

## Влияние технологических и эксплуатационных факторов на сопротивление усталости стали марки 10ГН2МФА\*

Б. Т. Тимофеев, Н. А. Васильева

ФГУП ЦНИИ КМ “Прометей”, Санкт-Петербург, Россия

*Приведены результаты испытаний на малоцикловую усталость стали 10ГН2МФА, полученной путем мартеновской выплавки и электрошлакового переплава в воздушной среде и теплоносителе при комнатной и повышенной температурах, а также на циклическую трещиностойкость в высокотемпературной водной среде. Показано, что большое влияние на стадию роста усталостной трещины оказывает метод получения стали.*

**Ключевые слова:** мартеновская выплавка, электрошлаковый переплав, малоцикловая усталость, скорость роста трещины.

**Введение.** Низколегированную сталь марки 10ГН2МФА для изготовления элементов оборудования атомных энергетических установок с реакторами ВВЭР-1000 начали применять в конце 1970 г. Из этой стали изготавливали для более мощных (1000 МВт) энергоустановок корпуса парогенераторов (рис. 1), компенсаторы объема, емкости системы аварийного охлаждения и защиты, коллекторы, трубопроводы главного циркуляционного тракта, сепараторы пара и некоторые другие узлы. В указанных конструкциях сталь использовали в основном в виде поковок или толстолистого проката, она выплавлялась первоначально в мартеновских печах (парогенераторы для первых десяти комплектов АЭС с реакторами ВВЭР-1000).

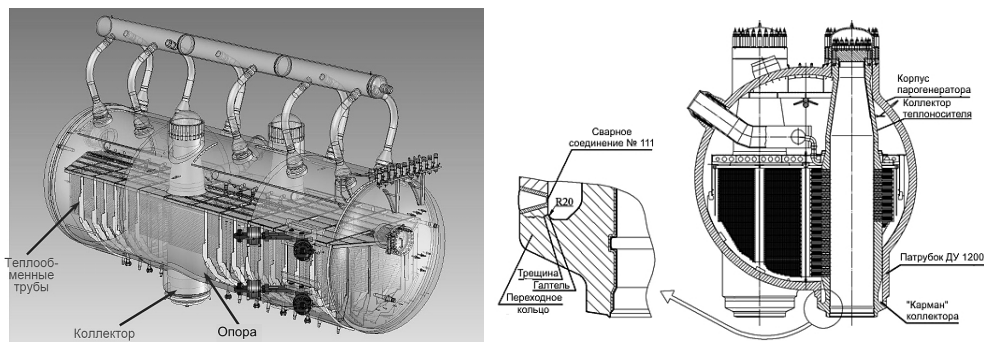


Рис. 1. Корпус парогенератора ПГВ-1000.

Позже для поковок, предназначенных для изготовления коллекторов, начали использовать сталь электрошлакового переплава (ЭШП), а для корпусных конструкций – прокат электродуговой выплавки. Такой переход на более современную технологию позволил значительно повысить качество продукции и, как следствие, исключить возможность повреждений при эксплуатации, что подтверждается статистическим анализом распределения механических свойств при однократном растяжении [1–3], который свидетельствует о преимуществе металла электродуговой выплавки и ЭШП.

\* Доклад на Международной научно-технической конференции “Усталость и термоусталость материалов и элементов конструкций” (Киев, 2013).

**Эксплуатационные повреждения.** В 1987 году после 6–8 тыс. ч эксплуатации были обнаружены первые повреждения на коллекторах парогенераторов Южно-Украинской АЭС в месте завальцовки теплообменных трубок  $\varnothing 16 \times 1,5$  мм из нержавеющей стали в стенку коллектора со стороны второго контура (рис. 2). Для первых комплектов эта операция (завальцовка) выполнялась путем взрыва, что, при незначительных отклонениях от установленной технологии, приводило к образованию концентратора в охрупченном перлитном материале межтрубного пространства из ферритно-перлитной стали (рис. 3).

