

Некоторые подходы к оценке долговечности теплоустойчивых сталей с учетом повреждаемости металла

Ф. Ф. Гигиняк, П. А. Булах

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Экспериментально обосновано использование экспресс-метода оценки долговечности теплоустойчивых сталей при циклическом нагружении в условиях плоского напряженного состояния с учетом повреждаемости металла.

Ключевые слова: теплоустойчивая сталь, циклическое нагружение, сложное напряженное состояние, коэффициент гомогенности, повреждаемость металла.

Введение. В работах [1–3] показано, что для расчета долговечности при отнулевом нагружении могут быть использованы подходы, которые разработаны для случая статической ползучести, с учетом особенностей, вносимых циклической нагрузкой. Также было установлено, что долговечность материала при статическом длительном нагружении обратно пропорциональна скорости ползучести на стадии установившейся ползучести.

Например, в работе [1] было предложено соотношение, которое позволяет определить взаимосвязь между минимальной скоростью ползучести ($\dot{\varepsilon}_{\min}$), временем до разрушения (τ_f) и пластической деформацией, накопленной к моменту разрушения (ε_f):

$$\dot{\varepsilon}_{\min} \tau_f = 0,4 \varepsilon_f, \quad (1)$$

а в [2] – деформационно-кинетический критерий для расчета долговечности в условиях циклической ползучести:

$$N_f \dot{\varepsilon}_{\min} = \xi \varepsilon_f, \quad (2)$$

где ξ – приведенная скорость установившейся ползучести.

Дальнейшие исследования показали [4], что в области квазистатического разрушения пластичность при двухосном циклическом нагружении и скорость накопления пластических деформаций на установившемся участке ползучести существенно зависят от вида напряженного состояния. Это позволило предложить расчетное соотношение, аналогичное (2):

$$N_b \dot{\varepsilon}_{i \min} = C'_i, \quad (3)$$

где $C'_i = \xi_i \varepsilon_{ib}$ – константа для заданного вида напряженного состояния, которая характеризует продолжительность развития потери устойчивости пластического деформирования и оценивается величиной деформации, накопленной в условиях равновесного развития двух конкурирующих процессов: деформационного упрочнения материала и снижения несущей способности объекта испытаний (образца) в связи с изменениями его геометрических параметров; ε_{ib} – интенсивность пластических деформаций, накопленных к моменту разрушения; ξ_i – приведенная интенсивность скорости установившейся ползучести.

Однако, чтобы получить исходные данные для расчета по критерию (3), необходимо проводить достаточно сложные эксперименты с применением специального испытательного оборудования.

Как показали результаты проведенных ранее [5] исследований повреждаемости стали 10ГН2МФА при циклическом нагружении, для расчета долговечности сталей такого класса может быть использован деформационно-кинетический критерий, основанный на уравнении (3).

Так, авторами была получена расчетная зависимость для оценки долговечности металла высоконагруженных элементов конструкций с учетом повреждаемости, в которой используется взаимосвязь между величиной относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$, инвариантного к виду напряженного состояния в исследованном диапазоне соотношений главных напряжений, и скоростью циклической ползучести [6]:

$$N_b = C_i' \frac{m_{отн}^d}{c}, \quad (4)$$

где $m_{отн}$ – значение относительного коэффициента гомогенности, рассчитанное по методике [7], $m_{отн} = m_i / m_{исх}$; m_i – текущее значение коэффициента гомогенности, рассчитанное по результатам замеров твердости металла образца после текущего блока циклического нагружения при заданном уровне нагрузки; $m_{исх}$ – значение коэффициента гомогенности, полученное по результатам замеров твердости металла образца в исходном состоянии; c и d – параметры материала, определяемые экспериментально.

Целью настоящего исследования является экспериментальное обоснование применимости критерия вида (4) к расчету долговечности стали 15Х2МФА.

