

УДК 620.17

Сопротивление разрушению трубной стали типа 15ХМ при механическом нагружении в условиях воздействия повышенных температур

Кунавин Сергей Алексеевич^(*)

kun-serg@mail.ru

Скоробогатых Владимир Николаевич

vnskorobogatykh@cniitmash.com

Нахабина Мария Сергеевна

msnakhabina@cniitmash.com

Хаймин Сергей Валерьевич

svkhaymin@cniitmash.com

Мельников Алексей Петрович

apmelnikov@cniitmash.com

АО «НПО «ЦНИИТМАШ», Москва, Россия

Аннотация. Проведена экспериментальная оценка сопротивления разрушению при статическом и циклическом нагружении в интервале температур $T = 20\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ основного металла и сварного соединения горячекатаной трубы $219,1 \times 12,5$ мм, изготовленной из стали 15ХМ. Показано, что в диапазоне температур $T = 150\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит возрастание характеристик прочности (временного сопротивления σ_B и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$) и характеристик пластичности по сравнению с комнатной температурой. При всех температурах испытания кривая выносливости основного металла лежит выше кривой усталости сварного соединения. Для всех образцов основного металла и сварного соединения реализуются вязкие механизмы разрушения. Установлено, что все значения разрушающих напряжений располагаются выше значений расчетной кривой выносливости и удовлетворяют требованиям нормативной документации.

Ключевые слова: механические испытания, структура металла, прочность, пластичность, механизмы разрушения, малоцикловая усталость

Resistance of 15XM pipe steel to mechanical stress under elevated temperatures

Kunavin Sergey Alexeevich^(*)

kun-serg@mail.ru

Skorobogatykh Vladimir Nikolaevich

vnskorobogatykh@cniitmash.com

Nakhabina Mariya Sergeevna

msnakhabina@cniitmash.com

Khaymin Sergey Valerievich

svkhaymin@cniitmash.com

Melnikov Aleksey Petrovich

apmelnikov@cniitmash.com

CNIITMASH, Moscow, Russia

Abstract. An experimental assessment of the resistance to destruction under static and cyclic loading in the temperature range of $T = 20\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ for the base metal and the welded joint of a 219.1×12.5 mm hot-rolled pipe made of 15XM steel was conducted. It is shown that in the temperature range $T = 150\text{--}300\text{ }^{\circ}\text{C}$, there is an increase in strength characteristics (temporary resistance σ_B and conditional yield strength $\sigma_{0.2}$) and ductility characteris-

tics (compared with room temperature. At all test temperatures, the endurance curve of the base metal lies above the fatigue curve of the weld. For all base metal and weld samples, viscous fracture mechanisms are implemented. It has been established that all values of destructive stresses are higher than the values of the calculated endurance curve and meet the requirements of regulatory documentation.

Keywords: mechanical tests, metal structure, strength, ductility, fracture mechanisms, low-cycle fatigue

Введение. Стали типа 15ХМ нашли широкое применение в изделиях тепловой энергетики, особенно при производстве трубопроводов энергетического машиностроения [1–5]. Для эффективного использования данной стали для изделий (трубопроводов) атомной энергетики необходимо провести комплексное экспериментальное исследование механических свойств металла труб при различных условиях термомеханического нагружения.

Материалы и методы. В настоящей работе проведены исследования основного металла и сварного соединения горячекатаной трубы диаметром 219,1 мм и толщиной стенки 12,5 мм на цилиндрических образцах (диаметр рабочей части 5–6 мм), вырезанных из обечайки трубы в тангенциальном направлении. Определение механических свойств проводилось на образцах основного металла в двух состояниях: в состоянии поставки и после ускоренного старения, имитирующего термическое воздействие в течение срока службы до 60 лет в условиях одноосного растяжения при температурах 20 и 400 °С. Также ускоренному старению подвергались образцы сварного соединения. Циклические испытания (в области малоциклового нагружения) проводили на сервогидравлической испытательной машине «МаКрон» при знакоположительном цикле изменения нагрузки (отнулевой цикл). Металл трубы имеет феррито-перлитную структуру.

Результаты. Механические испытания образцов исходного основного металла в состоянии поставки показали, что в диапазоне температур $T = 150\text{--}300\text{ °С}$ происходит возрастание значений временного сопротивления σ_B и условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ по сравнению с комнатной температурой, при этом значения прочностных характеристик выше установленных в нормативных документах на 20–60 % в зависимости от температуры испытания (рис. 1).

Характеристики пластичности: относительное удлинение δ_5 и относительное сужение ψ также выше нормативных значений соответственно на 6–38 % (минимальное при $T = 375\text{ °С}$, максимальное при $T = 350\text{ °С}$) и на 35–73 % (минимальное при $T = 375\text{ °С}$, максимальное при $T = 150\text{ °С}$). Значения σ_B для сварного соединения также выше минимальных значений, указанных в нормативных документах на 11–15 %.

