каждый МБ ИТЭР включает 4 электрических соединителя [6, 7], по два на каждый контактный интерфейс: «ППС/ЗБ» и «ЗБ/ВК». Электрические соединители являются элементами электрической связи и позволяют отводить наведенный в МБ ток к ВК. Электрический соединитель представляет собой цельнометаллическую конструкцию, между фланцами которой расположены волнообразные токоведущие ламели. Крепление центрального фланца ЭС к пьедесталу ВК осуществляется с помощью болта М24.

Охлаждение МБ осуществляется путем подвода/отвода теплоносителя по специальной системе труб. Вся система включает 360 контуров охлаждения, питающих 440 МБ. В системе имеются трубы разного диаметра, соединенные между собой различными коллекторами, чтобы поддерживать скорость воды в каждой цепи на приемлемом уровне не более 7 м/с [4]. Крепление системы труб к ВК осуществляется с помощью резьбовых элементов [8].

ИТЭР предполагает установку около 50 диагностических систем для защиты реактора, управления плазмой и оптимизации, а также понимания физики горячей плазмы [8], в элементах конструкций которых присутствуют различные резьбовые элементы. Например, крепление Томпсоновской сканирующей диагностики осуществляется с помощью четырех винтов М5 [9].

Циклический режим работы реактора ИТЭР (Inductive I) и события, обусловленные срывами плазмы с различной длительностью и уровнем электромагнитных сил [10], приводят к многочастотному знакопеременному нагружению внутрикамерных компонентов [5], а, следовательно, и резьбовых соединений. Вибрация, вызванная данным нагружением, может привести к снижению усилия затяга в резьбовых элементах, и в пределе к полному развинчиванию, что вызовет 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 Spiralock® [11] или его аналога EMUGE Self-lock.

2. Самостопорящая резьбы Spirallock® и EMUGE Self-lock

Spirallock® предполагает использование модифицированного профиля резьбы гайки, который отличается от стандартной метрической резьбы, наличием дополнительного ребра под углом в 30 градусов в корне резьбы (рис. 2), при этом используется болт со стандартной метрической резьбой. При использовании Spirallock® болт свободно вворачивается в гайку до того момента пока болт не коснется дополнительного ребра резьбы гайки. Дальнейшее увеличение усилия, приложенного к болту, вызовет появление напряжений смятия в контактирующих деталях (рис. 3а), что обеспечивает самостопорящие свойства данной резьбы. Негативным моментом является то, что крутящий момент, необходимый для резьбы Spirallock®, как правило, на (10–20) % выше, что обусловлено перенаправлением усилий из осевого направления в радиальное для создания фиксации резьбового элемента [12].

Авторы ряда исследований [11], показали, что в резьбе Spirallock® наблюдается более равномерное распределение нагрузки по виткам резьбы (рис. 3б) по сравнению с распределением в метрической резьбе, первые оценки которого получены еще Н.Е. Жуковским в 1902 году и многократно уточнялись [13], где на первый виток приходится 35–40 % нагрузки, а витки после пятого практически не задействованы (усилие менее 5 %). Предполагается, что данное обстоятельство и обуславливает повышенную стойкость резьбы Spirallock® к вибрационным нагрузкам [12].

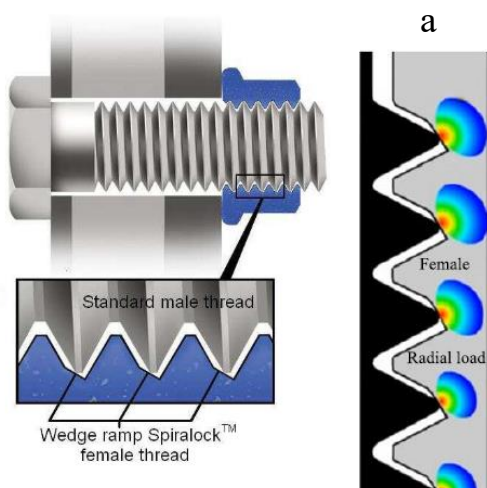


Рис. 2. Профиль резьбы Spirallock® [11]