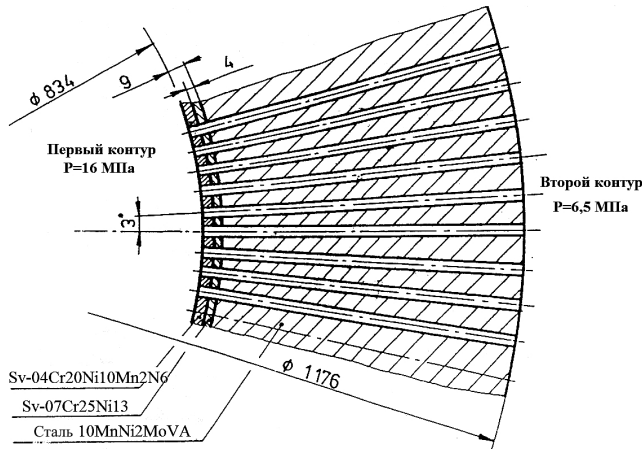


Рис. 2. Инициирование разрушения в коллекторе.

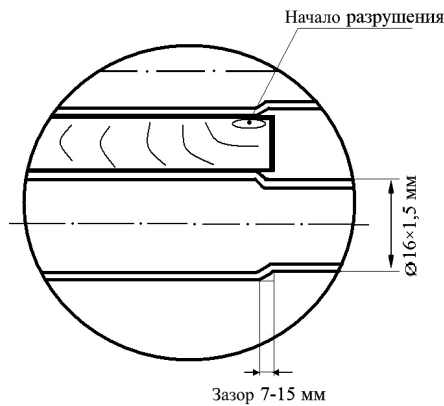


Рис. 3. Место зарождения повреждения в стенке коллектора при эксплуатации.

Примерно через 10 лет (ноябрь 1998 г.) были обнаружены повреждения [4] в области сварного шва приварки горячего коллектора к корпусу первого парогенератора ПГВ-1000 5-го энергоблока Ново-Воронежской АЭС (рис. 4). При осмотре карманов поврежденных коллекторов, после вырезки темплетов, были обнаружены шламы, многочисленные язвы и коррозионные каверны, от которых при эксплуатации зарождались трещины.

**Циклическая прочность стали на стадии зарождения трещины.** При рассмотрении конструкции парогенератора видно, что отдельные его узлы за 60 лет эксплуатации на различных режимах накапливают усталостные повреждения (рис. 1). В отдельных местах суммарная циклическая повреждаемость  $a$  близка к критической. Так, по данным работы [5] на корпусе парогенератора  $a = 0,929$ , в области

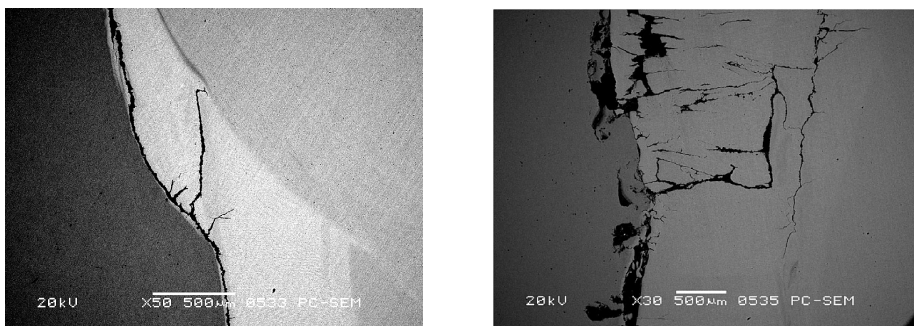


Рис. 4. Коррозионные повреждения парогенератора ПГВ-1000 в области сварного шва № 111.

коллектора со стороны второго контура  $a = 0,383$ . Такая суммарная циклическая повреждаемость и наличие областей разрушения в реальных условиях обуславливают необходимость изучения усталостной прочности стали как на стадии зарождения трещины [4], так и на стадии ее распространения [5]. При этом следует учитывать влияние среды, пластических деформаций, вызванных технологией изготовления, и длительности пребывания конструкции в области повышенных температур 200...350°С, опасных для углеродистых и низколегированных сталей с точки зрения проявления эффекта деформационного старения [6].

Поскольку различие в сопротивлении усталостному разрушению при 20°С для стали, полученной разными методами выплавки, отсутствует (рис. 5), влияние эксплуатационных температур (200...350°С) на эту характеристику материала оценивали только для металла ЭШП (рис. 6).

