# удк 621.039.63 НЕСУЩАЯ КОНСТРУКЦИЯ ПЕРВОЙ СТЕНКИ МОДУЛЯ БЛАНКЕТА ИТЭР

И.В. Данилов<sup>1</sup>, А.Ю. Лешуков<sup>1</sup>, А.В. Размеров<sup>1</sup>, М.Н. Свириденко<sup>1</sup>, Ю.С. Стребков<sup>1</sup>, И.В. Мазуль<sup>2</sup>, А.А. Герваш<sup>2</sup>, А.Н. Лабусов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГУП «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

Панели первой стенки (ПС) являются энергонапряжёнными внутрикамерными компонентами международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР. Российская Федерация несёт ответственность за разработку, изготовление, испытания и поставку 176 панелей ПС, предназначенных для восприятия повышенного (до 5 МВт/м<sup>2</sup>) теплового потока из плазмы. ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» и ОАО «НИКИЭТ» являются организациями, ответственными за поставку компонентов ПС на площадку ИТЭР, поэтому разработка конструкции, её расчётное и экспериментальное обоснование проводятся в тесной кооперации с целью соблюдения сроков, предусмотренных Соглашением с Международной организацией (МО) ИТЭР о поставке (ноябрь 2013 г.): ОАО «НИКИЭТ» разрабатывает конструкцию, изготавливает и поставляет в ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» несущие конструкции первой стенки (НКПС); ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» разрабатывает и изготавливает энергонапряжённые компоненты (пальцы) ПС, а также производит окончательную сборку панелей ПС и последующую поставку на площадку ИТЭР. В настоящей статье приведены результаты разработки и расчётного обоснования НКПС (узел находится в зоне ответственности ОАО «НИКИЭТ»), предложенной специалистами ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» и ОАО «НИКИЭТ»), предложенной специалистами ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» и одо «НИКИЭТ»), предложенной специалистами ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» и одо «НИКИЭТ»), предложенной специалистами ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» разрабатывает и изготавливает в энергонапряжённые компоненты (пальцы) ПС, а также производит окончательную сборку панелей ПС и последующую поставку на площадку ИТЭР. В настоящей статье приведены результаты разработки и расчётного обоснования НКПС (узел находится в зоне ответственности ОАО «НИКИЭТ»), предложенной специалистами ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» и ОАО «НИКИЭТ» и принятой МО ИТЭР в качестве базового варианта. Показано, что данный вариант НКПС и элементов системы крепления работоспособен в индуктивном режиме эксплуатации установки ИТЭР.

**Ключевые слова:** панель первой стенки, повышенный тепловой поток, несущая конструкция, сварное крепление, расчётное обоснование, распределение температур, напряженно-деформированное состояние, оценка прочности.

# DESIGN DEVELOPMENT AND ANALYSIS RESULTS FOR THE EHF FW PANELS OF ITER BLANKET

I.V. Danilov<sup>1</sup>, A.Yu. Leshukov<sup>1</sup>, A.V. Razmerov<sup>1</sup>, M.N. Sviridenko<sup>1</sup>, Yu.S. Strebkov<sup>1</sup>, I.V. Mazul<sup>2</sup>, A.A. Gervash<sup>2</sup>, A.N. Labusov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Moscow, Russia <sup>2</sup> D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, St.-Petersburg, Russia

The first wall (FW) panels are plasma-facing (PFC) in-vessel components of ITER machine. In the framework of ITER Agreement Russian Federation is responsible for the design development, manufacturing, testing and delivery of the enhanced heat flux (EHF) FW panels (176 products which are intended to absorb the heat flux from plasma up to 5 MW/m<sup>2</sup>. In its turn Efremov Institute and NIKIET are the responsible for the delivery of the FW components on the ITER site. For this reason the FW design development, analytical and experimental assessments should be performed in tight cooperation in order to provide the data of delivery (date of signing the Procurement Agreement with IO is November, 2013). NIKIET is responsible for the design development, manufacturing and delivery to Efremov Institute of the FW load-bearing structure. Efremov Institute is responsible for the design and manufacturing of the FW PFC (fingers), final assembling of panels and delivery to the ITER site. The article presents the brief results of design development and analysis for the load-bearing FW structure which has been proposed by Efremov Institute and approved by IO as baseline design of the EHF FW. The results verify the ability of the FW load-bearing structure operation (including the elements of attachment system to the shield block) for the Inductive mode.

Key words: first wall panel, enhanced heat flux, load-bearing structure, welded joint, analytical assessment, temperature distribution, stressed-strained state, structural analysis.

### введение

По результатам 2011 г. было продемонстрировано, что конструкция панели ПС с использованием штифтового крепления энергонапряжённых компонентов (пальцев) к НКПС не работоспособна в предполагаемых для неё условиях эксплуатации. Кроме того, были отмечены следующие существенные недостатки конструкции панели ПС:

— сложность, а в ряде случаев невозможность реализации технологии изготовления и сборки панели;

— использование в конструкции материалов (алюминиевая бронза и сплав Inconel 718) с неподтверждёнными экспериментально свойствами под облучением до ожидаемых доз, а также соединений разнородных материалов (алюминиевая бронза/аустенитная сталь 316L(N)—IG) с отсутствием отработанной технологии реализации;  — патрубки подачи теплоносителя из НКПС в каждый палец ПС совмещают функции обеспечения границы с вакуумом и опорных элементов;

— электромагнитные силы, возникающие при срывах плазмы, приводят к срезу штифтов системы крепления пальцев ПС к НКПС (увеличение диаметра штифта не представляется возможным);

— экспериментальное обоснование работоспособности конструкции ПС со штифтовым креплением пальцев является дорогостоящим мероприятием с непредсказуемыми результатами;



— не обеспечивается ресурс по усталостной прочности в компонентах панели ПС.

Специалисты ФГУП «НИИЭФА» и ОАО «НИКИЭТ» в начале 2012 г. разработали «альтернативную» конструкцию панели ПС, позволяющую устранить указанные недостатки. Особенности и достоинства «альтернативной» конструкции следующие (рис. 1):

— сварное крепление каждого пальца к НКПС (два силовых шва);

— опорные элементы («крылья»)
 НКПС трансформируются в несущую (стальную) часть пальцев;

— НКПС — блок коллекторов теплоносителя с функцией размещения элементов крепления ПС на защитном блоке (ЗБ) модуля бланкета (МБ) (рис. 2);

— нет необходимости в штифтовом креплении и, как следствие, в использовании соответствующих материалов и их соединений.



Рис. 2. Общий вид МБ № 14 в сборе

После ряда рабочих совещаний позиция специалистов ФГУП «НИИЭФА» и ОАО «НИКИЭТ» о прекращении дальнейших разработок конструкции ПС со штифтовым креплением и концентрации усилий на обосновании «альтернативного» (далее — сварного) варианта была поддержана МО ИТЭР. Таким образом, российской стороне, как ответственной за разработку конструкции, расчётное обоснова-

ние, испытания, изготовление и поставку панелей ПС, предназначенных для восприятия повышенного теплового потока до 5 MBт/м<sup>2</sup> (EHF FW Panels), необходимо выполнить расчётно-конструкторские работы в обоснование сварного варианта конструкции ПС модулей № 8, 14, 16 и 18.

### ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

МБ ИТЭР включает две основные сборочные единицы (см. рис. 2): панель ПС и защитный блок (ЗБ), которые соединены гидравлически по теплоносителю и механически с помощью специальной системы крепления.