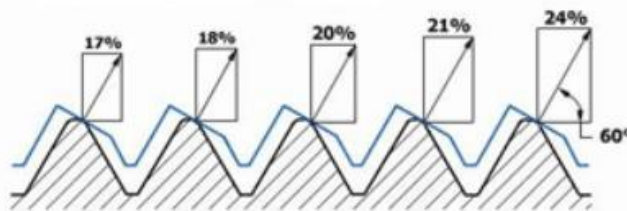


Рис. 3. Усилия в резьбе Spirallock® [12, 11]

Технология Spirallock® многократно проверялась аналитически и широко используется в технике. В работе [14] численно и экспериментально исследовалось влияние угла дополнительного ребра в корне резьбы, на самостопорящие свойства резьбы. Проанализированы решения с углом ребра от (10–50) градусов с шагом 5 градусов. Показано, что наилучшее самостопорящие свойства имеет решение Spirallock® с углом ребра 30 градусов. Экспериментальная проверка самостопорящих свойств проводилась с помощью испытаний по методу Юнкера [15]. Технология Spirallock® используется во многих отраслях промышленности от автомобилестроения до аэрокосмической отрасли, например, в космических миссиях НАСА, включая аппаратуру масс-спектрометра на миссии Гюйгенса, которая приземлилась на самой большой луне Сатурна – Титане [12].

Аналогом технологии Spirallock® на российском рынке является технология EMUGE Self-lock [16], которая также использует модифицированный резьбовой профиль гайки, с 30 градусным дополнительным ребром у корня резьбы и обеспечивающий более равномерное усилия по виткам резьбы. Однако, по требованию

Международной организации ИТЭР самоотпорящие свойства резьбы EMUGE Self-lock требуют экспериментального подтверждения по методу Юнкера.

3. Метод Юнкера

В настоящее время испытания стопорящих свойств по методу Юнкера являются стандартизованными и описаны в ряде международных и национальных стандартов, например, ISO 16130 [17] и немецкий национальный стандарт DIN 25201 [18]. Данные испытания проводятся на стандартных испытательных машинах – Юнкер-машина, схема которой представлена на рис. 4 [19]. Машина предназначена для создания поперечного относительного сдвига фланцев сборки, которое в соответствии с теорией Юнкера инициирует процесс самоотвинчивания. Стандарт [17] устанавливает требования к Юнкер- машине: частота должна быть (10–15) Гц и реализовывать относительное смещение с амплитудой 1,5 мм для резьбовых пар (РП) с диаметром до 25,4 мм (1 дюйм).

Испытания по методу Юнкера являются сравнительными (сравнивается незащищенное резьбовое соединение и соединение с повышенными стопорящими свойствами) и не дают абсолютного значения по стойкости стопорящего элемента.

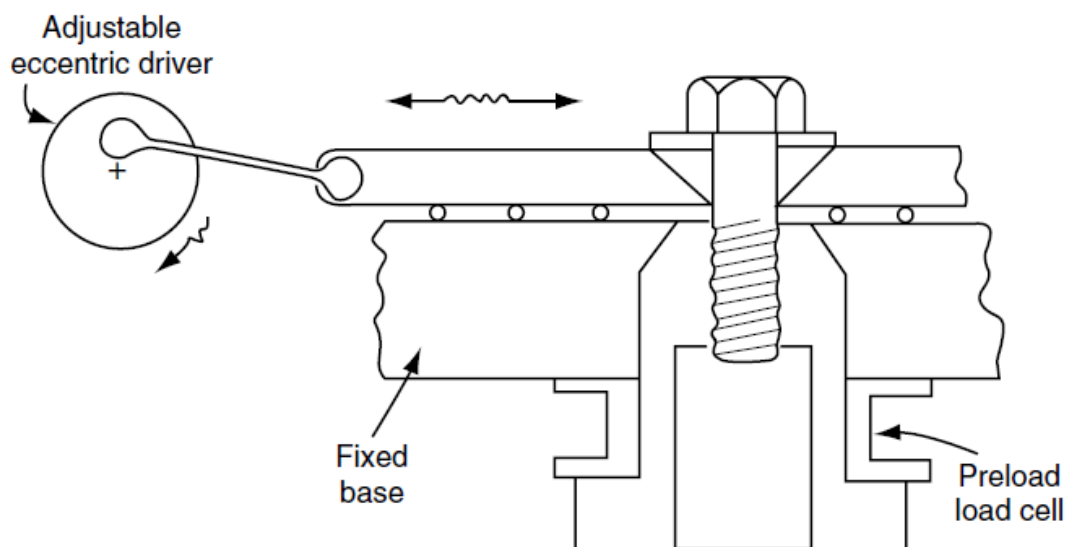


Рис. 4. Схема Юнкер-машины

В соответствии с [17] процедура испытаний по методу Юнкера состоит из следующих шагов:

- 1) На первом шаге испытывается соединение, незащищенное от развинчивания (референсная пара). Чаще всего это резьбовая пара с метрической резьбой. При заданной частоте циклирования подбирается такая амплитуда смещения, чтобы усилие затяга в референтной паре, измеряемое на каждом цикле нагружения, упало до нуля за (300 ± 100) циклов. Однако, [18] устанавливает другое требование – 2000 циклов. Стандарт [17] рекомендует использовать для резьбовых пар диаметром менее 12 мм амплитуду сдвига – 0,5 мм, а для больших резьбовых пар – 0,8 мм.
- 2) Далее проводятся испытания интересующей РП при тех же параметрах (амплитуда, частота и число циклов).
- 3) Оценка результатов эксперимента и стопорящих свойств резьбы проводится по величине относительного остаточного усилия затяга (Y) после испытаний [17]:

$$Y = \frac{F_2}{F_1} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где F_1 – первоначальное усилие затяга (до испытания), кН;
 F_2 – остаточное усилие затяга (после испытания), кН.

В зависимости от величины остаточного усилия выделяется три уровня стопорящих свойств, приведенных в таблице 1.

Таблица 1

Оценка самостопорящих свойств

Оценка	Относительное остаточное усилие затяга после испытаний, Y , %	Уровень самостопорящих свойств
1	85–100	Хорошие самостопорящие свойства
2	40–85	Допустимое снижение усилия затяга
3	0–40	Неприемлемые самостопорящие свойства

Производитель резьбы Spirallock® приводят в открытом доступе результаты тестирования для 28 РП диаметром $\frac{1}{4}$ ", испытанных при частоте 20 Гц и амплитуде смещения 0,8 мм [11] (рис. 5). Испытания показывают, что резьба Spirallock® имеет хорошие самостопорящие свойства.

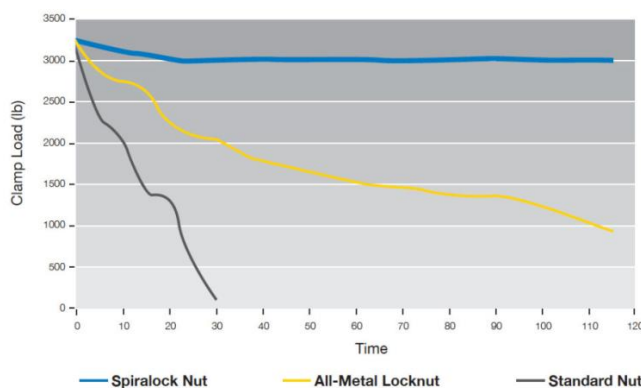


Рис. 5. Испытания по методу Юнкера резьбы для гаек диаметром $\frac{1}{4}$ "

Большинство производителей крепежа (Spirallock, Nord-Lock, HARDLOCK), обладающего свойствами самостопорения, приводят результаты тестирования для относительно небольших РП М8 – М12 [11, 20, 21]. Кроме того, большинство представленных на рынке Юнкер-машин позволяют производить испытаний РП диаметром до (12–16) мм [22, 23], однако, встречаются и уникальные установки, позволяющие испытывать РП диаметром до 36 мм [24] и 48 мм [25]. В ряде работ предлагается вместо Юнкер машины использовать стандартную сервогидравлическую машину [26, 27], позволяющую также создать относительное смещение фланцев сборки.

Ввиду отсутствия в рассмотренной литературе результатов испытаний самостопорящих свойств резьбы Selflock с антифрикционным покрытием на основании требования МО ИТЭР были проведены испытания РП М24 на оборудовании АО «НИКИЭТ».

4. Результаты испытаний резьбовой пары M24

Объектом испытаний является РП, состоящая из болта M24 и гайки, резьба которой выполнена по технологии EMUGE Self-lock, элементы РП изготовлены из стали марки 1.4980 (Grade 660). Основные размеры РП представлены на рис. 6. В конструкции электрического соединителя бланкета ИТЭР для компенсации релаксации усилия затяга болта введена упругая шайба [6, 7]. В конструкции объекта испытаний упругая шайба сохранена.

