



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-211-227>

Методика и оборудование для проведения испытаний образцов сталей в дистиллированной воде высокой температуры и давления

**Х.А. Абшенов  , Б.Р. Арапов  *, К.К. Сейтказенова  ,
В.Н. Печерский  , Б.Б. Жайлыбек **

Южно-Казахстанский университет им. М.Ауэзова Шымкент, Казахстан

E mail:hasen8585@mail.ru, b.arapov@rambler.ru, kseitkazi@mail.ru, vn-pecherskiy@mail.ru, . bakdaulet.zhailybek@mail.ru

Аннотация. В статье описывается конструкция разработанного и изготовленного испытательного стенда, который состоит из непосредственно испытательной камеры и вспомогательного оборудования, включающего насос высокого давления, ресивер, баллон со сжатым инертным газом и соединительные трубопроводы. Стенд обеспечивает проведение испытаний образцов сталей в дистиллированной воде высокой температуры и давления на статическое деформирование с различными скоростями растяжения, а также на циклическое малоцикловое симметричное нагружение. Отличительной особенностью стенда является возможность проведения испытаний образцов сталей с высокой точностью определения их статических механических характеристик и циклической прочности. В испытательной камере реализовано точное определение прикладываемого усилия к испытуемому образцу, находящемуся в воде высокой температуры, и измерение его деформаций косвенными методами с использованием предварительно построенных тарировочных графиков. С помощью данного стенда проведены испытания образцов стали 10ГН2МФА на статическое растяжение в воздухе и в дистиллированной воде при температуре 280 °С. Полученные результаты показали, что прочность стали практически не изменяется, тогда как ее пластические свойства снижаются, что необходимо учитывать при оценке надежности элементов энергетического оборудования.

Ключевые слова: разработка, испытательный стенд, испытание, коррозионная среда, прочность, пластичность, АЭС.

Received 09.10.2025. Revised 18.05.2026. Accepted 02.06.2026. Available online 30.03.20265.

* the correspondence author

Введение

Свойства материала, характеризующие его сопротивление коррозионному разрушению, трещиностойкость и длительную прочность, в такой коррозионной среде, как реакторная вода, достоверно могут быть определены только экспериментальным путем. При этом испытания образцов сталей должны быть проведены в условиях, идентичных соответствующим условиям эксплуатации элементов конструкций. Особенно это важно в случае, когда принятый расчетный эксплуатационный срок службы непрерывной работы оборудования составляет порядка 50 лет и выше. Такие эксплуатационные условия, как наличие воздействия высокой температуры и давления рабочей среды, характерны несущим элементам оборудования энергетических установок.

Основные элементы корпусов атомных реакторов, трубопроводов, парогенераторов, паропроводов, несущие элементы тепловых котлов испытывают воздействие окружающей среды, статических, циклических, термомеханических нагрузок, вследствие чего подвергаются коррозионно-механическому разрушению [1, 2, 3].

Одним из наиболее важных факторов, угрожающих безопасной эксплуатации атомных электростанций является коррозионное растрескивание под напряжением (SCC) в легководяных реакторах.

Коррозионное растрескивание под напряжением является причиной значительных сбоев в обслуживании, оно может возникать в области концевых деталей ТВЭЛов, в системах трубопроводов с теплоносителями, в местах сопряжения трубопроводов с корпусом реактора, в сварных соединениях, это очень сложный механизм разрушения, поэтому его прогнозирование является непростой задачей.

Для возникновения коррозии под напряжением должны присутствовать три обязательных фактора: растягивающее напряжение, окружающая среда и восприимчивый материал. Если внести изменения в любой из этих факторов, то восприимчивость к SCC часто может быть устранена или снижена. Растягивающее напряжение может быть вызвано остаточными напряжениями, эксплуатационными нагрузками, структурными и металлургическими факторами, такими как размер зерна, термическая обработка, холодная обработка и, наконец, факторами окружающей среды, которые зависят от химического состава воды и рабочей температуры [4].

Однако этот тип разрушения является внезапным, и его трудно предсказать, а также свойства материала могут изменяться со временем или в результате обработки. Поэтому правильный способ прогнозирования и моделирования SCC по-прежнему является важной областью исследований. К настоящему времени известны несколько типов механизмов коррозионного растрескивания под напряжением:

- Механизм растворения при разрыве пленки [5].
- Теория расширенной подвижности поверхности [6].
- Модель разрушения в сопряженной среде [7].
- Модель внутреннего окисления [8, 9].
- Механизм на основе водорода.

Механизм растворения/разрыва пленки. Данный механизм разработали Ford и Andersen. Они предложили механизм коррозионного растрескивания под напряжением и соответствующие модели скорости роста трещин. Модель была разработана в основном для нержавеющей сталей и предполагает, что основными этапами механизма SCC являются образование пленки, разрыв пленки, удаление материала и последующая повторная пассивация пленки. Все эти процессы зависят от скорости деформации вершины трещины,

плотности окисления заряда и коэффициентов интенсивности напряжений. Модель раскрывает механизм зарождения и распространения трещин в различных слоях материалов с помощью метода конечных элементов, основанного на механике разрушения.

Теория расширенной поверхностной подвижности. Механизм коррозионного растрескивания под напряжением с поверхностной подвижностью разработан недавно, и одним из его наиболее многообещающих свойств является то, что он позволяет прогнозировать скорости растрескивания при любой температуре, если известно значение при данной температуре. Основная особенность этого механизма заключается в том, что атомы перемещаются от вершины трещины с высоким напряжением к менее напряженным сторонам. Модель была разработана Galvele, он считал, что окислительные токи на вершине трещины не объясняют высокую скорость роста трещины. В основе этой модели лежит механизм охрупчивания, и он также может быть использован для характеристики водородного охрупчивания [6].