В свою очередь, панель ПС является сборочной единицей, в состав которой входят следующие элементы (см. рис. 1):

— энергонапряжённые компоненты (обращённые к плазме и предназначенные для восприятия теплового потока до 5 МВт/м<sup>2</sup>, далее — пальцы ПС);

— НКПС;

система механического крепления на ЗБ МБ;

патрубки подвода/отвода теплоносителя;

— два электрических замыкателя (на рис. 1 не показаны).

НКПС является опорной структурой для пальцев, каждый из которых фиксируется на её внешней поверхности с помощью двух силовых сварных швов. Кроме того, пальцы ПС соединены с НКПС гидравлически: теплоноситель поступает в раздаточные коллекторы НКПС, далее в тракт охлаждения собственно НКПС, затем в тракты охлаждения пальцев ПС. Механическое крепление панели ПС к ЗБ осуществляется с помощью центрального болта и системы контактных накладок (см. рис. 1).

НКПС — металлоконструкция с фасонной внешней конфигурацией имеет форму двутавра с наклонными полками (в терминологии МО ИТЭР — X-shape) (рис. 3). Габаритные размеры НКПС зависят

клонными полками (в терминологии мо от расположения модуля бланкета и составляют ~1000×750×100 мм в полоидальном, тороидальном и радиальном направлении соответственно. Наклонные поверхности двутавровых полок НКПС предназначены для восприятия радиального крутящего момента, действующего на панель ПС при срывах плазмы, поэтому на них располагаются четыре радиальные контактные накладки (РКН). На тыльной (обращённой к ЗБ) поверхности НКПС располагаются четыре полоидальные контактные накладки (ПКН), предназначенные для восприятия усилий от дей-



Рис. 3. НКПС (вид со стороны первой стенки)

ствия полоидального крутящего момента, возникающего также при срывах плазмы.

Также к тыльной поверхности НКПС приваривается специальный стакан для размещения центрального болта (см. рис. 3), включая систему фиксации последнего при транспортировке панели ПС в сборе. Поверхности накладок, контактирующие с НКПС, снабжены электроизоляционным покрытием (ЭИП). Конструкция накладок, система их фиксации, а также результаты расчётного обоснования представлены в материале [7].

В центральной части НКПС, на продольной (полоидальной) оси симметрии, расположены пять сквозных цилиндрических отверстий (проходок) различного функционального назначения (см. рис. 1, 3): два отверстия под захват перегрузочного манипулятора системы дистанционного обслуживания внутрикамерных компонентов ИТЭР (далее — ППМ), используемые также для затяга центральных болтов крепления электрических замыкателей; два отверстия под приварку патрубков теплоносителя (ППТ); центральное отверстие для операций затяга/отвинчивания центрального болта (ПЗБ) системы крепления панели ПС к ЗБ. Также в массиве НКПС выполнены два ряда цилиндрических отверстий под размещение патрубков подвода/отвода теплоносителя (по 20 отверстий в каждом ряду в соответствии с общим количеством пальцев — 40). Каждый из 40 пальцев приваривается к НКПС двумя силовыми швами, поэтому в центральной части и на периферийном периметре НКПС (на поверхности НКПС, обращённой к плазме) выполнены специальные усиления толщиной 15 мм под формирование указанных швов (см. рис. 3).

На указанных усилениях предусмотрены дистанционаторы размером 2×3 мм, которые обеспечивают позиционирование пальцев при сварке, а также позволяют выполнить непрерывные сварные швы по всему полоидальному размеру панели. Таким образом, для соединения всех 40 пальцев с НКПС требуется выполнить четыре сварных шва (два в центральной части и два по периферийному периметру НКПС). Дистанционаторы не являются силовыми (нагруженными механически) элементами и будут впоследствии удаляться фрезерованием или сверлением.

Конструкция пальцев ПС представлена на рис. 4. Каждый палец ПС — трёхслойная структура, включающая стальную опорную конструкцию, бронзовый теплопроводящий слой и защитное бериллиевое покрытие. Соединение стальной части пальца и теплопроводящего слоя (CuCrZr—бронза) осуществляется в два последовательных этапа: методом сварки взрывом соединяется теплопроводящий слой и промежуточный стальной бурт толщиной 5 мм, затем производится лазерная сварка указанного бурта со стальной опорной частью пальца (см. рис. 4). Защитное покрытие (бериллиевые плитки) соединяется с теплопроводящим слоем методом пайки твёрдым припоем.



Рис. 4. Конструкция пары соседних пальцев ПС, соединённых гидравлически последовательно

Фронтальный канал охлаждения пальца ПС выполнен по технологии Hypervaportron (HVP) с целью повышения эффективности теплоотдачи в режиме кипения с недогревом водяного теплоносителя. Для технологии HVP жёстким требованием стабильного функционирования является наличие скорости в канале теплоносителя пальца не менее 2 м/с, что и послужило причиной последовательного гидравлического соединения каждых двух соседних пальцев ПС. Гидравлическое соединение пальцев реализовано через перепускную трубку (см. рис. 4).

Отдельного рассмотрения требует система крепления панели ПС на ЗБ МБ, в частности, схема фиксации центрального болта при транспортировке панели в сборе. Стакан, предназначенный для размещения болта — цилиндрическая гильза, состоящая из внутренней и внешней частей (рис. 5) и снабжённая каналами охлаждения. Усложнение конструкции стакана как элемента системы крепления панели ПС связано с необходимостью сохранения усилия затяга болта на уровне не ниже первоначального значения (обеспеченного при монтаже панели) во время эксплуатации. Тракт охлаждения, предусмотренный в стакане, позволяет ограничить величины температурных расширений системы «НКПС-стакан-болт» и, как следствие, обеспечить усилия затяга болта не ниже первоначального уровня. Внутренняя часть стакана (см. рис. 5) приваривается силовым швом к поверхности НКПС, обращённой к ЗБ, затем на ней нарезается внутренняя резьба, посредством которой болт фиксируется (головка болта снабжена ответной наружной резьбой) перед приваркой внешней части стакана. Внешняя часть стакана предназначена для создания стыка в резьбовом соединении «панель ПС—3Б», поэтому для создания требуемых характеристик данного соединения (отсутствие изгиба на стержне болта, электрическая изоляция от ПС, отсутствие скольжения по изоляции и т.д.) внутрь неё устанавливается по посадке H7/j<sub>s</sub>6 электроизоляционная вставка. После установки электроизоляционной вставки внутрь внешней части (внешней гильзы) стакана устанавливается сферическая шайба, предназначенная для устранения изгиба стержня болта. Последней операцией сборки стакана является приварка (лазером или аргоно-дуговой сваркой (АДС)) его внешней части к внутренней, в которую вкручен болт, как показано на рис. 5.

Система охлаждения панели ПС обеспечивает циркуляцию теплоносителя в трактах охлаждения пальцев ПС и НКПС (рис. 6). Тракт охлаждения панели ПС включает в себя систему параллельных каналов, каждый из которых представляет собой тракт охлаждения пары пальцев ПС, соединённых последовательно гидравлически (см. рис. 6, *б*), входную и выходную петлю.

Тракт охлаждения пальца ПС состоит из тракта охлаждения несущей (стальной) части пальца и тракта охлаждения теплоотводящей (бронзовой) части пальца (канал, выполненный по технологии Hypervapotron (HVP)). Входная петля НКПС обеспечивает подвод теплоносителя в тракты охлаждения пальцев ПС, расположенных в левой и правой частях панели ПС.