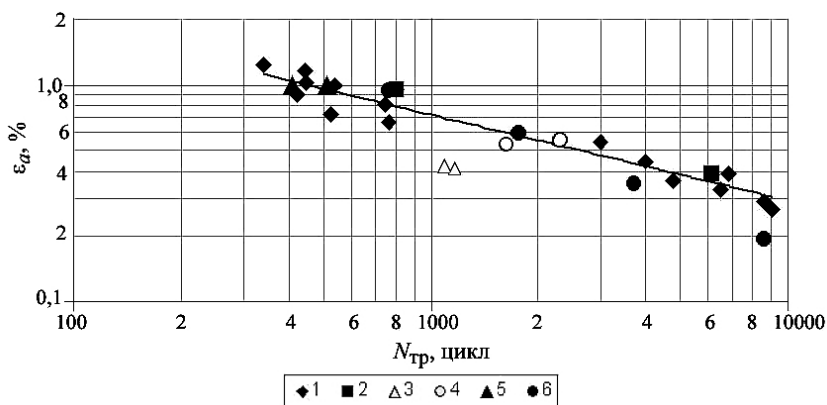


Рис. 5. Сопротивление малоциклового усталости стали 10ГН2МФА при комнатной температуре:  $\blacklozenge$ ,  $\blacksquare$  – поковки из металла ЭШП; остальные точки – листовой прокат мартеновской выплавки.

На рис. 6 представлены кривая усталости, полученная при 20°С, и экспериментальные данные, характеризующие усталостную прочность при повышенных температурах (точки). Так, почти все экспериментальные данные при 350°С расположены ниже кривой усталости. Что касается других результатов по малоциклового усталости этой стали при повышенных температурах, все они расположены вблизи кривой усталости, полученной при комнатной температуре. Следовательно, температура до 350°С практически не оказывает влияния на эту характеристику низколегированной стали [7]. Фактическая температура при эксплуатации коллектора составляет 270...320°С.

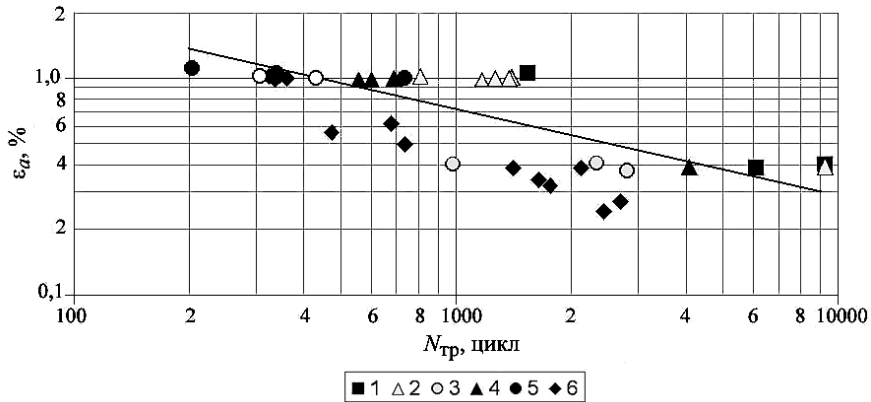


Рис. 6. Сопротивление малоциклового усталости стали 10ГН2МФА-III при повышенных температурах на воздухе: 1 –  $T = 200^{\circ}\text{C}$ ; 2 –  $T = 250^{\circ}\text{C}$ ; 3 –  $T = 275^{\circ}\text{C}$ ; 4 –  $T = 300^{\circ}\text{C}$ ; 5 –  $T = 325^{\circ}\text{C}$ ; 6 –  $T = 350^{\circ}\text{C}$ .

**Коррозионно-усталостная прочность стали.** Эксперименты по оценке влияния теплоносителя (водная среда при температуре  $270^{\circ}\text{C}$ ) на сопротивление малоциклового усталости по критерию разрушения ( $N_f$ ) были выполнены на металле мартеповской выплавки и ЭШП (рис. 7).

