

черпания ресурса металла. Установлено, что в первой половине «жизни» металла до истощения 50% ресурса основным структурным процессом является выделение карбидов NbC и Me₂₃C₆ в теле зерна и карбидов ниобия по границам зерен.

Микротвердость в этот период увеличивается. После 50% истощения ресурса начинается коагуляция карбидов NbC и Me₂₃C₆ в теле зерна. В период от 70 до 90% истощения ресурса наблюдается частичное растворение карбидов Me₂₃C₆. Вследствие этих процессов микротвердость тела зерна уменьшается.

Проведенные исследования труб стали ДИ59, изготовленных по новой усовершенствованной технологии изготовления трубной заготовки и пароперегревательных труб, показали, что значительно улучшилось качество металла: неметаллические включения располагаются равномерно по телу трубной заготовки и составляют по сульфидам – 0,5 балла, по оксидам и силикатам – 0,5–1,4 балла. Количество феррита не превышает 1,5 балла.

Все это положительно сказалось на служебных свойствах, в частности на значительном увеличении длительной пластичности металла труб стали ДИ59.

Изменение механических свойств и структуры стали ДИ59 при различных температурах после старения, подтвержденные эксплуатационными испытаниями, показало, что сталь ДИ59 нечувствительна к колебаниям температур до 700°С, что, несомненно, является исключительной особенностью и преимуществом данной стали. По заключению ВТИ, скорость наружной коррозии металла труб из стали ДИ59 при эквивалентных температурах 620–630°С не превышает 0,3 мм за 100000 ч эксплуатации. При этом ресурс работы труб конвективных пароперегревателей высокого давления (КПП в.д.) из труб стали ДИ59 составляет 300000 ч. При замене труб из стали 12Х18Н12Т на трубы из стали ДИ59 реальный ресурс работы увеличивается в 4–5 раз вследствие предотвращения хрупких разрушений с внутренней стороны трубы.

УДК 539.4

Старченко Е.Г., Казанцев А.Г., Ходаков В.Д., Силаев А.А., Зубченко А.С.

О ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ВРЕМЕНИ СУММАРНОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛИ 10ГН2МФА ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕМОНТНЫХ РАБОТ

При изготовлении, монтаже и ремонте после эксплуатации сварные соединения оборудования и трубопроводов АЭС из стали 10ГН2МФА подвергаются нескольким термообработкам при температуре 620–660°С.

Допустимое суммарное время термообработки, базирующееся на результатах проведенных аттестационных испытаний, составляет 45 ч [1–4].

В связи с гипотетической возможностью проведения на энергоблоках, срок эксплуатации которых приближается к 30 годам, крупных ремонтных работ, таких как замена парогенераторов, ремонт шва приварки коллектора теплоносителя к корпусу парогенератора (шов №111), возникла необходимость оценки влияния суммарной продолжительности отпуска, превышающей 45 ч.

В данной работе исследовалось влияние суммарной продолжительности отпуска до 75 ч при температуре 620–660°С на эксплуатационные свойства основного металла и сварных соединений стали 10ГН2МФА.

Исследования проводились прежде всего применительно к сварным соединениям трубопроводов Ду850 ГЦТ (замена парогенераторов) и шву приварки коллектора к корпусу парогенератора (шов № 111). Эти сварные соединения при изготовлении выполнялись по отличающимся друг от друга технологиям с использованием различных сварочных материалов.

Исследованные типы материалов и сварных соединений приведены в табл. 1.

Из термообработанных сварных соединений вырезались образцы для определения механических свойств, сопротивления малоциклового усталости и

хрупкой прочности.

В табл. 2 приведены результаты испытаний, а в табл. 3 – гарантированные механические свойства основного металла стали 10ГН2МФА и металла шва, выполненного ручной электродуговой сваркой электродами УОНИИ-13/55 и ПТ-30, а также автоматической сваркой электродной проволокой Св-10ГН1МА под флюсом ФЦ-16.

Из табл. 2 и 3 видно, что после проведения термообработки 75 ч при температуре 620–660°С не происходит снижение механических свойств ниже гарантированных как у основного металла, так и всех исследованных вариантов металла шва.