Рис. 6. Схема тракта охлаждения НКПС № 14 и пары пальцев ПС: *а* — схема течения теплоносителя в тракте НКПС (О — вход теплоносителя в тракт панели ПС, О — выход теплоносителя из тракта панели ПС, • — вход теплоносителя в палец ПС, • — выход теплоносителя из пальца ПС); *б* — схема течения теплоносителя в тракте пальца ПС

Выходная петля обеспечивает подвод теплоносителя в стакан НКПС (для размещения центрального болта) и зону расположения контактных накладок (КН) узла крепления (УК) НКПС к ЗБ и отвод теплоносителя из трактов охлаждения пальцев ПС, расположенных в левой и правой частях панели ПС.

## РАСЧЁТ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

Проведён тепловой расчёт нестационарного распределения температуры в НКПС и элементах конструкции узла крепления НКПС к ЗБ МБ для режима Inductive I, который характеризуется следующими параметрами:

— термоядерная мощность 500 MBт;

— длительность импульса 1800 с (длительность «горения» 400 с и длительность «паузы» 1400 с).

При проведении расчёта рассмотрена последовательность 14 импульсов: «горение» плазмы— «пауза» до достижения стабилизации изменения температуры во всех элементах конструкции в течение импульса.

Конечно-элементная модель (КЭМ) МБ и контактные интерфейсы между компонентами МБ представлены на рис. 7.



Рис. 7. КЭМ МБ и контактные интерфейсы

Нагрузки (объёмные энерговыделения), граничные условия и допущения, использованные при проведении расчётов, были приняты согласно [1], в частности, температура и давление на входе в тракт охлаждения ПС принимались равными 70 °С и 4 МПа соответственно, интенсивность конвективной теплоотдачи принята по результатам предварительного теплогидравлического расчёта.

Распределение температуры в компонентах МБ на момент времени 23 800 и 25 200 с представлено на рис. 8. Изменение температуры во времени в НКПС, ПКН и РКН в режиме Inductive I представлено на рис. 9. Стабилизация изменения температуры в НКПС, ПКН и РКН во время «горения» плазмы и «паузы» наступает уже после второго импульса.

Изменение температуры во времени в элементах узла крепления НКПС к ЗБ — болте, шайбе,



Рис. 8. Распределение температуры в компонентах МБ (Inductive I), °С

электроизоляционной вставке и стакане НКПС в режиме Inductive I представлено на рис. 10. Стабилизация изменения температуры во время «горения» плазмы и «паузы» наступает к 13-му импульсу. Максимальная температура достигается в головке болта и составляет 223 °C во время «горения» плазмы и 201 °C во время «паузы».



Рис. 9. Изменение максимальной температуры во времени  $T_{\text{beam}}$  в НКПС (\_\_\_\_\_),  $T_{\text{pp}}$  в ПКН (\_\_\_\_) и  $T_{\text{sp}}$  в РКН (\_\_\_\_\_) в режиме Inductive I, °C



Рис. 10. Изменение максимальной температуры во времени в элементах узла крепления НКПС к ЗБ в режиме Inductive I, °C:  $T_{\text{bolt}}$  в болте (——);  $T_{\text{washer}}$  в шайбе (——);  $T_{\text{cins}}$  во втулке (——);  $T_{\text{cup}}$  в стакане (——)

Максимальная температура в ПКН во время «горения» плазмы и «паузы» достигается на поверхности, контактирующей с фиксирующей гайкой, и составляет 316 и 91 °C соответственно. Максимальная температура в РКН во время «горения» плазмы и «паузы» составляет 353 и 89 °C соответственно.

Распределение температуры в НКПС во время «горения» плазмы (на момент времени 23 800 с) и «паузы» (на момент времени 25 200 с) на 14-м импульсе представлено на рис. 11. Максимальная темпе-



Рис. 11. Распределение температуры в НКПС («горение» плазмы, момент времени 23 800 с, и «пауза», момент времени 25 200 с) на 14-м импульсе, ℃

ратура в НКПС во время «горения» плазмы и «паузы» достигается в угловой части в зоне размещения КН и составляет 389 и 98 °C соответственно. Целесообразно модифицировать размещение каналов тракта охлаждения НКПС в зоне размещения накладок с целью интенсификации охлаждения последних.

## РАСЧЁТ НДС

Проведён расчёт НДС конструкции в упругой постановке для следующих четырёх сценариев нагружения, рассмотренных в следующей последовательности:

1) сила предварительного затяга болта 140 кН при температуре 20 °С;

2) сила предварительного затяга болта 140 кH + равномерное распределение температуры 75 °C + давление теплоносителя 4 МПа;

3) сила предварительного затяга болта 140 кH + давление теплоносителя 4 МПа + распределение температуры на момент времени 23 800 с;

4) сила предварительного затяга болта 140 кH + давление теплоносителя 4 МПа + распределение температуры на момент времени 25 200 с.

Для каждого рассмотренного сценария определены усилия в болте и реакции в ПКН и гайках, фиксирующих ПКН в гнёздах НКПС.

Определение усилия в болте выполнено тремя способами:

- суммированием элементарных сил, возникающих в резьбе болта;

— интегрированием нормального напряжения в сечении болта;

— интегрированием контактного давления под головкой болта.

Для предварительной оценки усталостной прочности сварного шва стакана НКПС перед определением числа циклов нагружения проверено выполнение требований критерия «Прогрессирующее формоизменение» (ratcheting) [2] по «3Sm rule», формулируемому следующим образом:

$$\max\left(\overline{P_L} + P_B\right) + \overline{\Delta(P+Q)}_{\max} < 3S_m(T, \ \varphi t), \qquad (1)$$

где  $\max\left(\overline{P_L + P_B}\right)$  — максимальное значение суммы «первичных» (primary) мембранных и изгибных напряжений, МПа;  $\overline{\Delta(P+Q)}_{max}$  — максимальное значение размаха суммы «первичных» (primary) и «вто-

ричных» (secondary) напряжений, МПа.

Поэтому перед проведением оценки прочности по критерию выполнена линеаризация эквивалентного напряжения с целью определения мембранной и изгибной составляющих напряжения.

По результатам расчёта НДС с использованием полномасштабной КЭМ МБ были выявлены критические элементы конструкции — проходка для затяга болта (ПЗБ), проходка для приварки труб (ППТ) и проходка для перегрузочного манипулятора (ППМ), оценка усталостной прочности для которых выполнена методом субмоделирования (submodeling).

Метод субмоделирования заключается в проведении анализа НДС небольшой зоны, включающей в себя критическую точку, с использованием более подробной КЭМ этой зоны и с заданием в качестве граничных условий перемещений, являющихся результатом интерполяции распределения перемещений, полученного при проведении расчёта НДС на полномасштабной модели всей конструкции, и основан на принципе Сен-Венана.

Расчёт НДС проводился с использованием двух КЭМ, различающихся характерным размером конечного элемента (далее — сетка 1 и сетка 2), с целью подтверждения корректности выявления критических элементов конструкции (выявлены при проведении расчёта НДС на полномасштабной модели), а также для исследования влияния параметров сетки КЭМ на точность результатов расчёта напряжений и деформаций.