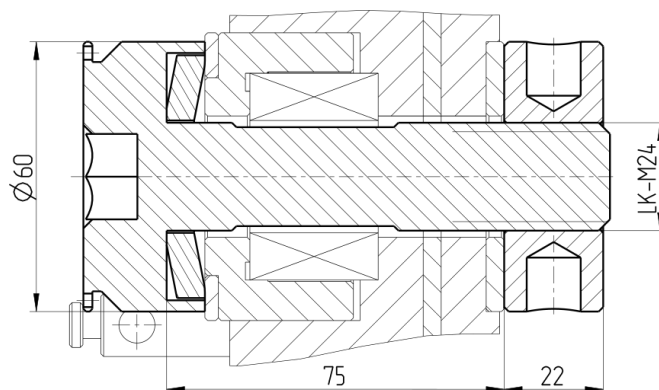


Рис. 6. Основные геометрические характеристики резьбовой пары M24

В работе [28, 29] показано, что в условиях близких к условиям работы ИТЭР наблюдается схватывание резьбовых элементов. Так как одним из требований к конструкциям внутрикамерных компонентов является обеспечение возможности полной разборки по окончанию кампании, то на все резьбовые поверхности должно быть нанесено антифрикционное и антисхватывающее покрытие (АФП/АСП), например, на основе дисульфида молибдена [30]. На элементы РП методом физического осаждения в вакууме (PVD) нанесен дисульфид молибдена MoS_2 . На рисунке 7 показаны элементы РП после нанесения АФП/АСП.



Рис. 7. Общий вид РП M24 после нанесения MoS_2 :
а – болт M24 после нанесения MoS_2 ; б – гайка M24 после нанесения MoS_2

Испытания по методу Юнкера проводилось с помощью испытательной оснастки, схема которой представлена на рис. 8, установленной на захватах сервогидравлической машины Instron 8802 (рис. 9). В процессе испытаний на каждом цикле нагружения фиксировалось осевое усилие в болте с помощью датчика силы KMR/400kN и относительное смещение фланцев оснастки с помощью датчика перемещения WI/10/T.

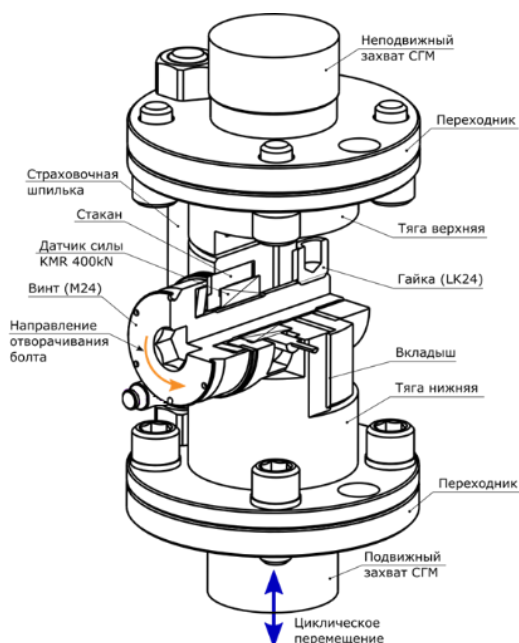


Рис. 8. Схема испытательной оснастки

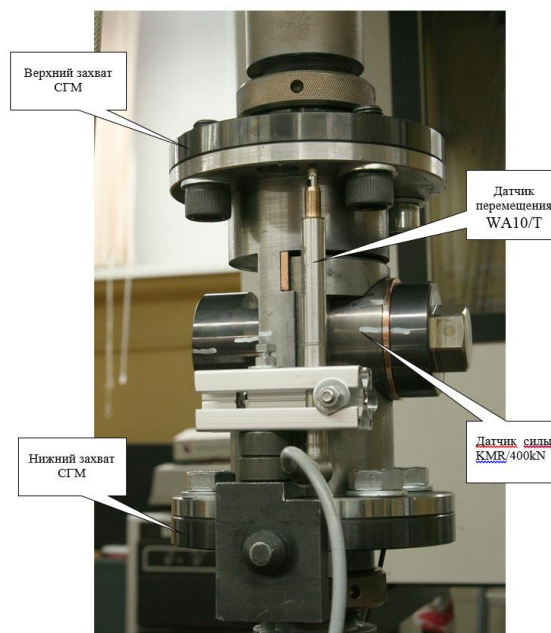


Рис. 9. Испытательная оснастка

На основе стандарта [17] и условий работы центрального болта электрического соединителя были выбраны следующие параметры испытаний:

- амплитуда: не более 0,8 мм;
- частота: 10 Гц;
- количество циклов: не более 1000;
- смазка: PVD MoS₂.
- усилие затяга болта: номинальное значение – (90–105) кН.
повышенное значение – (130–155) кН.

В соответствии с [17] первое нагружение РП М24 № 1 проводилось с метрической резьбой. В соответствии со стандартом [17] РП М24 №1 была испытана три раза. Диаграмма усилие затяга от времени после 1000 циклов для трех испытаний показана на рис. 10. После 1000 циклов нагружения для испытаний 1 и 2 РП № 1 полностью раскрутилась. После испытаний № 3 остаточное усилие затяга составило 7,6 кН (Таблица 2). Наличие остаточного усилия в испытаниях № 3 может свидетельствовать об истирании АФП/АСП (рис. 11). Полученные результаты показывают, что выбранные параметры испытаний могут быть использованы для дальнейших испытаний гаек с резьбой EMUGE Self-lock.

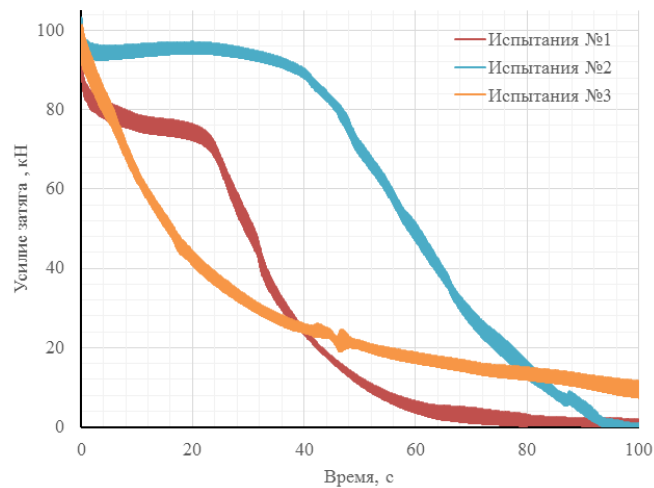


Рис. 10. Диаграмма усилие затяга от времени для РП M24 № 1, нагружение 1



а

б

Рис. 11. Общий вид РП M24 после нанесения MoS_2 :

а – болт M24 после испытаний; б – гайка M24 после испытаний

Далее были проведены испытания РП № 2 и 3 с гайками с резьбой EMUGE Self-lock при выбранных параметрах испытаний. Первоначальные усилия затяга составляло 99 кН и 107 кН, что создает среднее напряжение в теле болта равное 31 % и 34 % от предела текучести для стали марки 1.4980, определенного для прутков из которых были изготовлены РП. Однако, на первых циклах нагружения РП № 2 усилие затяга РП возросло до 126 кН, но после 10 цикла усилие затяга значение вернулось к первоначальному значению. Наблюдается непрерывное падение усилия затяга РП и после 460 цикла РП полностью раскрутилась (рис. 12). Для РП № 3 наблюдается монотонное снижение усилия затяга вплоть до 760 цикла нагружения, когда РП № 3 полностью раскрутилась.