Модель разрушения в сопряженной среде. Модель была разработана Макдональдом и Уркиди-Макдональдом [7]. Она учитывает влияние концентрации кислорода, скорости потока и электропроводности внешней среды, а также влияние напряжений на рост трещин. Модель пытается связать две среды распространения трещин и предполагает следующее:

- с увеличением интенсивности напряжения потенциал на кончике трещины увеличивается, однако в устье трещины это не отражается;
- в случае концентрации кислорода ситуация обратная, влияние только на устье трещины;
- pH и температура не влияют на скорость роста трещины; они влияют на разность потенциалов между вершиной трещины и внешней окружающей средой.

Модель позволит провести количественный прогноз влияния концентрации водорода, предела текучести, коэффициента интенсивности напряжений и температуры на рост трещин [10].

Модель внутреннего окисления. Модель внутреннего окисления, разработанная П. М.Скоттом и М. Ле Кальваром, выражает собой гипотезу, что растрескивание вызвано явлением внутреннего окисления. Это показано на примере никелевых сплавов, широко используемых в ядерных реакторах с водой под давлением (PWR). Модель основана на механизме охрупчивания, вызванном образованием слоя адсорбированных атомов кислорода, который взаимодействует с выделениями на границах зерен материала и их дислокациями, что также зависит от коэффициента диффузии кислорода в материале. Этот механизм также может привести к образованию пузырьков газа под высоким давлением, которые усиливают развитие межкристаллитного коррозионного растрескивания под напряжением.

Механизм на основе водорода. В процессе эксплуатации реактора материалы могут поглощать водород из теплоносителя или в результате коррозии. Водород диффундирует в области с наименьшими температурами и наибольшими растягивающими напряжениями. Это может приводить к образованию локальных хрупких зон с повышенным содержанием водорода. При этом механизме происходит адсорбция водорода на металле в вершине трещины при нейтральном значении pH, что приводит к водородному охрупчиванию. Часть выделяющихся атомов водорода не соединяется в молекулы, а проникает в металл, вызывая наводороживание и водородную хрупкость, а также рост зёрен. Водород снижает пластичность и прочность материалов, что может

привести к их преждевременному разрушению.

Определение реальных прочностных характеристик сталей экспериментальным путем в условиях, идентичных эксплуатационным условиям работы оборудования энергетических установок, является сложной задачей. Это связано с необходимостью разработки и изготовления соответствующего испытательного оборудования и методики проведения длительных экспериментов. Определение точного значения прикладываемого усилия на образец, который находится в камере с коррозионной средой, а измерение его деформации происходит непрерывно в ходе проведения испытания, вызывает определенную сложность при проведении эксперимента в реакторной воде, имеющей температуру до 300 °C и давление до 15 МПа [11, 12].

Выполнение инженерных расчетов на прочность высоконагруженных элементов конструкций энергетических установок в таких условиях должно базироваться на следующих научно-обоснованных и достоверных данных [13, 14, 15]:

- характер эксплуатационной загруженности оборудования;
- достоверно определенное напряженно-деформированное состояние несущих элементов конструкций;
- нормированные расчетные модели.

Методология

В связи с вышеуказанными особенностями авторами разработан испытательный стенд, позволяющий экспериментально определять фактические характеристики прочности сталей, рисунок 1. В разработанном стенде точное значение прикладываемого усилия к образцу, испытываемому в камере внешнее воздействие, измеряется механическим тензометром с индуктивным датчиком перемещения. Измерительные ножки тензометра устанавливаются во внутренней полости силового штока так, чтобы база измерения перемещения находилась между испытываемым образцом и зоной сальниковых уплотнений силового штока и полностью располагалась во внутренней полости камеры.

Такое расположение базы измерения позволяет исключить неконтролируемые погрешности, возникающие за счет сил трения силового штока в сальниковых уплотнениях.

При этом измерение величины усилия, прикладываемого к испытываемому образцу, осуществляется по значению деформации утоненной части силового штока на базе измерения, заключающегося между дном отверстия и буртика внутри отверстия штока, расположенного на расстоянии 20 мм от дна отверстия. Измерительные ножки механического тензометра, одна из которых представляет собой подвижную штангу диаметром $d = 3$ мм и упирается на дно отверстия, и вторая - одновременно является корпусом тензометра, упирается на буртике внутри отверстия в штоке. Таким образом, образуется база измерения деформации длиной 20 мм.

При приложении усилия к силовому штоку за счет деформации материала штока на базе измерения происходит перемещение подвижной штанги относительно корпуса тензометра, на конце которого устанавливается корпус индуктивного датчика перемещения.

Перемещение подвижной штанги тензометра, второй конец которого жестко связан с ферромагнитным сердечником, находящимся во внутренней полости на уровне катушек индуктивного датчика, приводит к появлению в выходной цепи датчика электрического

напряжения, величина которого изменяется пропорционально величине перемещения ферромагнитного сердечника.