КЭМ включает НКПС со стаканом для размещения болта, восемь КН (четыре ПКН и четыре РКН), болт, сферическую шайбу, электроизоляционную вставку, резьбовую втулку в 3Б, 3Б, патрубки отвода/подвода теплоносителя панели ПС, гибкие опоры крепления 3Б на вакуумной камере (ВК) (представлены в виде балок), гнезда в 3Б для размещения противомоментных ключей и противомоментные ключи ВК (представлены в виде абсолютно жёстких контактных пар). Результаты проведённого в упругой постановке анализа НДС узла крепления НКПС к ЗБ представлены далее для сценария 3 («горение» плазмы), как наиболее напряжённого.

Максимальное эквивалентное напряжение в ППТ1, ПЗБ и ППТ2 составляет 623, 554 и 490 МПа соответственно (рис. 12). Данные значения максимального эквивалентного напряжения — ориентировочные и требуют подтверждения и уточнения путём проведения расчёта НДС методом субмоделирования (submodeling).



Рис. 12. Распределение эквивалентного напряжения в НКПС («горение» плазмы) в ППТ1, ПЗБ и ППТ2, МПа

Максимальное эквивалентное напряжение в НКПС 789 МПа достигается на пересечении каналов охлаждения (является сингулярностью и требует отдельного рассмотрения) (рис. 13).



Рис. 13. Распределение эквивалентного напряжения в НКПС («горение» плазмы), МПа

Распределение эквивалентного напряжения в зоне размещения центрального болта представлено на рис. 14. Максимальное эквивалентное напряжение достигается на смачиваемой поверхности канала охлаждения стакана и составляет 245 МПа.



Рис. 14. Распределение эквивалентного напряжения в зоне размещения болта («горение» плазмы), МПа

Наблюдается азимутальная неравномерность распределения напряжения в шайбе, возникающая также и в болте, которая обусловлена его изгибом. Также следует отметить, что значение эквивалентного напряжения на поверхности вставки с ЭИП не превышает значения предела текучести для материала вставки (алюминиевая бронза), составляющего 270 МПа при температуре 220 °C.

Распределение зон контакта, контактного давления, напряжения трения и пути трения на интерфейсе «вставка/стакан НКПС» представлено на рис. 15.



Рис. 15. Распределение зон контакта (*a*), контактного давления (*б*), напряжения трения (*в*) и пути трения (*г*) на интерфейсе «вставка/стакан НКПС» («горение» плазмы)

Контакт без скольжения (sticking) наблюдается практически на всей контактной поверхности интерфейса «вставка/стакан НКПС» (за исключением двух зон на боковой поверхности вставки, где присутствует скольжение (sliding)), что является важным фактором с точки зрения предотвращения износа ЭИП, нанесённого на вставку, запрессованную в стакан НКПС. Максимальное контактное давление, максимальное напряжение трения и максимальный путь трения на интерфейсе «вставка/стакан НКПС» составляют 326 МПа, 62 МПа и 0,012 мм соответственно.

Распределение эквивалентного напряжения в сварном шве стакана НКПС представлено на рис. 16. Максимальное эквивалентное напряжение составляет 64 МПа. Для определения мембранной и изгибной составляющих напряжения была выполнена линеаризация напряжения по толщине стенки стакана *w* НКПС. Значение линейной составляющей интенсивности суммы «первичного» и «вторичного» напряжения (62 МПа) меньше, чем  $3S_m$  ( $S_m = 130$  МПа при 200 °С), т.е. требования критерия «Прогрессирующее формоизменение» (ratcheting, IC 3311 [2]) выполняются.



Рис. 16. Распределение эквивалентного напряжения SEQV в сварном шве стакана НКПС («горение» плазмы), МПа: мембранное напряжение (——); сумма мембранного и изгибного напряжения (——); полное напряжение (——)

Распределение зон контакта, контактного давления, напряжения трения и пути трения на интерфейсе «ПКН/НКПС» представлено на рис. 17. Гайка, фиксирующая ПКН в гнезде НКПС, обеспечивает ме-



Рис. 17. Распределение зон контакта (*a*), контактного давления (*б*), напряжения трения (*в*) (МПа) и пути трения (*г*) (мм) на интерфейсе «ПКН/НКПС» («горение» плазмы)

ханический контакт ПКН/НКПС по большей части тыльной поверхности ПКН, но при этом наблюдается преимущественно скольжение (sliding). Это обстоятельство свидетельствует о целесообразности проведения дополнительного исследования влияния зазора между боковой поверхностью КН и НКПС на характер контакта, контактное давление и т.д., направленного на обеспечение механического контакта без скольжения (sticking) на поверхностях КН, снабжённых ЭИП, во избежание его износа. Максимальное контактное давление в ПКН достигается на кромке боковой поверхности, контактирующей с гнездом НКПС. Максимальное контактное давление, напряжение трения и путь трения составляют 449 МПа, 269 МПа и 0,057 мм соответственно.

Результаты расчёта сил, возникающих в болте и ПКН НКПС, представлены в табл. 1. Значения сил, полученные различными методами, хорошо согласуются.

Усилие в болте повышается на 4% по отношению к силе предварительного затяга во время «горения» плазмы и на 36% во время «паузы» (см. табл. 1).

Таким образом, в цикле нагружения «горение» плазмы/«пауза» обеспечивается усилие в болте на уровне не ниже усилия предварительного затяга болтового соединения узла крепления НКПС к ЗБ.

Расчёт НДС в упругой	Сила контактного давления под го-	Сила реакции в ПКН	Сила в резьбе втулки
постановке	ловкой болта	НКПС	в ЗБ
Сценарий 1	140 170	ПКН1: 35 938	140 170
		ПКН2: 33 568	
		ПКН3: 33 620	
		ПКН4: 35 989	
		Σ 139 114	
Сценарий 2	137 512	ПКН1: 35 287	137 512
		ПКН2: 32 964	
		ПКН3: 33 056	
		ПКН4: 35 382	
		Σ 136 689	
Сценарий 3	146 131	ПКН1: 40 342	146 058
		ПКН2: 36 319	
		ПКН3: 32 972	
		ПКН4: 36 621	
		Σ 146 254	
Сценарий 4	191 624	ПКН1: 48 313	191 632
		ПКН2: 46 630	
		ПКН3: 46 002	
		ПКН4: 50 085	
		Σ 191 029	

Таблица 1. Осевое усилие в болте и сила реакции в КН, Н

Необходимо провести расчёт НДС в упругопластической постановке для исследования возможности возникновения объёмного пластического течения материала в центральной части НКПС в зоне размещения ПЗБ, которое может привести к значительному снижению усилия в болте во время «горения» плазмы по отношению к силе предварительного затяга.

## РАСЧЁТ НДС МЕТОДОМ СУБМОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчёт НДС НКПС был проведён методом субмоделирования (submodeling) с использованием конечно-элементных моделей (КЭМ) для зон, содержащих критические элементы конструкции. В качестве граничных условий использовались перемещение и температура, полученные с использованием полномасштабной модели МБ. Оценки усталостной прочности НКПС проводились в соответствии с работой [2].

В процессе анализа НДС методом субмоделирования были рассмотрены четыре зоны НКПС (рис. 18):

— угловая часть НКПС, включающая в себя одну пару КН: полоидальную (ПКН) и радиальную (РКН) (рис. 19);

— фрагмент центральной части НКПС, содержащий ПЗБ;

— фрагмент центральной части НКПС, содержащий ППТ и ППМ;

— фрагмент центральной части НКПС, содержащий ППТ, ППМ, а также фронтальную крышку тракта охлаждения НКПС, расположенную между ними.