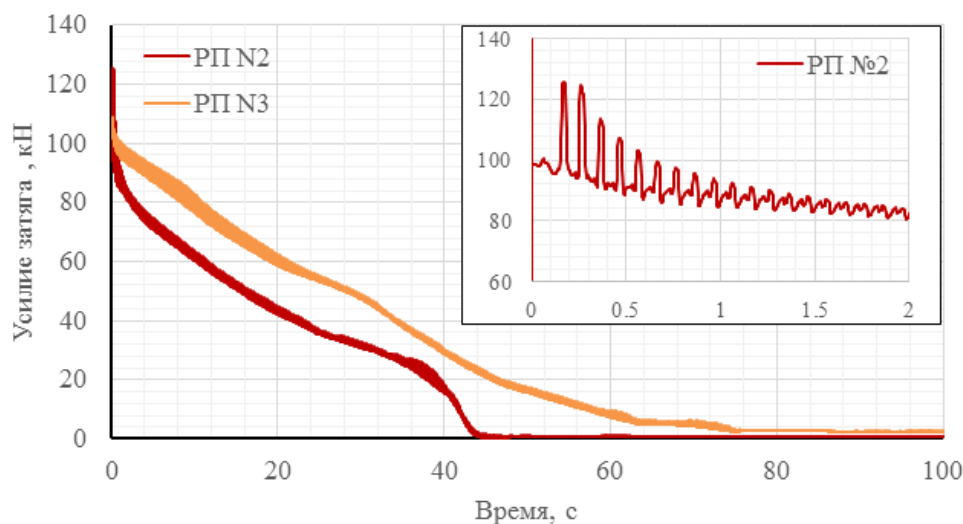


Рис. 12. Диаграмма усилие затяга от времени для РП М24 № 2 и №3

Производители инструмента для изготовления резьбы Spiralock рекомендуют использовать свои решения при усилии затяга болта составляющего порядка 75 % от предела текучести. В работе [14] показано, что стопорящие свойства резьбы Spiralock® снижаются при снижении величины первоначального затяга болта. Данным обстоятельством можно объяснить раскручивание РП №2. Для подтверждения самостопорящих свойств резьбы EMUGE Self-lock РП №3 была повторно испытана при усилии затяга болта, составляющего 133 кН, что соответствует 42 % от реального значения предела текучести. Результаты повторных испытаний РП №3 с увеличенным значением затяга болта представлены на рис. 13. Увеличение усилия затяга болта привело к стабилизации самостопорящих свойств. После 1000 циклов нагружения остаточное усилие затяга болта составило – 90 кН (табл. 2). И в соответствии со стандартом [17] РП № 3 продемонстрировала допустимое снижение усилия затяга.

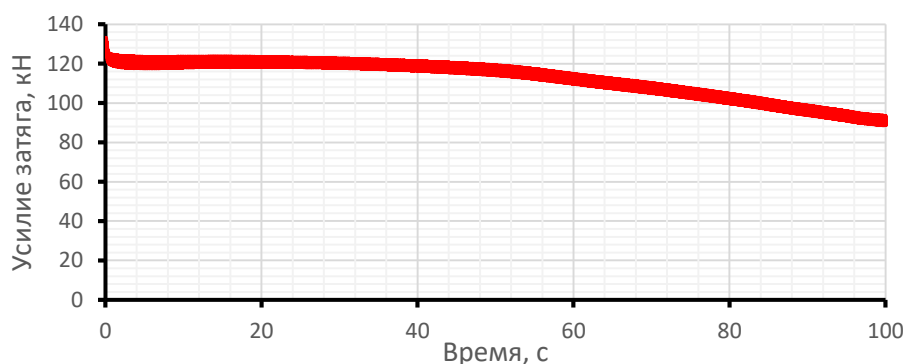


Рис. 13. Диаграмма усилие затяга от времени для повторных испытаний РП М24 № 3

Дальнейшие два испытания проведены для РП № 3 и 4 при усилии затяга болта 155 и 150 кН, что соответствует напряжению составляющему 49 и 47 % до предела текучести. Результаты испытаний РП представлены на рисунке 14. Остаточные усилия затяга РП составили 152 кН для РП № 3 и 124 кН для РП № 4 соответственно. Меньший процент снижения усилия для РП № 3 можно объяснить деградацией АФП при третьем закручивании, что положительно влияет на эффект самостопорения. Дополнительное нагружение РП № 4 в течении 1000 циклов нагружения не привело к существенному снижению усилия затяга РП.