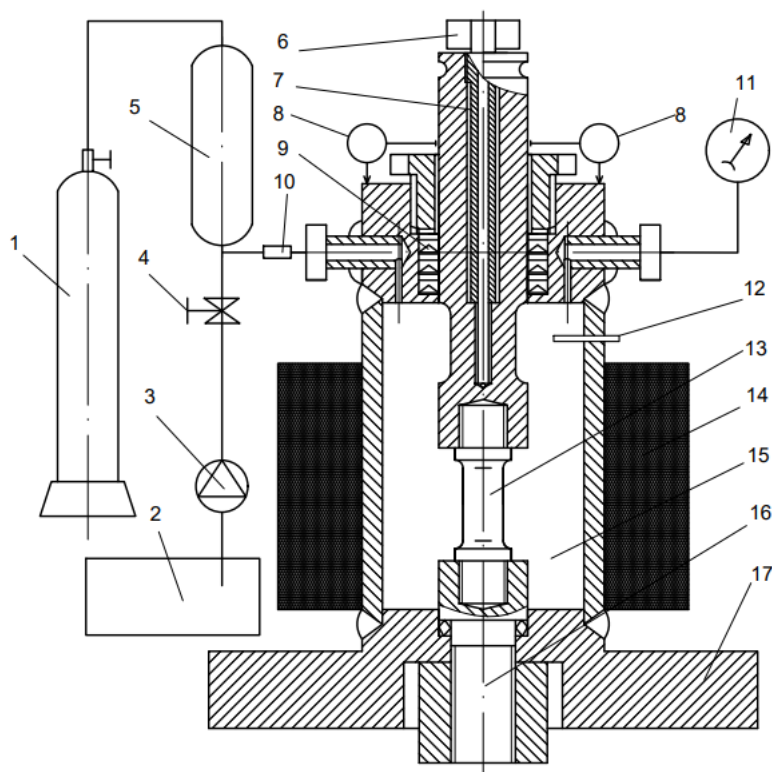


Рисунок 1. Стенд с камерой для проведения испытаний образцов сталей в дистиллированной воде высокой температуры и давления

1 – баллон со сжатым газом (аргон); 2 – емкость с дистиллированной водой; 3 – плунжерный насос высокого давления; 4 – вентиль; 5 – ресивер; 6 – индуктивный датчик перемещения; 7 – силоизмеритель; 8 – индикатор часового типа; 9 – сальниковое уплотнение силового штока; 10 – обратный клапан; 11 – манометр; 12 – датчик температуры; 13 – испытуемый образец; 14 – электрический нагреватель; 15 – полость камеры; 16 – неподвижный захват; 17 – основание камеры

Перевод величин электрических сигналов, исходящих из индуктивного датчика, измеряемых в милливольтках в значения сил, измеряемых в кН, производится с помощью тарировочного графика силы, показанного на рисунке 2. Данный график построен с использованием той же камеры в среде воздуха, при снятых уплотнительных сальниках и при температуре в камере, соответствующей проведению предстоящего испытания в дистиллированной воде.

При построении тарировочного графика силы значение приложенной нагрузки, создаваемой испытательной машиной на силовом штоке, задавалось пошагово и измерялось при помощи образцового динамометра ДОСМ-3, при этом одновременно

измерялось напряжение, выдаваемое индуктивным датчиком, соответствующее каждому значению приложенной силы с использованием милливольтметра КСП-4. В результате получен тарировочный график силы, показанный на рисунке 2. Как видно из графика, зависимость между приложенной к силовому штоку силой и показаниями индуктивного датчика в пределах измеренного диапазона усилия оказалась строго линейной.

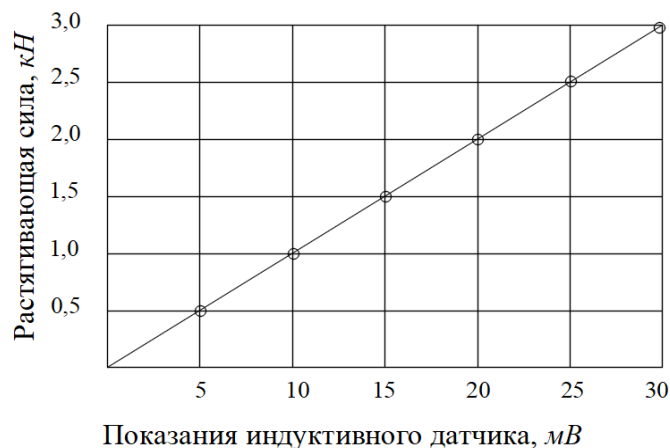


Рисунок 2. Тарировочный график зависимости сигнала индуктивного датчика от осевой силы, приложенной к силовому штоку

Прямое измерение деформации испытуемого образца с его рабочей части (на базе измерения), находящегося в высокотемпературной воде в камере с использованием существующих методов, представляется невозможным.

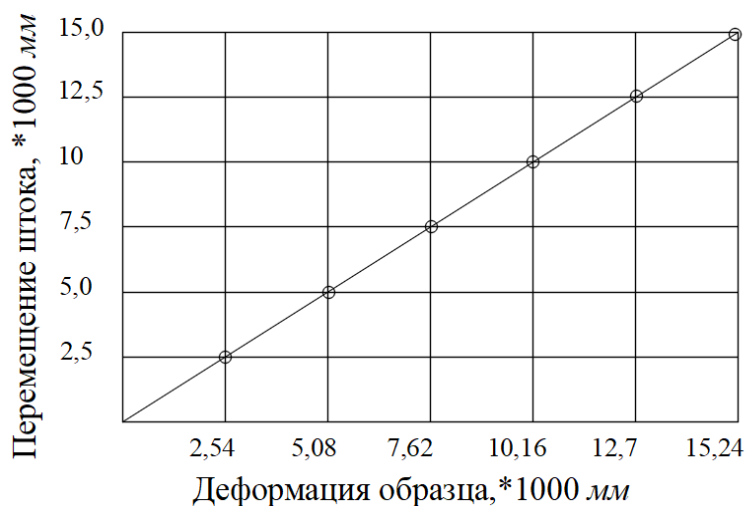


Рисунок 3. Тарировочный график деформации испытуемого образца

Поэтому был использован косвенный метод измерения, основанный на построении тарировочного графика деформации образца, связывающего перемещение силового штока относительно корпуса камеры с истинной деформацией испытуемого образца. Данный тарировочный график так же, как в первом случае, строился на воздухе в той же камере при нормальной температуре путем пошагового перемещения силового штока и

соответствующего измерения показаний деформометра, тензометрические датчики которого были наклеены на рабочую поверхность испытуемого образца. Перемещение силового штока измерялось и задавалось индикаторами часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленными на штангах, расположенных на диаметрально противоположных сторонах от оси штока, и жестко закрепленными к силовому штоку. Полученный таким методом тарировочный график деформации образца показан на рисунке 3.