Рис. 18. Зоны НКПС МБ № 14 для субмоделирования

Результаты расчётов нестационарных полей температуры показали, что максимальная температура в зоне расположения КН может достигать 390 °C, т.е. возможен перегрев КН. Для повышения эффективности охлаждения в зонах расположения КН компоновка каналов теплоносителя была изменена, а именно добавлены камеры в угловых зонах тракта охлаждения НКПС. Вариант НКПС с изменённой системой охлаждения представлен на рис. 20.

Для подтверждения эффективности новой компоновки системы охлаждения расчёт нестационарных полей температуры был повторён для фрагмента НКПС, включающего одну из наклонных поверхностей двутавра с РКН и ПКН и системой их фиксации.

По результатам анализа НДС был разработан модифицированный вариант КН, представленный на рис. 21. Модифицированный вариант КН, характеризующийся наличием конических боковых контактных поверхностей, представляется более технологичным и обеспечивающим контакт по тыльной конповерхности тактной без скольжения (sticking) с требуемым контактным давлением при возникающих напряжениях в КН в пределах допускаемых. Обеспечение механического контакта без скольжения способствует предотвращению износа ЭИП трением, а



Рис. 19. Фрагмент НКПС (базовый вариант конструкции КН)



Рис. 20. НКПС с изменённой системой охлаждения в зонах расположения КН



Рис. 21. Фрагмент НКПС (модифицированный вариант конструкции КН)

обеспечение требуемого контактного давления, а следовательно, и термической проводимости контакта способствует повышению эффективности охлаждения КН.

По результатам расчёта НДС выполнен сравнительный анализ термомеханического поведения базового и модифицированного вариантов КН по параметрам контактных интерфейсов «КН/НКПС» и характеру распределения напряжения.

Расчётный анализ НДС и оценка усталостной прочности. КЭМ зоны 1 угловой части НКПС представлена на рис. 22, КЭМы фрагментов центральной части НКПС будут представлены далее на рис. 30— 32. С целью анализа влияния характерного размера конечного элемента на точность расчёта НДС (уровень максимального эквивалентного напряжения) для каждого из трёх фрагментов центральной части НКПС были построены две конечно-элементные сетки. Характерный размер элемента в сетке 2 меньше, чем в сетке 1, что обеспечивает более высокую точность расчёта НДС, причём сетка выполнена со сгущением к цилиндрической поверхности отверстия критического элемента (ПЗБ, ППТ, ППМ).



Рис. 22. КЭМ зоны 1 в угловой части НКПС с базовым вариантом конструкции КН

Механический контакт боковых поверхностей КН с НКПС моделировался в трёх вариантах: с учётом посадочного зазора 0,1 мм, зазора 0 мм и натяга 0,02 мм (20 мкм).

*Субмоделирование угловой части НКПС. Базовый вариант конструкции КН.* Зона 1, выполненная в соответствии с базовым вариантом конструкции КН, представлена на рис. 22.

На поверхностях А—D были заданы граничные условия по температуре и перемещению, полученные в результате интерполяции результатов расчёта, полученных на полной модели.

Изменение температуры во времени в НКПС, ПКН и РКН в режиме Inductive I представлено на рис. 23. Стабилизация изменения температуры в НКПС, ПКН и РКН во время «горения» плазмы и «паузы» наступает уже на 2-м импульсе.



Рис. 23. Изменение максимальной температуры во времени  $T_{\text{beam}}$  в НКПС (\_\_\_\_),  $T_{\text{pp}}$  в ПКН (\_\_\_\_) и  $T_{\text{sp}}$  в РКН (\_\_\_\_) в режиме Inductive I, °C

Распределение температуры в НКПС во время «горения» плазмы (на момент времени 11 200 с) и «паузы» (на момент времени 12 600 с) на 7-м импульсе также представлено на рис. 23. Максимальная температура в НКПС во время «горения» плазмы достигается на кромке в зоне гнезда для размещения РКН и составляет 338 °C. Размещение дополнительной камеры тракта охлаждения НКПС позволило снизить максимальную температуру НКПС с 389 до 338 °C.

Распределение эквивалентного напряжения в ПКН и зон контакта на интерфейсе «ПКН/НКПС» во время «горения» плазмы представлено на рис. 24. Для варианта 1 (зазор 0,1 мм по боковой поверхности КН) наблюдается скользящий контакт (sliding) только по тыльной поверхности, в то время как на интерфейсе «гайка/ПКН» наблюдается небольшая зона, где присутствует механический контакт, т.е. накладка может перемещаться в фазе «горение», что приведёт к повышенному износу ЭИП. С этой точки зрения результаты для вариантов 2, 3 наиболее приемлемы, так как в фазе «горение» плазмы наблюдаются контакт без скольжения по боковой поверхности и преимущественно скольжение (sliding) по тыльной поверхности ПКН. Однако отсутствие бокового зазора ограничивает перемещение ПКН при температурном расширении, а следовательно, и износ ЭИП, что более предпочтительно.



Рис. 24. Распределение эквивалентного напряжения в ПКН и зон контакта на интерфейсе «ПКН/НКПС» («горение» плазмы)

Максимальные значения контактного давления, пути трения и напряжения трения на интерфейсе «ПКН/НКПС» также представлены на рис. 24. Отсутствие бокового зазора между ПКН и НКПС или натяг приводят к существенному увеличению значения контактного давления на боковой поверхности. Максимальный путь трения для вариантов 2, 3 почти в 2,5 раза меньше, а напряжения трения меньше на 10%, т.е. по результатам для фазы «горение» плазмы наиболее предпочтительными являются варианты 2, 3 с точки зрения износа ЭИП.

Распределение эквивалентного напряжения в РКН и зон контакта на интерфейсе «РКН/НКПС» во время «горения» плазмы представлено на рис. 25. Из-за неравномерного температурного расширения НКПС для варианта с зазором 0,1 мм по боковой поверхности РКН скользящий контакт наблюдается лишь на небольшом участке тыльной и верхней (интерфейс с гайкой крепления) поверхностей РКН, что приводит к перемещению накладки в гнезде НКПС, в то время как для вариантов с нулевым зазором или натягом по боковой поверхности РКН наблюдаются контакт без скольжения по боковой и верхней поверхностям и неравномерный контакт по тыльной поверхности. Однако отсутствие зазора по боковой поверхности РКН приводит к увеличению напряжения в теле КН и гнезде НКПС (аустенитная сталь).



Рис. 25. Распределение эквивалентного напряжения в РКН и зон контакта на интерфейсе «РКН/НКПС» («горение» плазмы)

Для варианта с натягом 20 мкм по боковой поверхности РКН наблюдаются высокий уровень напряжения вдоль поверхностей с ЭИП, в некоторых зонах — близкий к пределу текучести алюминиевой бронзы 238 МПа и превышающий предел текучести аустенитной стали 128 МПа при температуре 300 °C, т.е. отсутствие бокового зазора позволяет иметь гарантируемый контакт на интерфейсе «РКН/НКПС», но при этом появляются зоны с высоким уровнем напряжения вблизи поверхностей, покрытых ЭИП.