Все механические свойства ($R_{p0,2}$, R_m , A , Z) существенно превышают гарантированные значения. При этом металл шва, выполненный электродами ПТ-30 и сварочной проволокой Св-10ГН1МА под флюсом ФЦ-16,

Таблица 1

Исследованные типы материалов и сварных соединений

Сварное соединение	Способ сварки и сварочные материалы
Сварной шов приварки коллектора к корпусу парогенератора	Ручная электродуговая сварка электродами УОНИИ-13/55
Сварной шов приварки днища к корпусу парогенератора	Автоматическая сварка под флюсом (Св-10ГН1МА + ФЦ-16)
Сварной шов сварки трубопроводов Ду850 между собой	Ручная электродуговая сварка электродами ПТ-30

Таблица 2

Механические свойства стали 10ГН2МФА, металла шва и сварных соединений после термической обработки 620–660°С, 75 ч

Температура испытаний, °С	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Относительное сужение, %
Основной металл – сталь 10ГН2МФА (корпус парогенератора)				
20	549–556	419–446	22,7–24	79–80
350	540	406–429	19–23	74–75
Основной металл – сталь 10ГН2МФА (труба Ду850)				
20	564–567	415–443	26,7	71,6–75
350	544–545	376–379	21,4–23,3	72,4–73,3
Металл шва – электроды УОНИИ-13/55				
20	480–489	354	25	75–78
350	438–460	323–336	19–20	76
Сварное соединение – электроды УОНИИ-13/55				
20	457–471			
350	427–437			
Металл шва – сварочная проволока Св-10ГН1МА+ФЦ-16				
20	634–641	543–552	16–18	68–72
350	586–595	470–471	22–24	69–70
Сварное соединение – сварочная проволока Св-10ГН1МА+ФЦ-16				
20	552–560			
350	541–543			
Металл шва – электроды ПТ-30				
20	632–648	546–551	16–19	68–70
350	589–594	480–481	21–23	69–71
Сварное соединение – электроды ПТ-30				
20	555–556			
350	553–592			

обеспечивает равнопрочность по отношению к основному металлу. Металла шва, выполненный электродами УОНИИ-13/55, имеет прочность ниже прочности металла шва, выполненного электродами ПТ-30 и проволокой Св-10ГН1МА под флюсом ФЦ-16 (до 1,5 раз), но более высокие пластические свойства (относительное удлинение и сужение).

Аналогичные данные получены для основного металла и зоны термического влияния сварных соединений стали 10ГН2МФА, выполненных электро-

дом ПТ-30 (образцы вырезались из трубы Ду 850 в осевом и тангенциальном направлении).

Испытания на ударную вязкость проводились на тех же типах основного металла и сварных соединений. Было установлено, что в исследованном диапазоне длительности термообработки характеристики ударной вязкости сохраняются на достаточно высоком уровне. Полученные значения критической температуры хрупкости $T_{ко}$ составляют для основного металла –40°С, для металла шва и зоны термического влияния от –10 до –30°С (табл. 4).

Полученные результаты говорят о достаточно высокой отпускостойчивости стали 10ГН2МФА и её сварных соединений при температуре 620–660°С, что полностью согласуется с данными, полученными ранее при исследовании и аттестации стали 10ГН2МФА для АЭУ.

Таким образом, для исследованной продолжительности дополнительного отпуска сталь 10ГН2МФА и сварные соединения, выполненные электродами УОНИИ-13/55 автоматической сваркой и электродами ПТ-30, по критической температуре хрупкости отвечают требованиям, которые к ним предъявляются по ПН АЭ Г-7-002-86 и ПН АЭ Г-7-010-89.

Приведенные выше данные о влиянии дополнительного отпуска на механические свойства металла сварных соединений стали 10ГН2МФА показали, что характеристики растяжения основного металла и металла шва, коррелирующие с характеристиками малоциклового усталости (временное сопротивление R_m и относительное сужение Z) при увеличении продолжительности отпуска до 75 ч практически не изменяются, что говорит о стабильности сопротивления малоциклового усталости металла шва и основного металла. В связи с этим в выполненных испытаниях на малоциклового усталость основное внимание было уделено сварным соединениям.

При проведении этих испытаний был использован металл сварного шва, выполненного электродами УОНИИ-13/55, прошедший дополнительную термообработку при температуре 620–660°С в течение 75 ч. Для сравнительного анализа взяты два сварных соединения стали 10ГН2МФА, выполненных электродами ПТ-30, в одном из которых основной металл перед сваркой не

Таблица 3

Гарантированные механические свойства стали 10ГН2МФА и металла шва (3 варианта) после окончательного высокого отпуска

Марка материала	Температура испытания, °С								$T_{ко}, °С$
	20				350				
	R_m , МПа	$R_{p0,2}$, МПа	A, %	Z, %	R_m , МПа	$R_{p0,2}$, МПа	A, %	Z, %	
Сталь 10ГН2МФА	539	343	16	55	490	294	14	50	(–10)–(+15)
Металл шва – электроды УОНИИ-13/55	431	255	20	50	372	216	18	50	0
Металл шва – 10ГН2МФА+ФЦ16	539	343	16	55	490	294	14	50	(–10)–(+15)
Металл шва – электроды ПТ-30	539	343	16	55	490	294	14	50	(–10)–(+15)