Устройство испытательного стенда. Испытательный стенд состоит из двух основных узлов – узла системы, обеспечивающей заданные параметры дистиллированной воды в камере по температуре и давлению, и узла камеры, в которой создается высокое давление и необходимая высокая температура.

Основным узлом стенда является камера высокого давления, предназначенная для заполнения дистиллированной водой и установления испытуемого образца, обеспечивающая высокие температуры и давление среды. Камера высокого давления (рисунок 1) состоит из основания 17, полости 15, образованной цилиндрической обечайкой, закрытой снизу основанием камеры, а сверху крышкой, в центральном отверстии которой выполнена цилиндрическая полость, предназначенная для размещения сальниковых уплотнений 9. С боковых сторон крышки камеры ввинчены штуцера, предназначенные для соединения питающей трубы и манометра. Через центральное отверстие в крышке камеры вводится силовой шток, имеющий внутреннее продольное, глухое снизу отверстие, предназначенное для установки механического тензометра 6. На верхнем конце механический тензометр снабжен индуктивным датчиком перемещения 5.

Силовой шток нижним концом при помощи резьбового соединения взаимодействует с испытуемым образцом 13, а на некотором расстоянии от места крепления образца шток имеет утоненное сечение длиной равной базе измерения механического тензометра. Другой конец испытуемого образца с помощью резьбового соединения соединяется с неподвижным захватом 16. Такой надежно соединенный силовой шток собирается вне камеры и при ослабленном сальниковом уплотнении вставляется в центральное отверстие крышки камеры до соприкосновения буртика неподвижного захвата с ромбическим металлическим кольцом уплотнения. Затем затягивается гайка неподвижной опоры и прижимная втулка сальниковых уплотнений, что обеспечивает герметичность полости камеры. После этого устанавливается механический тензометр с индуктивным датчиком перемещения во внутреннюю полость силового штока, ввинчиванием корпуса тензометра в резьбовое гнездо силового штока до упора корпуса тензометра в буртик, имеющийся в отверстии штока.

В отверстие корпуса тензометра свободно вставляется подвижная ножка тензометра в виде тонкого стержня с ферромагнитным наконечником на конце, который под действием собственного веса упирается на глухое дно осевого отверстия силового штока. Установка показания индуктивного датчика в исходное нулевое положение обеспечивается осевым перемещением катушек индуктивного датчика и вращением его корпуса относительно корпуса тензометра, между которым имеется резьбовая связь.

В состав второго узла испытательного стенда – системы обеспечения необходимых параметров входят: баллон со сжатым газом (аргон) 1, ресивер 5, плунжерный насос высокого давления 3, вентиль высокого давления 4, обратный клапан 10, емкость для запаса дистиллированной воды 2 и электрический нагреватель 14, охватывающий

наружную цилиндрическую поверхность обечайки камеры. Задачей этого узла стенда является создание высокой температуры воды до значения 300 °С, давления в камере до 15 МПа и поддержание их постоянными в течение всего эксперимента. Нужное значение температуры воды в камере поддерживается путем периодического автоматического отключения и включения электронагревателя от питания. Заданное высокое давление среды после остановки плунжерного насоса 3 и закрытия вентиля высокого давления 4, поддерживается подключенными в систему ресивером 5 и баллоном со сжатым газом 1.

Экспериментальная часть

Методика проведения испытаний образцов сталей с низкими скоростями деформирования растяжением в среде высокотемпературной дистиллированной воды

Для проведения испытаний изготавливались образцы из стали 10ГН2МФА, форма и размеры которых показаны на рисунке 4. На каждую точку было испытано по три образца, ГОСТ 1497-2023.

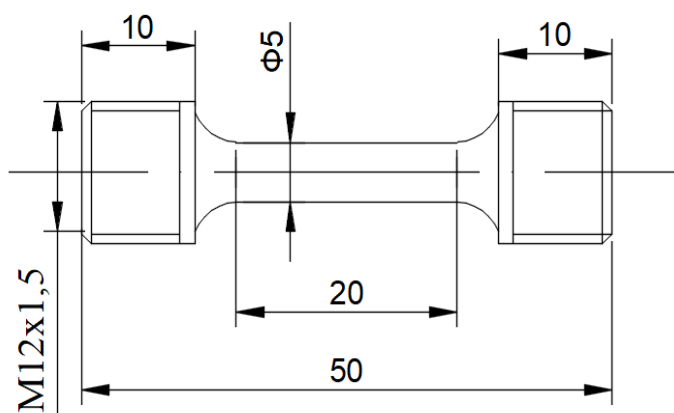


Рисунок 4. Образец для испытаний на растяжение

В камеру, установленную в испытательную машину через сальниковые уплотнения в крышке, вводится силовой шток с закрепленным в нем испытуемым образцом и неподвижным захватом на конце, затем затягиваются гайка неподвижного захвата и болты прижимной втулки сальниковых уплотнений. После полной сборки камеры при помощи плунжерного насоса высокого давления, дистиллированная вода подается в камеру с образцом и в ресивер. По мере повышения давления в камере воздух в ресивере сжимается и по достижении необходимого давления (в эксперименте до 15 МПа) вентиль 4 закрывается и насос 3 останавливается. В камере образуется замкнутое пространство, ограниченное металлическим кольцевым уплотнением неподвижного захвата, и сальниковым уплотнением, расположенным вокруг силового штока. Металлическое кольцевое уплотнение неподвижного захвата, изготовленное из нержавеющей стали, имеет ромбическую форму сечения, располагается между буртиком неподвижного захвата и корпусом камеры, обеспечивая его герметичность.

Сжатые газы в баллоне и в ресивере непрерывно поддерживают необходимое давление воды в камере. В случае снижения давления в камере включается насос и происходит подача воды в камеру. После проверки герметичности камеры включается нагреватель. По достижении необходимой температуры и давления включается испытательная машина, и силовой шток камеры растягивает испытуемый образец с соответствующей заданной

скоростью деформирования, принятой программой испытания.