Максимальные значения контактного давления, пути трения и напряжения трения на интерфейсе «РКН/НКПС» также приведены на рис. 25. Качественно результаты, полученные на интерфейсе «РКН/НКПС», сходны с результатами для ПКН. Значение пути трения для варианта с зазором в 3 раза превышает то же значение для варианта с натягом 20 мкм, но при этом напряжение трения для варианта с натягом 20 мкм на 30% больше, чем для варианта с зазором.

Обобщая результаты, полученные для ПКН и РКН, можно сделать следующие выводы:

— для обеспечения гарантированного контакта между КН и НКПС необходимо, помимо фиксации гайкой, исключить зазор по боковой поверхности КН;

— конструкция КН должна быть доработана так, чтобы исключить напряжение, превышающее предел текучести алюминиевой бронзы с поверхностей, покрытых ЭИП, и обеспечить гарантированный контакт между КН и НКПС; — действие внешней силы на ПКН приводит к образованию локальной пластической деформации, сосредоточенной в зоне контакта ПКН/НКПС;

— выполненное изменение тракта охлаждения позволило снизить максимальную температуру НКПС с 389 до 338 °C.

*Субмоделирование угловой части НКПС. Модифицированный вариант конструкции КН.* КЭМ зоны 1, содержащей одну пару КН (ПКН и РКН в модифицированном варианте), представлена на рис. 26.



Рис. 26. КЭМ зоны 1 (модифицированный вариант КН) и интерфейсов «КН/ЗБ» и «КН/НКПС»

Изменение температуры во времени в НКПС, ПКН и РКН в режиме Inductive I представлено на рис. 27. Стабилизация изменения температуры в НКПС, ПКН и РКН во время «горения» плазмы и «паузы» наступает уже на 3-м импульсе.



Рис. 27. Изменение максимальной температуры во времени  $T_{\text{beam}}$  в НКПС (\_\_\_\_),  $T_{\text{pp}}$  в ПКН (\_\_\_\_) и  $T_{\text{sp}}$  в РКН (\_\_\_\_) в режиме Inductive I, °C

Распределение температуры в НКПС, ПКН и РКН во время «горения» плазмы (на момент времени 11 200 с) и «паузы» (на момент времени 12 600 с) на 7-м импульсе также представлено на рис. 27. Максимальная температура НКПС во время «горения» плазмы в зоне гнезда для размещения РКН составляет 338 °C.

Распределение эквивалентного напряжения в ПКН и зон контакта на интерфейсе «ПКН/НКПС», возникающих при предварительном затяге болтового соединения УК НКПС к ЗБ, во время «горения» плазмы и «паузы» представлено на рис. 28. Под действием предварительного затяга болтового соединения УК НКПС к ЗБ на большей части боковой конической и по всей тыльной поверхности интерфейса «ПКН/НКПС» наблюдается контакт без скольжения (sticking), однако в фазах «горение» плазмы и «пауза» происходит перераспределение зон контакта на интерфейсе «ПКН/НКПС», вызванное комбинацией силы предварительного затяга болта и расширением НКПС под действием неравномерного поля температуры.



Рис. 28. Распределение эквивалентного напряжения в ПКН и зон контакта на интерфейсе «ПКН/НКПС»

Контакт без скольжения наблюдается по всей боковой конической поверхности ПКН, в то время как преимущественно скользящий контакт наблюдается по тыльной поверхности. Напряжение на поверхностях с ЭИП не превышает 130 МПа, но сохранилась зона с напряжением, превышающим предел текучести алюминиевой бронзы 232 МПа (при температуре 315 °C), локализованная в месте контакта ПКН/НКПС. Максимальные значения контактного давления, пути трения и напряжения трения на интерфейсе «ПКН/НКПС» показаны на рис. 28. Сравнивая результаты расчёта модифицированной конструкции ПКН с базовым вариантом, следует отметить, что по полученным характеристикам контактного интерфейса новая конструкция ПКН имеет ряд видимых преимуществ, которые позволят снизить износ и увеличить ресурс ЭИП. Распределение эквивалентного напряжения в РКН и зон контакта на интерфейсе «РКН/НКПС», возникающих при предварительном затяге болтового соединения УК НКПС к ЗБ, во время «горения» плазмы и «паузы» представлено на рис. 29. Максимальные значения контактного давления, пути трения и напряжение трения на интерфейсе «РКН/НКПС» также показано на рис. 29.



Рис. 29. Распределение эквивалентного напряжения в РКН и зон контакта на интерфейсе «РКН/НКПС»

На конической поверхности РКН, в фазах «горение» плазмы и «пауза» наблюдается преимущественно контакт без скольжения, в то время как на тыльной поверхности — преимущественно скольжение. Максимальное значение контактного давления несколько увеличилось (до 380 МПа) по сравнению с ПКН в фазе «горение» плазмы.

*Субмоделирование центральной части НКПС.* КЭМ зон 2, 3 и 4 в центральной части НКПС представлены на рис. 30—32.



Рис. 30. КЭМ зоны 2 размещения ПЗБ в центральной части НКПС

ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 1



Рис. 31. КЭМ зоны 3 размещения ППТ1 и ППМ1 в центральной части НКПС



Рис. 32. КЭМ зоны 4 размещения ППТ2 и ППМ2 в центральной части НКПС

б  $σ_{max} = 735$  MΠa а  $σ_{max} = 732$  MΠa ПЗБ ПЗБ 8,01155 168,93 329.849 490,767 651,686 168,304 6 52225 330,086 491,867 653,649 732.145 410,308 88,4708 249,389 571,226 734,54 87,4131 249,195 410,976 572,758

Максимальное эквивалентное напряжение, возникающее во время «горения» плазмы в зоне 2 и полученное на сетках 1 и 2, составляет 732 и 735 МПа соответственно (рис. 33, a,  $\delta$ ).



Максимальное эквивалентное напряжение, возникающее во время «горения» плазмы в зоне 3 и полученное на сетке 1, в ППТ1 и ППМ1 составляет 681,9 и 481,3 МПа соответственно (рис. 34, *a*).



Рис. 34. Распределение эквивалентного напряжения в НКПС («горение» плазмы) в зоне 3, МПа: *a* — сетка 1; *б* — сетка 2

Максимальное эквивалентное напряжение, возникающее во время «горения» плазмы в зоне 3 и полученное на сетке 2, в ППТ1 и ППМ1 составляет 682,1 и 516,4 МПа соответственно (рис. 34, б). Максимальное эквивалентное напряжение, возникающее во время «горения» плазмы в зоне 4 и полученное на сетке 1, в ППТ2, ППМ2 и крышке составляет 845, 645 и 291 МПа соответственно (рис. 35, *a*).



Рис. 35. Распределение эквивалентного напряжения в НКПС («горение» плазмы) в зоне 4, МПа: а — сетка 1; б — сетка 2

Максимальное эквивалентное напряжение, возникающее во время «горения» плазмы в зоне 4 и полученное на сетке 2, в ППТ2, ППМ2 и крышке составляет 849, 652 и 286 МПа соответственно (рис. 35, б).

Из приведённых результатов видно, что максимальное эквивалентное напряжение изменяется в большинстве случаев незначительно при уточнении решения по НДС (переходе с сетки 1 на сетку 2), что, в частности, подтверждает корректность выявления критических элементов конструкции и при проведении расчёта НДС на полномасштабной КЭМ МБ.

Результаты расчёта НДС и оценок усталостной прочности НКПС методом субмоделирования кратко представлены в табл. 2.