Методика эксперимента. Испытания проводились на тонкостенных трубчатых образцах в условиях плоского напряженного состояния по методике, описанной ранее [7]. В процессе эксперимента было реализовано пульсирующие одно- ($K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$) и двухосное ($K = 2; 1; 0,5$) растяжение. Температура испытаний составляла $T = 20^\circ\text{C}$. Кинетика накопления повреждаемости металла оценивалась с помощью метода ЛМ-твердости [8]. Циклическое нагружение осуществлялось по трапециевидному циклу с частотой 2 цикл/мин и выдержкой в течение 4 с при максимальном значении интенсивности напряжений цикла. При этом скорость изменения усилий была постоянной.

Результаты исследований и их обсуждение. Для оценки сопротивления сталей циклическому деформированию в условиях сложного напряженного состояния использовались кривые циклической ползучести, полученные в [4]. Зависимости интенсивности скоростей циклической ползучести стали 15Х2МФА от величины максимальных напряжений цикла при различных соотношениях главных напряжений представлены на рис. 1. Видно, что наложение второй растягивающей компоненты напряжений приводит к повышению скорости циклической ползучести по сравнению с таковой в условиях циклического одноосного растяжения при одинаковых уровнях максимальной интенсивности напряжений цикла.

Если оценивать влияние вида напряженного состояния на кинетику накопления повреждений, необходимо отметить, что на стадии установившейся ползучести значения относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ для исследованной стали укладываются в одной области для всех реализованных соотношений главных напряжений [9].

Вместе с тем при переходе к потере устойчивости процесса деформирования как для исследованной стали, так и для стали 10ГН2МФА [6] наблюдается влияние вида напряженного состояния на кинетику повреждаемости металла.

Анализ вышеприведенных результатов позволяет определить предельные значения относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$, соответствующие потере устойчивости процесса накопления деформации ползучести в условиях одно- и двухосного растяжения [9].

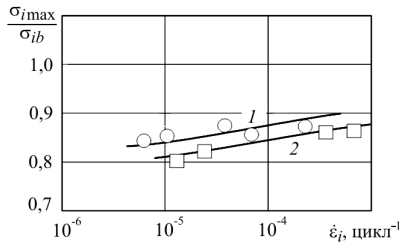


Рис. 1. Кривые интенсивности скоростей циклической ползучести стали 15X2МФА при 20°C и разных видах нагружения: 1, 2 – одно- и двухосное растяжение соответственно ($\sigma_{i\max}$ – максимальная интенсивность напряжений цикла на ступени нагружения, завершающейся разрушением образца; σ_{ib} – интенсивность напряжений, соответствующих разрушению образца при однократном нагружении).

Для стали 15X2МФА на основе результатов испытаний в условиях ступенчатого и непрерывного циклического нагружения при всех исследованных соотношениях главных напряжений установлена взаимосвязь между скоростью циклической ползучести и повреждаемостью металла. На рис. 2 представлены данные для стали 15X2МФА, которые во многом подобны таким зависимостям для стали 10ГН2МФА [6] и подтверждают эту взаимосвязь.