В ходе проведения испытаний до разрушения образца периодически записываются величина усилия и соответствующее ему удлинение образца, по которым строится диаграмма растяжения. После разрушения образца измеряются удлинение рабочей его части l_1 и диаметр в месте разрушения на уровне образовавшейся «шейки», рассчитываются стандартные характеристики прочности и пластичности (σ_B - временное сопротивление, σ_T - предел текучести, ψ - относительное сужение, δ - относительное удлинение после разрыва).



Рисунок 5. Диаграмма растяжения образцов стали 10ГН2МФА на воздухе и в дистиллированной воде при температуре 280 °С и скорости

деформирования $\varepsilon = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$

1 – Испытание на воздухе

2 – Испытание в дистиллированной воде

Были проведены металлографические исследования поверхности на поперечных и продольных шлифах образцов после их испытания.

На рисунке 5 показана диаграмма растяжения стали 10ГН2МФА, построенная по точкам измерений, полученных в ходе испытания образца. Испытания проведены на воздухе и в дистиллированной воде при температуре 280 °С и давлении 15 МПа. Из-за технической сложности проведения испытаний в вышеуказанных параметрах среды с низкой скоростью деформирования $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-6} \text{ c}^{-1}$ испытание одного образца продолжается около 3,5 суток, а при этом $\varepsilon = 1 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$ продолжительность составит уже 36 суток, кроме того требуется непрерывное поддержание заданного параметра среды и обеспечение круглосуточного наблюдения с организацией дежурства исполнителей) поэтому эксперименту были подвергнуты шесть образцов по три на воздухе и в указанной среде.

Экспериментальные точки, показанные на рисунке 5, являются средними значениями деформаций, полученных на каждом уровне приложенных напряжений по испытаниям трех образцов. Диаграммы растяжения для каждой тройки испытаний оказались практически идентичными, что является основанием считать полученные результаты

достоверными.

Предварительно проведенные испытания образцов стали позволили отработать разработанную нами методику проведения экспериментальных исследований по определению истинных характеристик механических свойств стали в условиях, соответствующих эксплуатационным условиям работы парогенератора АЭС. Разработанное оборудование и измерительные инструменты дали возможность с высокой точностью измерять усилия, прикладываемые на образец в камере и его деформацию. Результаты испытаний образцов стали 10ГН2МФА на статическое растяжение с низкими скоростями деформирования при температуре 280 °С

Осевое растяжение образца при длине рабочей части испытуемого образца (база измерения деформации) $l_0=20$ мм проводили со скоростью деформирования $\varepsilon=0,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$. Для обеспечения такой скорости деформирования образца скорость растяжения, то есть скорость движения активного захвата машины, рассчитывалась следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{V}{l_0}; \text{ откуда } V = \varepsilon \cdot l_0 = 0,9 \cdot 10^{-5} \cdot 60 \cdot 20 \approx 0,011 \text{ мм/мин.},$$

где: ε – скорость деформирования,

V – скорость движения активного захвата машины,

l_0 – рабочая длина испытуемого образца

Таким образом, скорость перемещения силового штока должна равняться $V=0,011 \text{ мм/мин.}$

Для сравнительного анализа полученных результатов испытания образцов проведены как на воздухе, так и в дистиллированной воде. Полученные результаты испытаний в виде диаграмм зависимостей относительной осевой деформаций образца от приложенного растягивающего напряжения показаны на рисунке 5. Как видно из рисунка 5, дистиллированная вода оказывает существенное влияние в указанных условиях на деформационную способность стали. Пластичность стали в виде относительной продольной деформации значительно снижается, при этом предел прочности остается одинаковым как на воздухе, так и в дистиллированной воде.

Для анализа деформаций и напряжений в упругопластической области широкое применение получила степенная аппроксимация диаграммы деформирования в виде зависимости [16]:

$$\sigma = \sigma_m \left(\frac{e}{e_m} \right)^m,$$

где: e - продольная относительная деформация;

e_T - продольная относительная деформация, соответствующая пределу текучести материала;

m - характеристика упрочнения материала в упругопластической области.

Для стали при $E=2 \cdot 10^5 \text{ МПа}$ и $\sigma_m \leq \sigma \leq \sigma_B$, то есть на восходящем участке диаграммы деформирования, показатель упрочнения определяется следующим образом.

$$m = 0,75m^*$$

$$\text{где: } m^* = \frac{\lg \left[\frac{\sigma_B}{\sigma_{0,2}} (1 + 1,4 \Psi_K) \right]}{\lg \left[\left(10^5 \ln \frac{1}{1 - \Psi_K} \right) / (200 + 0,5 \sigma_{0,2}) \right]} = 0,126, \text{ тогда } m = 0,75 \cdot 0,126 = 0,095.$$

$$- \sigma_B = 520 \text{ МПа}, \sigma_{0,2} = 410 \text{ МПа}, \sigma_m = 371 \text{ МПа}, \Psi_K = 78\%. e_m = 0,001855.$$

Результаты, полученные в данной работе, хорошо коррелируют с результатами,

полученными в работе [17] при испытании этой же стали. В работе [18] показано, что в диапазоне скоростей деформации от 10^{-7} с^{-1} до 10^{-6} с^{-1} в высокотемпературной воде наблюдается наибольшее снижение коэффициента сужения поперечного сечения. Снижение пластичности стали показано на рисунке 6, кривая 3.