		-		-	
Критическая точка	σ <sub>burn</sub> , MΠa	σ <sub>pause</sub> , MΠa	$N_{ m req}$	Δε, %	[ <i>N</i> ]
	·	Зона 2			•
ПЗБ (сетка 1)	732,0	163,9	15 000	0,427	4976
ПЗБ (сетка 2)	734,5	164,2	15 000	0,429	4831
		Зона З			
ППТ 1 (сетка 1)	681,9	110,3	15 000	0,422	5832
ППТ 1 (сетка 2)	682,1	110,3	15 000	0,423	5792
ППМ 1 (сетка 1)	481,3	20,2	15 000	<u>0,302</u>	<u>30 181</u>
ППМ 1 (сетка 2)	516,5	20,3	15 000	<u>0,334</u>	<u>17 721</u>
		Зона 4			
ППТ 2 (сетка 1)	845,2	142,4	15 000	0,577	1418
ППТ 2 (сетка 2)	848,8	142,4	15 000	0,581	1376
ППМ 2 (сетка 1)	644,5	15,5	15 000	0,484	3299
ППМ 2 (сетка 2)	649,3	15,8	15 000	0,490	3179
Крышка (сетка 1)	290,6	23,7	15 000	<u>0,150</u>	$> 10^{6}$
Крышка (сетка 2)	286,2	23,7	15 000	<u>0,147</u>	$> 10^{6}$
		a warnewarna a haaa			

Таблица 2. Результаты расчёта НДС	и оценок усталостной прочности методом су	бмоделирования для зон 2, 3, 4 НКПС
• •		· · ·

Примечание:  $\sigma_{\text{burn}}$  — максимальное эквивалентное напряжение в фазе «горение» плазмы;  $\sigma_{\text{pause}}$  — максимальное эквивалентное напряжение в фазе «пауза»;  $N_{\text{req}}$  — требуемое количество циклов нагружения; [N] — обеспечиваемое количество циклов нагружения;  $\Delta \varepsilon$  — максимальный эквивалентный размах полной деформации.

Требования критерия усталостной прочности «Прогрессирующее формоизменение» (ratcheting) выполняются для всех рассмотренных элементов: ПЗБ, ППТ1, ППМ1, ППТ2, ППМ2 и крышки тракта охлаждения НКПС. При этом требования усталостной прочности по числу циклов выполняются только для ППМ1 (зона 3) и крышки тракта охлаждения НКПС (зона 4).

Конструкция НКПС, модифицированная по результатам расчётов НДС и оценок усталостной прочности методом субмоделирования. Опираясь на результаты приведённого расчётного обоснования, в конструкции НКПС была пересмотрена компоновка каналов охлаждения в центральной части НКПС (рис. 36).

Далее был повторён весь цикл расчётного обоснования:

расчёт нестационарных полей температуры;

— расчёт НДС НКПС с модифицированными каналами охлаждения;

— расчёт НДС методом субмоделирования для критических точек в центральной зоне НКПС.

*Нестационарный анализ распределения температуры.* Проведён нестационарный тепловой анализ распределения температуры в НКПС и элементах

конструкции узла крепления НКПС к ЗБ МБ для режима Inductive I. При проведении расчёта рассмотрена последовательность 14 импульсов «горение» плазмы—«пауза» до достижения стабилизации изменения температуры во всех элементах конструкции в течение импульса.

Конечно-элементная модель (КЭМ) аналогична представленной на рис. 7. Нагрузки, граничные условия и допущения, использованные при проведении расчётов, были приняты согласно [1, 3—6].



Рис. 36. НКПС с изменённой системой охлаждения в центральной зоне

Изменение температуры во времени в НКПС, ПКН и РКН в режиме Inductive I представлено на рис. 37. Стабилизация изменения температуры в НКПС, ПКН и РКН во время «горения» плазмы и «паузы» наступает уже после 2-го импульса. Распределение температуры в НКПС также представлено на рис. 38.



Рис. 37. Изменение максимальной температуры во времени  $T_{\text{beam}}$  в НКПС (\_\_\_\_),  $T_{\text{pp}}$  в ПКН (\_\_\_\_),  $T_{\text{sp}}$  в РКН (\_\_\_\_) в МБ (Inductive I), °С (*a*) и  $T_{\text{cup}}$  в стакане НКПС (\_\_\_\_),  $T_{\text{washer}}$  в шайбе (\_\_\_\_),  $T_{\text{cins}}$  в электроизоляционной вставке (\_\_\_\_),  $T_{\text{bolt}}$  в болте УК (\_\_\_\_) (*б*)



Рис. 38. Распределение температуры в НКПС на момент времени 23 800 с (Inductive I), °С

*Анализ НДС модифицированной НКПС.* КЭМ представлена на рис. 39. В качестве граничных условий взяты перемещения, полученные на полномасштабной модели МБ и поля температуры, описанные в



Рис. 39. КЭМ модифицированной НКПС

предыдущем разделе, сценарии нагружения — согласно приведённому ранее расчёту НДС.

На рис. 40 представлено распределение эквивалентного напряжения, возникающего в НКПС в фазе «горение» плазмы, полученное в упругой постановке. Максимальное эквивалентное напряжение равно 1072 МПа. Данное значение напряжения возникает в зоне, являющейся сингулярностью, и требует дальнейшего уточнения.



Рис. 40. Распределение эквивалентного напряжения в НКПС на момент времени 23 800 с («горение» плазмы) (*a*), в зоне 1 (*б*), зоне 2 (*в*), зоне 3 (*г*), МПа

Уровень эквивалентного напряжения в зонах 1—3 представляется приемлемым, однако для проведения оценок усталостной прочности необходимо выполнить субмоделирование.

Субмоделирование для зон 1—3 центральной части НКПС. Расчётный анализ НДС НКПС был проведён методом субмоделирования (submodeling) с использованием конечно-элементных моделей (КЭМ) для зон, содержащих критические элементы конструкции. В качестве граничных условий использовали перемещение и температуру, полученные на полномасштабной модели НКПС. Оценки усталостной прочности НКПС проводили в соответствии с [2].

Для каждой зоны был выполнен расчёт НДС сначала в упругой постановке для четырёх сценариев нагружения, описанных в разделе 3, и затем в упругопластической постановке. Для изучения приспособляемости конструкции к данному типу нагружения рассматривали последовательность из нескольких циклов «горение»/«пауза»: сценарии 3 и 4 были повторены 7 раз для зоны 1 и 10 раз для зон 2 и 3. КЭМ для зон 1—3 аналогичны представленным на рис. 30—32 соответственно.

Результаты субмоделирования для зоны 1 представлены в табл. 3.

	r u o n'n d u o. r esymbratik eyomodenn pobulinn din sonik r											
057.017	Анализ НДС в упругой постановке					Анализ НДС в упругопластической постановке						
Объект	<i>T</i> , °C	$\sigma_{burn}$ , МПа	$\sigma_{\text{pause}},$ МПа	N <sub>req</sub>	Δε, %	[N]	<i>Т</i> , °С	$\epsilon_{\text{TOTburn}},\%$	$\epsilon_{\text{TOTpause}},\%$	N <sub>req</sub>	Δε, %	[N]
ПЗБ, сетка 1	289,4	500,0	161,0	15 000	0,210	513 899	289,4	0,445	0,333	15 000	0,218	298 391
ПЗБ, сетка 2	289,7	501,9	162,1	15 000	0,211	477 008	289,7	0,450	0,336	15 000	0,220	251 332
Примечание: $T$ — температура; $\sigma_{\text{burn}}$ — максимальное эквивалентное напряжение в фазе «горение» плазмы; $\sigma_{\text{pause}}$ — макси										— макси-		
мальное эквивалентное напряжение в фазе «пауза»; є <sub>ТОТbum</sub> — максимальная эквивалентная полная деформация в фазе «горе								изе «горе-				
ние» плазмы	ие» плазмы; є <sub>тотраизе</sub> — максимальная эквивалентная полная деформация в фазе «пауза».											