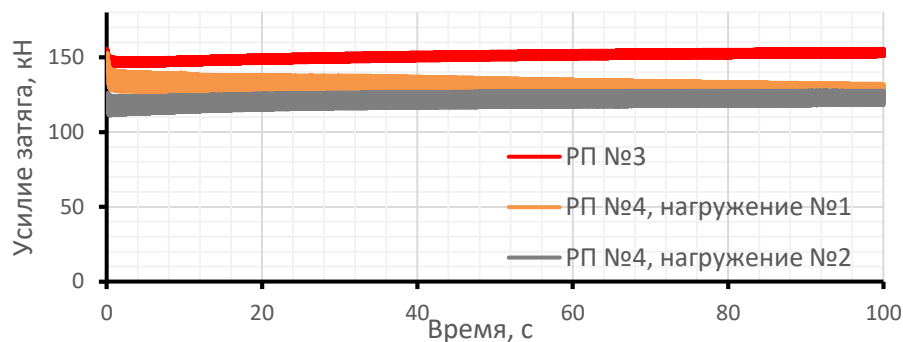


Рис. 14. Диаграмма усилие затыга от времени для испытаний РП М24 № 3 и 4

Обобщение результатов испытаний представлено в табл. 2. Основываясь на результатах испытаний можно сделать вывод о том, что увеличение усилия затыга РП до значений составляющих (40–50) % от предела текучести положительно влияет на самостопорящие свойства резьбы Selflock. Тогда как при уровне напряжений, составляющих менее 34 % от предела текучести, комбинация резьбы Selflock и АФП не обеспечивает самостопорения и приводит к потере усилия затыга.

Таблица 2

Результаты циклических нагружений

РП	Номер испытания	Тип резьбы гайки	F_1 , кН	R_y , %	F_2 , кН	Y , %	Число циклов до откручивания
М24 РР № 1	1	М	93	29	1	1	800
	2	М	103	33	1	1	920
	3	М	98	31	8	8	–
М24 РР № 2	1	LK	99	31	1	1	440
М24 РР № 3	1	LK	107	34	3	2	800
	2	LK	133	42	90	68	–
	3	LK	155	49	153	98	–
М24 РР № 4	1	LK	150	47	124	83	–

F_1 – первоначальное усилие затыга (до циклического нагружения);
 F_2 – остаточное усилие затыга (после циклического нагружения);
М – метрическая резьба; LK – резьба Selflock;
 R_y – отношение средних напряжений в теле болта, вызванных первоначальным усилием затыга к пределу текучести стали 1.4980 (700 МПа);
 Y – относительное остаточное усилие затыга, %

Заключение

- Разработана и отлажена методика испытаний, изготовлены опытные образцы и экспериментальная оснастка.
- Испытания РП М24 показали не удовлетворительные самостопорящие свойства резьбы Selflock при специфицированном МО ИТЭР усилия затыга болта (90–105) кН (менее 34 % от предела текучести). При этом производитель резьбы Spiralock рекомендуют использовать свои решения при усилии затыга болта составляющего порядка 75 % от предела текучести. В работе [14] показано, что стопорящие свойства резьбы Spiralock® снижаются при снижении величины первоначального затыга.

- При увеличении усилия затяга болта до уровня (130–155) кН (40–50 % от предела текучести) наблюдаются допустимые самостопорящие свойства и РП успешно прошли запланированную программу испытаний.
- На основании результатов испытаний рекомендуется увеличить усилие затяга болта электрического соединителя при сборке бланкета ИТЭР до уровня (140–155) кН.
- Полученные результаты неприемлемых самостопорящих свойств резьбы EMUGE Self-lock в комбинации с антифрикционным покрытием, ставят вопрос о надежности крепления ППС к ЗБ при снижении усилия затяга центрального болта ниже 350 кН, что вполне может быть реализовано в ИТЭР [4] и требует отдельного исследования.

Работа выполнена частично в рамках договора №71-26до от 16 июня 2021 г между «ИТЭР-Центр» (Заказчик) и АО «НИКИЭТ» (Исполнитель).