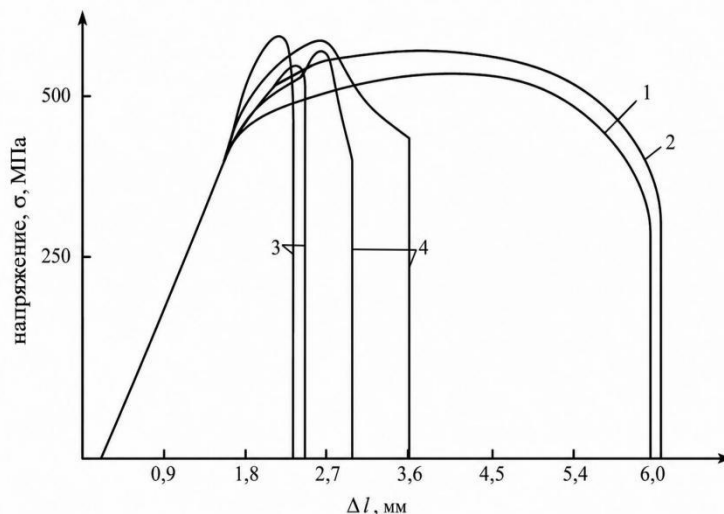


Рисунок 6. Диаграммы деформации стали 10ГН2МФА при испытании на склонность к коррозионному растрескиванию в воде высоких параметров: 1 – воздух, 280°C , $\varepsilon = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; 2 – бидистиллят, 280°C , $\varepsilon = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$; 3 – бидистиллят, 280°C , $\varepsilon = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$; 4 – бидистиллят, 230°C , $\varepsilon = 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ [19].

В работе [19] показано, что на поверхности корпуса холодного коллектора, находящегося под воздействием воды, температура которой 260°C – 280°C образуются трещины коррозионно-механического растрескивания. Это свидетельствует о склонности этой стали к охрупчиванию под воздействием окружающей среды. Отмечено, что в указанном диапазоне температур пластичность стали снижается в 8-10 раз.

Результаты и обсуждение

С целью осуществления экспериментальных испытаний сталей в среде эксплуатационных параметров и получения истинных характеристик механических свойств при воздействии коррозионных жидких сред, разработан лабораторный стенд с камерой высокого давления; установка позволяет проводить испытания на растяжение и обеспечивает точность измерения усилий и деформации испытываемого образца стали, находящегося в камере со средой.

Проведены испытания и получены экспериментальные данные, которые показали, что дистиллированная вода с температурой 280°C при скорости деформирования $\varepsilon = 0,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ снижает относительную продольную деформацию, определенную по моменту разрушения испытываемого образца по сравнению с ее значением, полученным по результатам испытания на воздухе при той же температуре и скорости деформирования. Это снижение составило 50% по сравнению с данными, полученными на воздухе. Предел прочности при

этом в условиях осевого растяжения со скоростью деформирования $\varepsilon=0,9 \cdot 10^{-5} \text{с}^{-1}$ не изменился. Несмотря на столь низкую скорость деформирования, продолжительность времени нахождения образца, длиной рабочей части 20 мм, до разрушения в дистиллированной воде составила 2,93 часа, что было недостаточно для проявления отрицательного влияния среды на прочность стали.

Защитная магнетитовая пленка, образующаяся на поверхности стали, находящейся под действием воды высоких температур, в ходе деформации образца с низкой скоростью периодически растрескивается и восстанавливается. Вследствие этого образуется шероховатость поверхности, растрескивается поверхностный слой испытуемого образца от растягивающей деформации, развивается процесс разрыхления поверхностного слоя за счет образования и развития микроскопических коррозионных трещин, что и приводит к охрупчиванию стали. Таким образом, интенсивность разрушения стали от коррозионного воздействия окружающей среды зависит от степени нарушения сплошности поверхностного защитного слоя магнетитовой пленки.

Результаты экспериментальных исследований, изложенные в работе [20] подтверждают образование коррозионно-механической трещины на «холодном» коллекторе парогенератора. На основе полученных результатов сделано заключение о механизме коррозионно-механического растрескивания, которое заключается в разрушении поверхностной пленки за счет деформации, происходящей с низкой скоростью при воздействии коррозионной среды. Трещины были обнаружены только на «холодном» коллекторе, где температура материала составляет около 280 °С, а на «горячем» коллекторе, где температура материала составляет 320 °С, трещин не обнаружено. Из сказанного следует, что основными факторами снижения пластичности стали в этих условиях, являются определенные сочетания температуры и скорости деформирования, приводящие к охрупчиванию и растрескиванию металла.

Заключение

1. Разработанный и изготовленный авторами испытательный стенд показал высокую надежность при проведении испытаний образцов стали в высокотемпературной дистиллированной воде, непрерывно обеспечивая необходимые параметры среды за все время проведения испытания.

2. Разработанная схема измерения усилия, прикладываемого к испытуемому образцу, и деформации образца, находящегося под воздействием внешней среды, с использованием косвенных методов с построением тарировочных графиков позволила повысить точность определения напряжения и деформации образца в ходе испытания.

3. Получены первые экспериментальные результаты испытания образцов стали 10ГН2МФА растяжением с низкими постоянными скоростями деформирования, как на воздухе, так и в дистиллированной воде.

4. Результаты первых испытаний показали, что коррозионная среда в виде воды высоких температур и давления существенно снижает пластические свойства стали, тогда как прочность ее остается неизменной по сравнению с данными, полученными на воздухе.

5. Полученные результаты и диаграммы растяжения образцов стали 10ГН2МФА в коррозионной среде и сопоставление их с данными других исследователей, позволяют сделать вывод о том, что низкие скорости деформирования стали в этой же среде являются одними из основных факторов ее охрупчивания и потери пластичности. Следовательно,

рекомендуется такой режим работы в процессе эксплуатации парогенератора, при котором сочетание высокой температуры и скорости деформирования не приводит к охрупчиванию материала его корпуса.

Благодарности/Источник финансирования

Исследование проводилось в Научно-исследовательской лаборатории “Проблемы машиностроения” в рамках грантового финансирования Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP26199289 Разработка методики инженерного расчета элементов атомных и тепловых энергетических установок, подвергающихся воздействию механических напряжений и коррозионной среды, высокой температуры).