Таблица 3	. Результаты	субмоделирования	для зоны 1
-----------	--------------	------------------	------------

Требование усталостной прочности по числу циклов выполнено для ПЗБ, расположенного в зоне 1 НКПС (см. табл. 3).

Результаты субмоделирования для зоны 2 представлены в табл. 4.

	Таблица4. Результаты субмоделирования для зоны 2											
05		Анализ	НДС в упр	угой пос	гановке	;	Анализ НДС в упругопластической постановке					
Ооъект	Т, ⁰С	$\sigma_{\text{burn}},$ МПа	$\sigma_{\text{pause}}$ ,МПа	$N_{\rm req}$	Δε, %	[N]	<i>T</i> , °C	$\epsilon_{TOTburn}$ , %	$\epsilon_{\text{TOTpause}},\%$	N <sub>req</sub>	Δε, %	[N]
ППМ1, сетка 1	154,5	395,0	27,3	15 000	0,223	52 2436	154,5	0,335	0,242	15 000	0,204	2 686 008
ППМ1, сетка 2	155,2	488,2	28,7	15 000	0,299	32 220	155,2	0,470	0,297	15 000	0,296	33 676
ППТ1, сетка 1	241,2	347,4	99,2	15 000	0,139	$> 10^{7}$	241,2	0,315	0,259	15 000	0,139	$> 10^{7}$
ППТ1, сетка 2	241,3	349,9	99,8	15 000	0,140	$> 10^{7}$	241,3	0,319	0,262	15 000	0,141	$> 10^{7}$

Требование усталостной прочности по числу циклов выполнено для ППМ1 и ППТ1, расположенных в зоне 2 НКПС (см. табл. 4).

Результаты субмоделирования для зоны 3 представлены в табл. 5.

r u os n i d u os r espinarum eyostodeninpobulinin din sonin e												
	Анализ НДС в упругой постановке						Анализ НДС в упругопластической постановке					
Ооъект	<i>Т</i> , °С	$\sigma_{\text{burn}},$ МПа	$\sigma_{\text{pause}},$ МПа	N <sub>req</sub>	Δε, %	[N]	<i>T</i> , °C	$\epsilon_{\text{TOTburn}},\%$	ε <sub>TOTpause</sub> , %	N <sub>req</sub>	Δε, %	[N]
ППМ2, сетка 1	198,2	407,5	11,2	15 000	0,249	97 023	198,2	0,420	0,301	15 000	0,233	195 637
ППМ2, сетка 2	199,1	452,1	11,2	15 000	0,288	35 472	199,1	0,489	0,319	15 000	0,291	33 597
ППТ2, сетка 1	282,5	504,3	133,0	15 000	0,237	114 817	282,5	0,464	0,332	15 000	0,245	88 473
ППТ2, сетка 2	282,8	506,8	134,0	15 000	0,238	106 495	282,8	0,473	0,337	15 000	0,250	78 989

Таблица 5. Результаты субмолелирования для зоны 3

Требование усталостной прочности по числу циклов выполнено для ППМ2 и ППТ2, расположенных в зоне 3 НКПС (см. табл. 5).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам представленной работы можно сделать следующие выводы.

Разработанная специалистами ОАО «НИКИЭТ им. Н.А. Доллежаля» и ФГУП «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова» конструкция панели ПС со сварным креплением пальцев на НКПС принята МО ИТЭР в качестве базовой для разработки и расчётного обоснования панелей ПС в рамках FDR-этапа.

Максимальная температура НКПС и узла крепления ПС к 3Б, возникающая во время «горения» плазмы, не превышает допускаемую, принятую равной 400 °С.

Конфигурация узла крепления ПС к 3Б обеспечивает поддержание усилия в болте во время «горения» плазмы и «паузы» на уровне не ниже предварительного затяга болтового соединения (140 кН). Усилие в болтовом соединении узла крепления НКПС к 3Б во время «горения» плазмы 146 кН, а во время «паузы» — 191 кН. Однако необходимо провести анализ НДС УК НКПС к ЗБ в упругопластической постановке для определения влияния пластической деформации в КН на осевую силу в болте УК.

Модифицированный вариант конструкции КН обеспечивает контакт без скольжения (sticking) по большей части конической поверхности контактного интерфейса «КН/НКПС», что является важным фактором с точки зрения предотвращения износа трением ЭИП, нанесённого на поверхности КН. Поэтому модифицированный вариант конструкции КН с коническими боковыми поверхностями будет предложен для использования в качестве базового при дальнейшей разработке конструкции УК НКПС к ЗБ.

Требования усталостной прочности по критерию прочности «Прогрессирующее формоизменение» (ratcheting) выполняются для всех рассмотренных критических элементов НКПС во время «горения» плазмы. Требования усталостной прочности по числу циклов также выполняются.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. IO ITER "Blanket System Analyses FDR Protocol". ITER D 33945Y, vol. 1.0, 2012.
- 2. IO ITER "ITER Structural Design Criteria for In-vessel components (SDC-IC)". G 74 MA 8 01-65-28 W0.2, ITER D 222RHC, 2004.
- 3. IO ITER "Materials design limit data". SDC-IC Appendix A, ITER D 4485TU, vol. 1.1, 2010.
- 4. IO ITER "Model and analysis of results for BM 14". ITER D 4GZ52T, vol. 1.0, 2012.
- 5. IO ITER "Nuclear Heating and Damage Data for BM14". ITER D 4FHC8N, vol. 1.0, 2012.
- 6. IO ITER "Materials Assessment Report". G 74 MA 10 00-11-10 W0.1, 2004.
- 7. Pad\_Report RFDA v1.0 (ITER D 4D6QXH vol. 1.0), 2011.



Александр Андреевич Герваш, начальник лаборатории, к. техн. н.; ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, п. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия gervash@sintez.niiefa.spb.su

Алексей Николаевич Лабусов, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; ФГУП «НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, п. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия labusov@sintez.niiefa.spb.su





Юрий Сергеевич Стребков, заместитель директора генерального конструктора; ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля», 107140, Москва, ул. М. Красносельская, д. 2/8, Россия styri@nikiet.ru







Игорь Викторович Данилов, начальник отдела; ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля», 107140, Москва, ул. М. Красносельская, д. 2/8, Россия danilov@nikiet.ru

Андрей Юрьевич Лешуков, заместитель начальника отдела; ОАО «Ордена Ленина Научноисследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля», 107140, Москва, ул. М. Красносельская, д. 2/8, Россия leshu@nikiet.ru

Максим Николаевич Свириденко, ведущий инженер; ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля», 107140, Москва, ул. М. Красносельская, д. 2/8, Россия sviridenko@nikiet.ru

Алексей Владимирович Размеров, начальник группы; ОАО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежаля», 107140, Москва, ул. М. Красносельская, д. 2/8, Россия razmerov@nikiet.ru

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2012 г. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 1, с. 17—43.