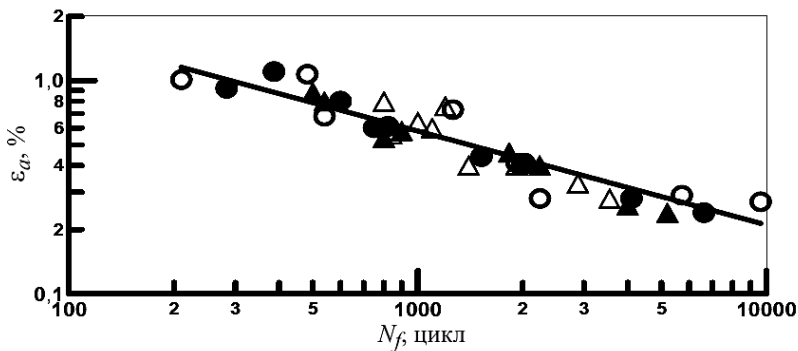


Рис. 7. Сопоставление малоциклового сопротивления стали 10ГН2МФА при испытании на воздухе ( $\Delta$ ,  $\circ$ ) и в среде теплоносителя ( $\blacktriangle$ ,  $\bullet$ ):  $\Delta$ ,  $\blacktriangle$  – мартеповская выплавка;  $\circ$ ,  $\bullet$  – ЭШП.

На стадию зарождения усталостной трещины водная среда практически не влияет, что видно из кривой, представленной на рис. 7. Несколько иная картина наблюдается при оценке влияния водной среды на кинетику усталостной трещины.

Были проведены эксперименты по оценке сопротивления усталостному разрушению стали марки 10ГН2МФА на стадии роста трещины (на воздухе при комнатной ( $20^{\circ}\text{C}$ ) и повышенной ( $275^{\circ}\text{C}$ ) температурах). Эксперимент выполняли на компактных образцах толщиной 25 мм при фиксированном значении асимметрии цикла нагружения ( $R = 0,1$ ) с частотой  $f = 17$  Гц. Скорость роста усталостной трещины в стали 10ГН2МФА при испытании на воздухе при  $R = 0,1$  определяли по уравнению Париса:

при  $20^{\circ}\text{C}$

$$dl/dN = 3,49 \cdot 10^{-12} \Delta K^{2,97};$$

при  $275^{\circ}\text{C}$

$$dl/dN = 1,70 \cdot 10^{-11} \Delta K^{2,56}.$$

Предварительная однократная пластическая деформация до 5% оказывает незначительное влияние на скорость роста усталостной трещины на воздухе при  $R = 0,1$  [8]. Исследование металла поврежденных коллекторов показало, что развитие трещины в металле при эксплуатации носит коррозионно-усталостный характер [4]. Поэтому необходимо было определить скорость роста трещины в среде теплоносителя – в высокотемпературной водной среде. Такие эксперименты проводили для этой марки стали, выплавленной в мартеновской печи (первые коллекторы парогенераторов ПГВ-1000 были изготовлены из этого металла) и после ЭШП (начиная с 1990 г., все последующие коллекторы парогенераторов ПГВ-1000 изготавливали из металла после ЭШП)\*. Серные отпечатки в плоскости разрушения свидетельствуют о том, что их количество для стали мартеновской выплавки и после ЭШП значительно различается. Результаты испытаний стали 10ГН2МФА, полученной различными методами выплавки, на сопротивление развитию усталостной трещины в воде высоких параметров при высоких значениях коэффициента асимметрии  $R = 0,7$  показали, что скорость роста трещины в металле мартеновской выплавки выше, чем после ЭШП, что связано с формой и количеством сернистых включений в металле открытой выплавки (рис. 8). Именно поэтому при изготовлении коллекторов парогенераторов ПГВ-1000 в дальнейшем начали использовать сталь марки 10ГН2МФА после ЭШП.

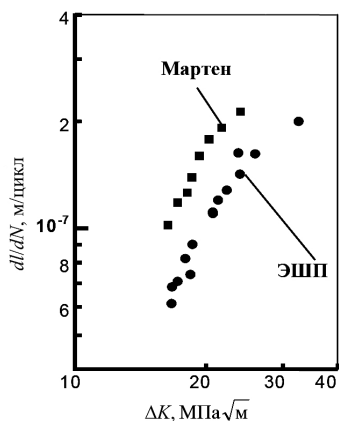


Рис. 8. Влияние метода выплавки стали 10ГН2МФА на скорость роста трещины в высокотемпературной водной среде ( $T = 270^\circ\text{C}$ ,  $R = 0,7$ ,  $f = 17$  Гц).

Состав водной среды оказывает заметное влияние на склонность к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию стали, что неоднократно отмечалось в ряде исследований [9, 10]. В первую очередь это относится к металлу, полученному путем открытой мартеновской выплавки, форма сульфидных неметаллических включений в котором не является округлой в отличие от таковой в металле после ЭШП.