Вклад авторов

Абшенов Х.А. – постановка научной задачи, координация совместной работы авторского коллектива, разработка концепции исследования и общей методологии проведения испытаний, научное руководство работой, анализ и интерпретация полученных результатов, подготовка и редактирование рукописи статьи.

Арапов Б.Р. – разработка конструкции испытательного стенда, расчёт и проектирование испытательной камеры и силовых элементов, выбор схемы измерения усилий и деформаций, участие в подготовке технической документации, редактирование текста статьи, формирование научной интерпретации результатов.

Сейтказенова К.К. – обработка и статистический анализ экспериментальных результатов, построение зависимостей механических характеристик, подготовка графиков и таблиц, оформление аннотации и основной части статьи, подготовка статьи к публикации.

Печерский В.Н. – проведение экспериментальных испытаний образцов стали 10ГН2МФА на статическое растяжение и малоцикловое нагружение в воздухе и в высокотемпературной воде, построение тарировочных графиков, измерение усилий и деформаций, обработка первичных экспериментальных данных, участие в обсуждении результатов и формулировании инженерных рекомендаций.

Жайлыбек Б.Б. – изготовление, сборка и наладка испытательного стенда, монтаж вспомогательного оборудования (насос высокого давления, ресивер, газовая система, трубопроводы), проведение пуско-наладочных работ и обеспечение работоспособности установки.

Список литературы

1. Vilensky O.Yu., Dushev S.A., Shimin D.A. Models of material deformation under dynamic loading applied to various structural elements. // Atomic Energy. – 2025. – С. 231–235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01250-8>.
2. Kulakov G.V., Konovalov Yu.V., Savchenko A.M. Corrosion of E110 alloy fuel rod claddings in reactors of nuclear icebreakers and small nuclear power plants. // Atomic Energy. – 2025. – С. 35–39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01223-x>.
3. Smirnova L.S., Korolev S.A. Critical factors of an integrated approach to the economics of small modular reactors. // Atomic Energy. – 2025. – С. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01171-6>.
4. International Atomic Energy Agency. Stress corrosion cracking in light water reactors: good practices and lessons learned. Vienna: IAEA, 2011. – С. 1–15.

5. Andersen P.L., Ford F.P. Life prediction by mechanistic modeling and monitoring of environmental cracking of iron and nickel alloys in aqueous systems. // *Materials Science and Engineering A*. – 1988. – Vol. 103. – С. 167–184.
6. Galvele J.R. Application of the surface mobility stress corrosion cracking mechanism to nuclear materials. // *Journal of Nuclear Materials*. – 1996. – Vol. 229. – С. 139–148.
7. Macdonald D.D., Urquidi-Macdonald M. A coupled environment model for stress corrosion cracking in sensitized type 304 stainless steel in LWR environments. // *Corrosion Science*. – 1991. – Vol. 32. – С. 51–81.
8. Scott P.M., Le Calvar M. Some possible mechanisms of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWR primary water. // *Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*. – 1993. – С. –657.
9. Guellouh N., Sisodia R.P.S., Szamosi Z. Weldability of high-strength steels. // *Multiscience XXXII International Multidisciplinary Scientific Conference MicroCAD*. – Мишкольц, 2018. – С. 1–8.
10. Scott P.M. An overview of internal oxidation as a possible explanation of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWRs. // *Proceedings of the 9th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*. – 2013. – С. 3–15. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118787618>.
11. Ortner S. Review of requirements for structural materials and their selection for nuclear power plants. // *Frontiers in Nuclear Engineering*. – 2023. – С. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1253974>.
12. Арапов Б.Р. О математической модели механического разрушения высокопрочной котельной стали 10ГН2МФА в воде высоких параметров // *Наука и образование ЮК*. – 1996. – С. 152–158.
13. ГОСТ Р 59115.3–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (кратковременные механические свойства конструкционных материалов). – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 12 с.
14. ГОСТ Р 59115.4–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (длительные механические свойства конструкционных материалов). – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 17 с.
15. ГОСТ Р 59115.5–2021. Обоснование прочности оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (расчетные характеристики циклической прочности конструкционных материалов). – М.: Российский институт стандартизации, 2021. – 22 с.
16. Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкций на прочность. – М.: Машиностроение, 1981. – 272 с.
17. Tukur H., Yonghao L. Behavior of 308L weld overlay and its corrosion in nuclear power plants. // *Int. J. Electrochem. Sci*. – 2020. – С. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.20964/2020.01.67>.
18. Казанцев А.Г., Зубченко А.С., Харина И.Л., Григорьев В.А., Жуков Р.Ю., Петрова О.Ю. Прогнозирование склонности стали 10ГН2МФА к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию в высокотемпературной воде // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. –

2009. – № 1. – С. 58–64.

19. Лкаевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е. Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – С. 376–391.
20. Korol O.A., Degaev E.N., Sabitov L.S., Ayzatullin M.M., Kiyamova L.I. Effect of temperature difference on bending of external panel walls. *Construction Materials and Products*, 2024, Vol. 7, No. 3, pp. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-6>.

Kh.A. Abshenov, B.R. Arapov*, K.K. Seitzkazenova, V.N. Pecherskiy, B.B. Zhailybek

M. Auezov South Kazakhstan University, Shymkent, Kazakhstan

Methods and equipment for testing steel samples in distilled water at high temperature and pressure

Abstract. This paper describes the design of a developed and manufactured experimental test bench consisting of a test chamber and auxiliary equipment, including a high-pressure pump, receiver, compressed inert gas cylinder, and connecting pipelines. The test bench enables testing of steel specimens in distilled water under high temperature and pressure conditions for static deformation at various strain rates, as well as for low-cycle symmetric loading. A distinctive feature of the test bench is the ability to determine static mechanical properties and cyclic strength of steel specimens with high accuracy. The test chamber provides precise measurement of the force applied to the specimen in a high-temperature water environment, while deformation is measured indirectly using previously obtained calibration curves. The applied force is determined using an inductive displacement sensor of a mechanical extensometer installed inside the loading rod. Using this test bench, tensile tests of 10GN2MFA steel specimens were carried out in air and in distilled water at a temperature of 280 °C. The results showed that the strength of the steel remains unchanged, whereas its plastic properties decrease.