Циклические испытания в области малоциклового усталости (МЦУ) при отнулевом цикле изменения синусоидальной нагрузки показали, что с повышением температуры испытания кривая усталости при $T = 400\text{ °С}$ располагается немного выше кривой при $T = 20\text{ °С}$. Для сварного соединения повыше-

ние температуры до $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению сопротивления усталостному разрушению. При всех температурах испытания кривая выносливости основного металла лежит выше кривой усталости сварного соединения.

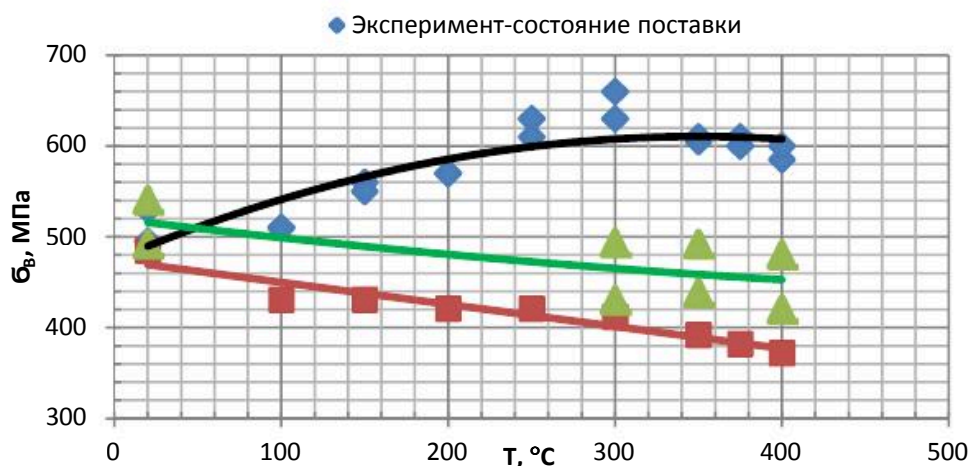


Рис. 1. Зависимость временного сопротивления σ_B от температуры испытания для образцов в состоянии поставки и после ускоренного старения

Для всех образцов основного металла и сварного соединения реализуется один и тот же макромеханизм разрушения (МР) по типу «чашка – конус». На поверхности разрушения образцов обоих вариантов отчетливо выявляется ямочный рельеф, свидетельствующий о вязком характере разрушения.



Рис. 2. Зависимость условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ от температуры испытания для образцов в состоянии поставки и после ускоренного старения

Обсуждение полученных результатов. Из полученных результатов следует, что исследованная трубная сталь марки 15ХМ обладает хорошим сопротивлением механическому нагружению как при статическом, так и при циклическом воздействии механической нагрузки в диапазоне температур $T = 20\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$. Характеристики прочности (временное сопротивление σ_B

и условный предел текучести $\sigma_{0,2}$) возрастают до температуры 250–300 °С. Незначительное снижение значений предела текучести в диапазоне $T = 250$ –400 °С находится в допустимом интервале разброса и существенно превышает нормативные значения.

Важным положительным фактором является постоянство характера вязкого разрушения по типу «конус – ямка», что свидетельствует об однородности структуры данной трубной стали.

Значения ограниченного предела выносливости в области МЦУ во всем диапазоне чисел циклов синусоидальной нагрузки существенно превышают нормативные значения. Также, как и при статическом нагружении, реализуются вязкие механизмы разрушения. Реализуются двух типа вязкого разрушения: квазистатический и смешанный, когда зарождению усталостной трещины предшествует накопление макро и микропластической деформации. При обеих температурах испытания условной границей реализации данных типов разрушения является $N_p \sim 2 \cdot 10^4$ циклов. При $N_p > 2 \cdot 10^4$ реализуется смешанный характер разрушения.

Заключение. Сравнение с обобщенной расчетной кривой выносливости, приведенной в нормативных документах по оценке прочности и ресурса работы материалов атомной энергетики, показало, что все значения механических свойств исследованной трубной стали 15ХМ как в состоянии поставки, так и при ускоренном старении, полученные по результатам статических испытаний, и разрушающие напряжения при циклическом нагружении, где реализуется смешанный и усталостный характер разрушения, располагаются выше значений расчетных нормативных значений. Данная сталь удовлетворяет требованиям нормативной документации атомной энергетики.

Список источников

- [1] Петреня Ю.К. *Физико-механические основы континуальной механики повреждаемости*. Санкт-Петербург, АООТ «НПО ЦКТИ», 1997, 147 с.
- [2] Луценко В.А., Голубенко Т.Н., Луценко О.В. Особенности кинетики распада и структурообразования в хромомолибденованадиевой стали при непрерывном охлаждении от различных температур аустенизации. *Литье и металлургия*, 2016, № 3 (84), с. 1–5.
- [3] Hald J. Microstructure and long-term creep properties of 9–12 % Cr steels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2008, vol. 85, art. no. 3037.
- [4] Гецов Л.Б. *Материалы и прочность деталей газовых турбин*. Рыбинск, ООО «Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2010, 611 с.
- [5] Крыленко А.В. Критериальная оценка деградации структуры теплоустойчивых хромомолибденовых сталей змеевиков трубчатых печей. *Промышленность. Прикладные науки. Материаловедение и металлургия*, 2015, № 3, с. 75–79.