Таблица 4

Критическая температура хрупкости основного металла – стали 10ГН2МФА, металла шва и металла зоны термического влияния после термической обработки 620–660°С, 75 ч

№ п/п	Материал	$T_{ко}, °С$
1	Основной металл – сталь 10ГН2МФА	–40
2	Металл шва – электроды УОНИИ-13/55	–30
3	Зона термического влияния шва (металл шва – электроды УОНИИ-13/55)	–50
4	Металл шва – Св-10ГН1МА + ФЦ-16	–10
5	Зона термического влияния шва (Св-10ГН1МА + ФЦ-16)	–25
6	Металл шва – электроды ПТ-30	–30
7	Зона термического влияния шва – электроды ПТ-30	–30

подвергался дополнительному отпуску, а в другом прошел дополнительный отпуск при 620–660 °С, 60 ч.

Для удобства сопоставления полученных экспе-

риментальных значений с нормативными кривыми малоциклового усталости амплитуды упругопластических деформаций были пересчитаны в условные на-

пряжения (с учетом зависимости модуля упругости от температуры) (рис. 1, 2).

Анализ полученных результатов показывает, что данные испытаний основного металла, прошедшего дополнительную термообработку в течение 8, 60 и 75 ч, отличаются несущественно и лежат в пределах полосы разброса экспериментальных значений.

Результаты испытаний образцов, вырезанных из шва, выполненного электродами УОНИИ-13/55, прошедшего дополнительную термообработку в течение 75 ч, располагаются несколько ниже экспериментальных точек, полученных для основного металла, а также сварных соединений, выполненных электродами ПТ-30 после отпуска в течение 8 и 60 ч. Видно также, что свойства сварных соединений, выполненных с использованием электродов ПТ-30 на стали 10ГН2МФА в состоянии поставки и после отпуска в течение 60 ч, близки к свойствам основного металла. Кривая I, приведенная на рис. 1 и 2 является нормативной кривой малоциклового усталости. Как следует из представленных данных, все экспериментальные точки в исследованной области температур лежат значительно выше нормативной кривой.

Полученный результат свидетельствует о том, что основной металл и сварные соединения стали 10ГН2МФА, выполненные по разным технологиям, при дополнительной термообработке обладают достаточным уровнем характеристик сопротивления малоциклового усталости.

Исследование влияния времени дополнительной термообработки длительно – стью до 75 ч стали 10ГН2МФА и металла сварных соединений на сопротивление хрупкому разрушению проводилось на компактных образ-