Keywords: development, test bench, testing, corrosive environment, strength, ductility, nuclear power plant.

References

1. Vilensky O.Yu., Dushev S.A., Shimin D.A. Models of material deformation under dynamic loading applied to various structural elements. *Atomic Energy*, 2025, pp. 231-235. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01250-8>.
2. Kulakov G.V., Konovalov Yu.V., Savchenko A.M. Corrosion of E110 alloy fuel rod claddings in reactors of nuclear icebreakers and small nuclear power plants. *Atomic Energy*, 2025, pp. 35-39. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01223-x>.
3. Smirnova L.S., Korolev S.A. Critical factors of an integrated approach to the economics of small modular reactors. *Atomic Energy*, 2025, pp. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-025-01171-6>.
4. International Atomic Energy Agency. Stress corrosion cracking in light water reactors: good practices and lessons learned. Vienna: IAEA, 2011, pp. 1-15.
5. Andersen P.L., Ford F.P. Life prediction by mechanistic modeling and monitoring of

- environmental cracking of iron and nickel alloys in aqueous systems. *Materials Science and Engineering A*, 1988, Vol. 103, pp. 167-184.
6. Galvele J.R. Application of the surface mobility stress corrosion cracking mechanism to nuclear materials. *Journal of Nuclear Materials*, 1996, Vol. 229, pp. 139-148.
 7. Macdonald D.D., Urquidi-Macdonald M. A coupled environment model for stress corrosion cracking in sensitized type 304 stainless steel in LWR environments. *Corrosion Science*, 1991, Vol. 32, pp. 51-81.
 8. Scott P.M., Le Calvar M. Some possible mechanisms of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWR primary water. *Proceedings of the 6th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, 1993, p. 657.
 9. Guellouh N., Sisodia R.P.S., Szamosi Z. Weldability of high-strength steels. *Multiscience XXXII International Multidisciplinary Scientific Conference MicroCAD*, Miskolc, 2018, pp. 1-8.
 10. Scott P.M. An overview of internal oxidation as a possible explanation of intergranular stress corrosion cracking of alloy 600 in PWRs. *Proceedings of the 9th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems*, 2013, pp. 3-15. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118787618>.
 11. Ortner S. Review of requirements for structural materials and their selection for nuclear power plants. *Frontiers in Nuclear Engineering*, 2023, pp. 1-15. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnuen.2023.1253974>.
 12. Arapov B.R. On a mathematical model of mechanical fracture of high-strength boiler steel 10GN2MFA in high-parameter water. *Science and Education of South Kazakhstan*, 1996, pp. 152-158.
 13. GOST R 59115.3–2021. Strength justification of equipment and pipelines of nuclear power installations (short-term mechanical properties of structural materials). Moscow, 2021, 12 p.
 14. GOST R 59115.4–2021. Strength justification of equipment and pipelines of nuclear power installations (long-term mechanical properties of structural materials). Moscow, 2021, 17 p.
 15. GOST R 59115.5–2021. Strength justification of equipment and pipelines of nuclear power installations (cyclic strength characteristics of structural materials). Moscow, 2021, 22 p.
 16. Makhutov N.A. Deformation criteria of fracture and strength analysis of structural elements. Moscow: Mashinostroenie, 1981, 272 p.
 17. Tukur H., Yonghao L. Behavior of 308L weld overlay and its corrosion in nuclear power plants. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2020, pp. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.20964/2020.01.67>.
 18. Kazantsev A.G., Zubchenko A.S., Kharina I.L., Grigoriev V.A., Zhukov R.Yu., Petrova O.Yu. Prediction of susceptibility of 10GN2MFA steel to slow strain rate stress corrosion cracking in high-temperature water. *Vestnik Magnitogorsk State Technical University*, 2009, No. 1, pp. 58-64.
 19. Lkasevich B.I., Trunov N.B., Dragunov Yu.G., Davidenko S.E. Steam generators of VVER reactor installations for nuclear power plants. Moscow: Akademkniga, 2004, pp. 376-391.
 20. Korol O.A., Degaev E.N., Sabitov L.S., Ayzatullin M.M., Kiyamova L.I. Effect of temperature difference on bending of external panel walls. *Construction Materials and Products*, 2024,

Сведения об авторах:

Абшенов Х.А. – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, руководитель научного проекта, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Арапов Б.Р. – автор для корреспонденции, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник проекта, область научной деятельности: механика, механика деформируемого твердого тела, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, корпус «В», пр. Тауке хана, 5, кабинет 325, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Сейтказенова К.К. – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник проекта, область научной деятельности: материаловедение, механика деформируемого твердого тела, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Печерский В.Н. – доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник проекта, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Жайлыбек Б.Б. – докторант, младший научный сотрудник проекта, Южно-Казахстанский университет им. М. Ауэзова, пр. Тауке хана, 5, 160012, г. Шымкент, Казахстан.

Abshenov Kh.A. – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Head of the research project. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Arapov B.R. – Corresponding author, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the project. Research areas: Mechanics, Mechanics of Deformable Solid Bodies. M. Auezov South Kazakhstan University, Building “B”, Tauke Khan Avenue 5, Office 325, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Seitkazenova K.K. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the project. Research areas: Materials Science, Mechanics of Deformable Solid Bodies. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Pecherskiy V.N. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading Researcher of the project. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan.

Zhailybek B.B. – Doctoral student, Junior Researcher of the project. M. Auezov South Kazakhstan University, Tauke Khan Avenue 5, 160012, Shymkent, Republic of Kazakhstan