Список литературы

1. *R. Raffray et al.*, The ITER Blanket System Design Challenge // Nuclear Fusion. 54(3) (2014). DOI: 10.1088/0029-5515/54/3/033004
2. *И.В. Данилов, А.Ю. Леиуков, А.В. Размеров, М.Н. Свириденко, Ю.С. Стребков, И.В. Мазуль, А.А. Герваш, А.Н. Лабусов*, «Несущая конструкция первой стенки модуля бланкета ИТЭР» // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 1, 17–43
3. *T. Hirai, V. Barabash, F. Escourbiac, A. Durocher, L. Ferrand, V. Komarov, M. Merola*, «ITER divertor materials and manufacturing challenges» // Fusion Engineering and Design, 125 (2017) 250–255
4. *M. Merola et. al.* Engineering challenges and development of the ITER Blanket System and Divertor // Fusion Engineering and Design 96–97 (2015) 34–41
5. *S. Khomiakov, I. Poddubnyi, V. Kolganov, A. Zhmakin. et al.*, ITER blanket module connectors. Design, analysis and testing for procurement arrangement // Fusion Engineering and Design 109–111. Part A. (2016) 261–266
6. *I. Poddubnyi et. al.* Analysis and experimental justification of electrical connector for ITER blanket module // Fusion Engineering and Design, 124 (2017) 516–521
7. *M. Sviridenko, et.al.* Design, analysis and manufacturing of electrical strap for enhanced first wall panel // Fusion Engineering and Design, 123 (2017) 326–330
8. *A. Martin, G. Dellopoulos, P. Edwards, et al.*, ITER blanket manifold system: integration, assembly and maintenance // Fusion Engineering and Design 89 (2014) 2257–2261.
9. *G. Martinez, et.al.* Diagnostic integration solutions in the ITER first wall // Fusion Engineering and Design 98–99 (2015) 1548–1551
10. *V. Rozov et. al.*, Strategy for solving a coupled problem of the electromagnetic load analysis and design optimization for local conducting structures to support the ITER blanket development // Fusion Engineering and Design 89 (2014) 2691–2708.
11. <https://www.stanleyengineeredfastening.com/brands/optia/spirallock>
12. *A.S. Tremsin et.al.* Examination of Loads in Regular and Self-locking Spirallock Threads // Strain (2016), 52, 548–558
13. Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. – М.: Машиностроение, 1990. – 368 с.: ил.
14. *J. Liu, H. Gong, X. Ding.* Effect of ramp angle on the anti-loosening ability of wedge self-locking nuts under vibration // Journal of Mechanical Design 140 (2018)
15. Junker, G. H, New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration // SAE Transactions, Vol. 78 (1969), pp.314–335.
16. <http://www.emuge-franken.ru/5materials/brachur/ZP10026.html> Каталог «Резьбовой инструмент для изготовления внутренней резьбы, устойчивой к самопроизвольному ослаблению и развинчиванию при эксплуатации»
17. ISO 16130:2015. “Aerospace series – Dynamic testing of the locking behavior of bolted connections under transverse loading conditions (vibration test)”

18. DIN 25201-4: 2010-03 Annex B Test specification for demonstrating the resistance to self-loosening of secured bolted joints, Deutsches Institut für Normung c.V., Berlin 2010.
19. John H. Bickford. Introduction to the Design and Behavior of Bolted Joints. Non-Gasket Joints. Fourth Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group
20. <http://skyfix.ru/index.php/component/content/article/8-nord-lock/2-junker-test>
21. <https://www.hardlock.co.jp/en/technical-info/data/junker-test/>
22. <http://www.tchsyj.cn/index.php/product/index/g/e/id/14.html>
23. <https://vibrationmaster.com/solutions/one-day-junker-test/>
24. https://www.test-gmbh.com/fileadmin/data/produkte/pruefmaschinen/reibwertpruefmaschinen/Testing_Machines_for_friction_coefficient_analysis_of_screws_nuts_and_bolts.pdf
25. https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=-_mMr02R_qI
26. Ya. Jiang, M. Zhang, Chu-Hwa Lee. A study of early stage self-loosening of bolt joints // Journal of Mechanical Design 125 (2003) 518-526
27. G. Yang et. al. Experimental study and life prediction of bolt loosening life under variable amplitude vibration // Shock and Vibration Volume 2019, <https://doi.org/10.1155/2019/2036509>
28. P. Edwards, H. Altmann, A. Loving, L. Pedrick, J. Tait, M. Way «Operational experience with a variety of plasma facing tile assemblies at JET», // Fusion Engineering and Design 56–57 (2001) 451–455
29. P. Bunting, V. Thompson, V. Riccardo. «Fastener investigation in JET» // Fusion Engineering and Design 112 (2016) 42–46
30. V. Thompson, R. Eaton, R. Raffray, K. Egorov. Properties of low friction anti-seize coatings for fusion applications // Fusion Engineering and Design, 146, Part A (2019) 345-348