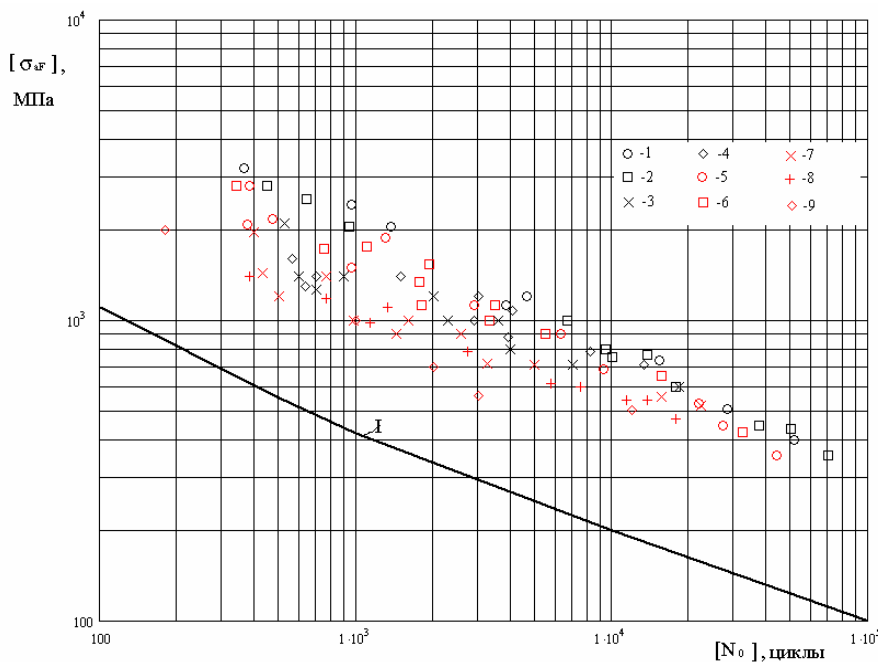


Рис. 1. Расчетная нормативная кривая малоциклового усталости (I) и результаты испытаний при 20 °С стали 10ГН2МФА и сварных соединений после отпуска: 1–4 – основной металл; 5–8 – сварные соединения (электроды ПТ-30); 1, 3, 5, 7 – отпуск 620–660 °С, 8 ч; 2, 4, 6, 8 – 60 ч; 1, 2, 5, 6 – плавка Б; 3, 4, 7, 8 – плавка А; 9 – сварные соединения (электроды УОНИ 13/35), отпуск 620–660 °С, 75 ч

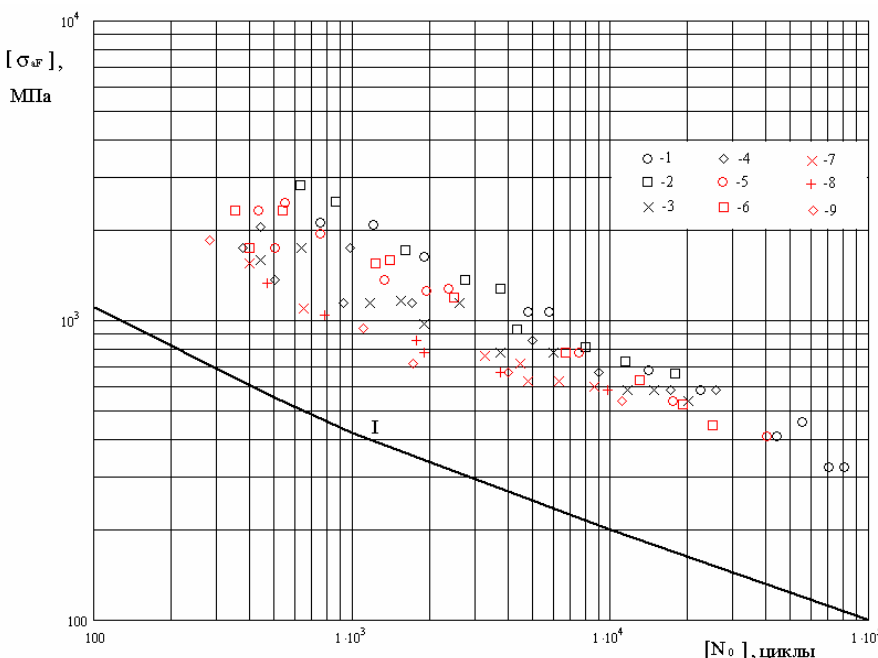


Рис. 2. Расчетная нормативная кривая малоциклового усталости (I) и результаты испытаний при 350 °С стали 10ГН2МФА и сварных соединений после отпуска: 1–4 – основной металл; 5–8 – сварные соединения (электроды ПТ-30); 1, 3, 5, 7 – отпуск 620–660 °С, 8 ч; 2, 4, 6, 8 – 60 ч; 1, 2, 5, 6 – плавка Б; 3, 4, 7, 8 – плавка А; 9 – сварное соединение (электроды УОНИ 13/35), отпуск 620–660 °С, 75 ч

цах внецентренного растяжения, ГОСТ 25.506-85, тип Ш (СТ-1). Образцы были изготовлены из металла шва, зоны термического влияния и основного металла.

При проведении испытаний использовался металл сварных соединений, выполненных электродами УОНИИ-13/55 автоматической сваркой, а также сварных соединений, выполненных электродами ПТ-30 после дополнительной термообработки продолжительностью 75 ч.

Испытания проводили в соответствии с положениями стандарта ГОСТ 25.506-85 и ASTM E 1921-05 [5–6]. Вязкость разрушения металла сварных соединений определялась в интервале температур от плюс 20 до минус 70°С.

На рис. 3 приведены экспериментальные данные, соответствующие значениям вязкости разрушения K_{Ic} (K_{Ic}), полученным по данным обработки результатов испытаний образцов СТ-1 толщиной 25 мм, а также нормативная кривая вязкости разрушения (I) для аварийной ситуации (АС) [4]. Видно, что все точки располагаются выше нормативной кривой.