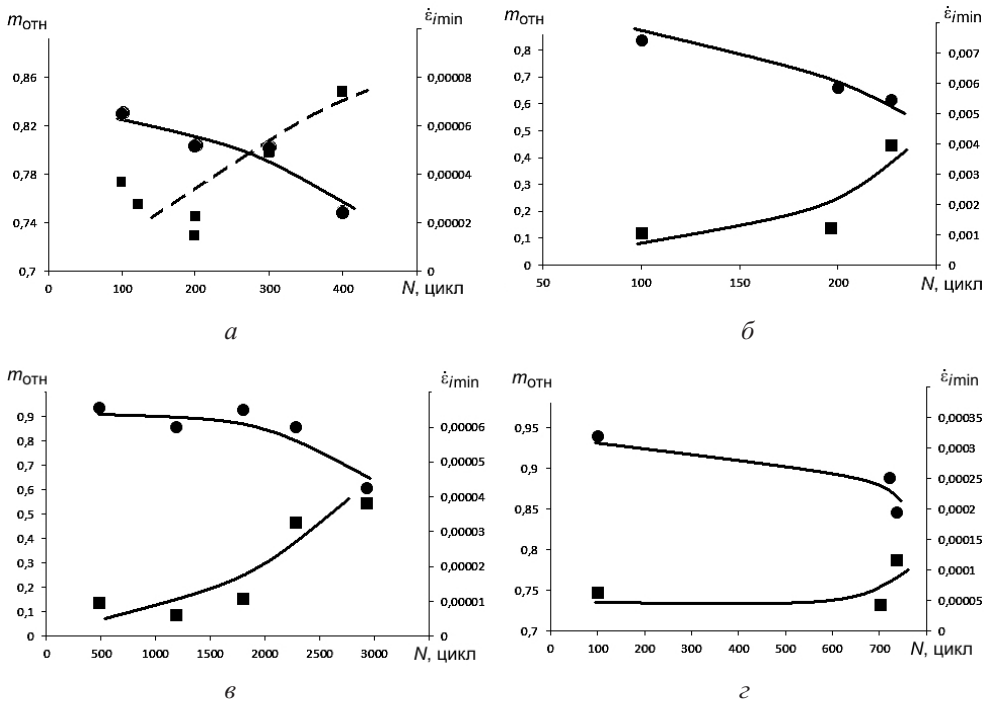


Рис. 2. Характер изменения относительного коэффициента однородности $m_{отн}$ (●) и интенсивности скоростей установившейся циклической ползучести $\dot{\epsilon}_{i\min}$ (■) в зависимости от наработки при различных видах напряженного состояния ($a - K = 2$; $б - K = \infty$; $в - K = 1$; $г - K = 0,5$) в условиях ступенчатого циклического нагружения стали 15X2МФА с частотой 2 цикл/мин.

Взаимосвязь между коэффициентом однородности и скоростью циклической ползучести, на которую определенным образом оказывают влияние структурные изменения стали 15X2МФА, что отмечалось ранее [5, 6], свидетельствует об их физически

обоснованной корреляции. Исходя из анализа результатов экспериментальных исследований при различных видах напряженного состояния (рис. 3) приходим к выводу, что на стадии достижения равновесного состояния материала взаимосвязь между указанными параметрами этой стали для всех исследованных соотношений главных напряжений удовлетворительно описывается степенной функцией вида

$$\dot{\epsilon}_i = cm_{\text{отн}}^{-d}, \quad (5)$$

где коэффициент гомогенности $m_{\text{отн}}$ с определенной степенью достоверности можно принять инвариантным к виду напряженного состояния (для исследуемой стали $c = 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$, $d = 5,1$).

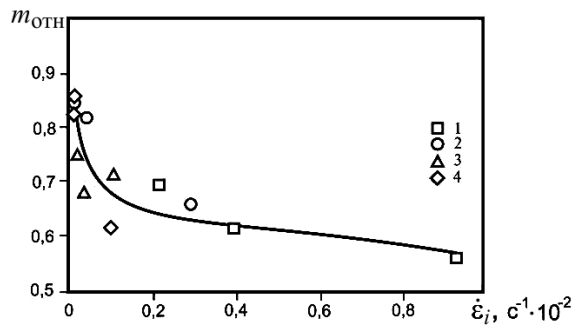


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента гомогенности стали 15Х2МФА от интенсивности скоростей циклической ползучести при различных соотношениях главных напряжений: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 0,5$; 3 – $K = 2$; 4 – $K = 1$.

Таким образом, с использованием полученных параметров c и d (4) можно рассчитать долговечность стали 15Х2МФА.

Представленные выше результаты экспериментальных исследований позволили с помощью уравнения вида (4) рассчитать долговечность стали при различных соотношениях главных напряжений на основе данных оценки повреждаемости металла в условиях одноосного циклического растяжения.