**Заключение.** Установлено, что сопротивление усталостному разрушению низколегированной стали марки 10ГН2МФА может заметно изменяться в зависимости от различных технологических и эксплуатационных факторов. Больше влияние эти факторы оказывают на стадию роста усталостной трещины. Из технологических факторов наиболее чувствителен – метод выплавки стали, из эксплуатационных – коррозионная среда. Исследуемая сталь после ЭШП является более стабильной как при статическом, так и циклическом нагружении. Она не склонна к деформационному старению и коррозионному растрескиванию при испытаниях при низкой скорости деформирования.

\* Экспериментальная часть работы выполнена В. А. Федоровой.

**Резюме**

Наведено результати досліджень на малоциклово втому сталі 10ГН2МФА, що отримана шляхом мартенівської виплавки й електрошлакової переплавки в повітряному середовищі і теплоносії за кімнатної і підвищеної температур, а також на циклічну тріщиностійкість у високотемпературному водному середовищі. Показано, що великий вплив на стадію росту утомної тріщини має метод отримання сталі.

1. *Жеребенков А. С., Тимофеев Б. Т., Чернаенко Т. А.* Статистический анализ уровня свойств и технологической повреждаемости сварных соединений парогенераторов из стали марки 10ГН2МФА // *Вопр. судостроения. Сер. Сварка.* – 1982. – Вып. 33. – С. 30 – 38.
2. *Даунис М. А., Матросова Е. Г., Пименов В. Н. и др.* Усталостная прочность сварных соединений из низколегированной стали // *Там же.* – 1977. – Вып. 24. – С. 3 – 8.
3. *Bazaras Z., Timofeev B., Vasilieva N., and Kersys R.* Mechanical properties of steel 10MnNi2MoVA for NPP units // *Proc. of the 16th Int. Conf. “Mechanika-2011” (April 7–8, 2011, Kaunas).* – Kaunas, 2010. – P. 46 – 49.
4. *Харченко С. А., Сотсков В. В., Лякишев С. Л., Коротяев Н. Ф.* Коррозионное повреждение металла зоны приварки коллектора к корпусу парогенератора ПГВ-1000М. Пути решения проблемы // *Сб. тр. ОАО ОКБ “Гидропресс”.* – 2011. – Вып. 12. – 054.pdf.
5. *Пиминов В. А.* Обоснование прочности и ресурса основного оборудования РУ // *Тр. конф. (март 14–17, 2011, Анкара) // Сб. тр. ОАО ОКБ “Гидропресс”.* – 2011. – Вып. 12. – 015.pdf.
6. *Bazaras Z., Timofeev B., and Vasilieva N.* Low cycle fatigue of welded joints for 10MnNi2MoVa steel // *Proc. the 15th Int. Conf. “Mechanika-2010” (April 8–9, 2010, Kaunas).* – Kaunas, 2010. – P. 50 – 52.
7. *Bazaras Z., Vasilieva N., and Timofeev B.* Degradation of properties for low-alloyed steel type 10MnNi2MoVA at prolonged operation time // *Proc. of the 13th Int. Conf. “Transport Means 2009”.* Technologija. – Kaunas, 2009. – P. 146 – 149.
8. *Bazaras Z., Timofeev B., and Vasilieva N.* Plastic strain effect on fatigue growth crack rate for 10MnNi2MoVA steel // *Proc. of the 5th Int. Conf. ITELMS–2010 (June 3–4, 2010, Panevezys, Lithuania).* – Lithuania, 2010. – P. 18 – 22.
9. *Казанцев А. Г., Зубченко А. С., Григорьев В. А. и др.* Методы прогнозирования влияния состава воды на склонность к замедленному деформационному коррозионному растрескиванию стали 10ГН2МФА // *Вопр. атом. науки и техники.* – 2008. – Вып. 23. – С. 53 – 61.
10. *Karsov G. P., Timofeev B. T., Margolin B. Z., et al.* The investigation of strain and fracture characteristics of the type 10GN2MFA steel as applied to service conditions of steam generator collectors // *Trans. of the Second Int. Conf. on “Materials Science Problems by Production and Operation of NPP Facilities” (June 14–21, 1992, St. Petersburg).* Vol. 1. – St. Petersburg, 1992. – С. 275 – 282.

Поступила 14. 11. 2013