Таким образом, после отпуска сварных соединений стали 10ГН2МФА при температуре 620–660°С суммарной продолжительностью до 75 ч:

– гарантированные механические свойства стали 10ГН2МФА, ее сварных соединений отвечают требованиям ПНАЭ Г-7-002-86;

– критическая температура хрупкости после отпуска при 650±10°С в течение 30, 45, 60 и 75 ч практически не изменяется и составляет не выше 15°С;

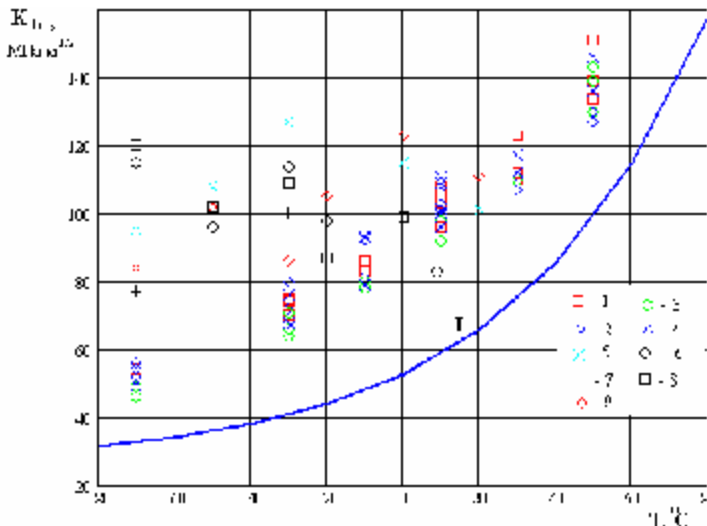


Рис. 3. Зависимость вязкости разрушения стали 10ГН2МФА и металла сварных соединений от температуры (для толщины 25 мм): 1 – основной металл, отпуск 620–660°С, 8 ч; 2 – основной металл, отпуск 620–660°С, 60 ч; 3 – ЗТВ (ПТ-30), отпуск 620–660°С, 8 ч; 4 – ЗТВ (ПТ-30), отпуск 620–660°С, 60 ч; 5 – металл шва (УОНИИ-13/55), отпуск 620–660°С, 75 ч; 6 – металл шва (Св-10ГН1МА+ФЦ-16), отпуск 620–660°С, 75 ч; 7 – ЗТВ (УОНИИ-13/55), отпуск 620–660°С, 75 ч; 8 – ЗТВ (Св-10ГН1МА+ФЦ-16), отпуск 620–660°С, 75 ч; 9 – основной металл, отпуск 620–660°С, 75 ч; I – нормативная кривая вязкости разрушения для аварийной ситуации (АС) при $T_{k0} = 15^\circ\text{C}$

– сопротивление малоциклового усталости основного металла и сварных соединений стали 10ГН2МФА после отпуска в интервале 8–75 ч отвечает требованиям ПНАЭ Г-7-002-86;

– сопротивление хрупкому разрушению металла сварных соединений стали 10ГН2МФА после отпуска в интервале 8–75 ч отвечает требованиям ПНАЭ Г-7-002-86.

Список литературы

1. РТД 2730.300.02-91. Руководящий технологический документ. Оборудование и трубопроводы автономных энергетических установок. Сварка, наплавка, термическая обработка сварных соединений деталей из сталей марок 10ГН2МФА, 10ГН2МФАЛ, 15Х2НМФА и 15Х2НМФА-А.
2. ПН АЭ Г-7-002-86. Норма расчёта на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок.
3. ПН АЭ Г-7-002-86. Оборудование и трубопроводы атомных энергетических установок. Сварные соединения и наплавки. Правила контроля.
4. Руководство по расчёту на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации: РД ЭО 0330-01.
5. ГОСТ 25.506-85. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
6. ASTM E 1921-05. Стандартный метод определения температуры вязко-хрупкого перехода T_0 для сталей в переходной области.

List of literature

1. RTD 2730.300.02-91. Management technological directive. The equipment and pipelines of the nuclear energy installations. Welding, facing, heat treatment of the welded connections of the parts made of steel grade 10GN2MFA, 10GN2MFA L, 15X2NMFA and 15X2NMFA-A.
2. PN AE G-7-002-86. The codes of strength design of the equipment and pipelines in the nuclear energy installations.
3. PN AE G-7-002-86. The equipment and pipelines of the nuclear energy installations. Welded connections and facings. The rules of management.
4. The instruction of strength design of the equipment and pipelines in the reactor facilities RBMK, VVER and EGP at the operation stage.
5. State Standard 25.506-85. Strength design and tests. The methods of mechanical tests of metals. The characteristics of the fracture strength (fracture toughness) at the static loading.
6. ASTM E 1921-05. The standard temperature method of the ductile-brittle transition T_0 for steels in the transition zone.