На рис. 4 приведены данные сравнения расчетных значений долговечности исследованных теплоустойчивых сталей с полученными экспериментально и ранее [6] при непрерывном циклическом нагружении.

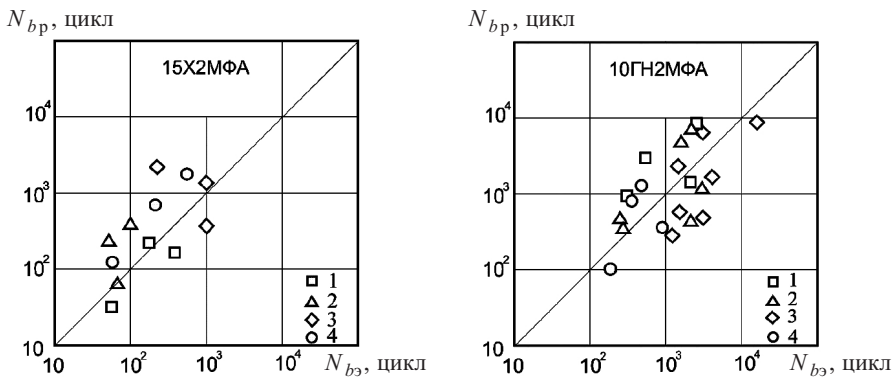


Рис. 4. Сравнение экспериментальных значений долговечности теплоустойчивых сталей с расчетными при различных соотношениях главных напряжений: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 2$; 3 – $K = 1$; 4 – $K = 0,5$.

Заключение. Предложенный метод оценки долговечности материала позволяет на основе ограниченного объема простых базовых опытов в условиях пульсирующего одноосного растяжения рассчитать долговечность материала для различных видов напряженного состояния с учетом повреждаемости в диапазоне соотношений главных напряжений $K = \infty \dots 0$ при циклическом нагружении с отнулевым циклом, когда реализуется квазистатическое разрушение. Этот подход может быть использован как экспресс-метод оценки состояния материала высоконагруженных элементов конструкций в процессе их эксплуатации.

Резюме

Експериментально обґрунтовано використання експрес-методу оцінки довговічності теплостійких сталей при циклічному навантаженні в умовах плоского напруженого стану з урахуванням пошкоджуваності металу.

1. *Machlin E. S.* Creep-rupture by vacancy condensation // *J. Met.* – 1956. – 8, No. 2. – P. 102–111.
2. *Стрижало В. А.* Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. – Киев: Наук. думка, 1978. – 238 с.
3. *Гигиняк Ф. Ф., Лебедев А. А., Баишта В. В. и др.* Вязкопластические свойства стали 10ГН2МФА при сложном напряженном состоянии // *Пробл. прочности.* – 1994. – № 4. – С. 30–35.
4. *Гігіняк Ф. Ф., Лебедев А. А., Шкодзінський О. К.* Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.
5. *Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А.* Прогнозирование долговечности теплоустойчивой стали 10ГН2МФА с учетом повреждаемости металла при пульсирующем растяжении в условиях сложного напряженного состояния // *Пробл. прочности.* – 2012. – № 5. – С. 98–104.
6. *Гігіняк Ф. Ф., Булах П. О.* Оцінка довговічності сталі 10ГН2МФА із врахуванням пошкоджуваності металу в умовах складного напруженого стану // *Вісн. Терн. нац. техн. ун-ту імені Івана Пулюя.* – 2011. – 16, № 3. – С. 13–20.
7. *Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровская Т. Н.* Кинетика накопления поврежденных теплоустойчивых сталей при различных режимах нагружения // *Пробл. прочности.* – 2010. – № 1. – С. 120–126.
8. *Пат. України № 52107А.* Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “Метод ЛМ-твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Чинний з 15.01.03, Бюл. № 1.
9. *Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А.* Повреждаемость теплоустойчивых сталей с учетом условий, имитирующих работу энергетического оборудования // *Пробл. прочности.* – 2014. – № 5. – С. 61–68.

Поступила 17. 04. 2014