

Прогнозирование долговечности теплоустойчивой стали 10ГН2МФА с учетом повреждаемости металла при пульсирующем растяжении в условиях сложного напряженного состояния

Ф. Ф. Гигиняк, П. А. Булах

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

На основе анализа результатов проведенных исследований предложен расчетно-экспериментальный метод оценки долговечности конструкционных материалов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния с учетом поврежденности металла.

Ключевые слова: расчетно-экспериментальный метод, конструкционный материал, циклическое нагружение, поврежденность металла.

Введение. Известны различные критерии оценки долговечности металла конструкций, использование которых обусловлено режимом нагружения. Общим для критериев является установление определяющих зависимостей между характеристиками статического и циклического деформирования. Однако в большей части из них не учитывается влияние вида напряженного состояния и повреждаемость металла. Поэтому разработка эффективной методики оценки несущей способности и долговечности конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния с учетом повреждаемости металла на основе совместного анализа и обобщений исследований закономерностей процессов деформирования и кинетики накопления повреждений является актуальной.

Ранее [1, 2] показано, что для процесса циклической ползучести характерны закономерности, наблюдаемые при статическом нагружении. Таким образом, проведенные в соответствии с методикой, подробно описанной в [2], испытания при ступенчатом статическом и циклическом нагружении позволяют определить стандартные прочностные и деформационные характеристики стали 10ГН2МФА, деформации, накопленные при ползучести, а также условие перехода от усталостного разрушения к квазистатическому. Проанализировав кинетику процессов повреждаемости в условиях ползучести и определив с учетом этого неравновесные напряжения σ_i^* [3] для выбранного режима нагружения, можно аналитически описать ползучесть. Как и для других конструкционных материалов [2, 4] можно усовершенствовать критерий оценки долговечности, который основан на условии потери устойчивости процесса деформирования с учетом вида напряженного состояния:

$$N_b \dot{\epsilon}_{i \min} = C'_i, \quad (1)$$

где N_b – число циклов нагружения, соответствующее потере устойчивости процесса деформирования; $\dot{\epsilon}_{i \min}$ – минимальная скорость циклической ползу-

чести; C'_i – параметр, в общем случае зависящий от деформационных свойств материала и вида напряженного состояния и не зависящий от уровня напряжений цикла при фиксированном соотношении главных напряжений [2].

Из (1) следует, что C'_i можно трактовать как деформацию ползучести, накопленную за время (число циклов) наработки N_b при скорости ползучести $\dot{\varepsilon}_{i \min}$.

Методика испытаний и анализ полученных данных. Развитие процессов деформирования и кинетики накопления повреждений исследовали при комнатной температуре в условиях ступенчатого циклического и непрерывного циклического нагружений при сложном напряженном состоянии по описанной ранее [5–7] методике.

Испытания проводили на тонкостенных трубчатых образцах ($D_n/\delta = 50$, где D_n – наружный диаметр образца; δ – толщина стенки образца) в условиях мягкого нагружения осевой силой и внутренним давлением в различном соотношении на испытательном модернизированном стенде СНТ-8У [1, 5]. В эксперименте было реализовано циклическое одноосное ($K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$), равномерное ($K = 1$) и неравномерное ($K = 0,5; 2$) двухосное нагружения по трапециевидному циклу с частотой 2 цикл/мин и выдержкой при максимальной нагрузке 4 с. При этом температура испытаний составляет 20°C.

Ступенчатое циклическое нагружение продолжали до достижения равновесного состояния с переходом после разгрузки на следующую ступень с более высоким уровнем максимальной интенсивности напряжений цикла.

Для определения степени повреждаемости исследуемого материала использовали метод ЛМ-твердости [7], в котором в качестве параметра повреждаемости принята относительная величина коэффициента гомогенности $m_{\text{отн}}$ [5]:

$$m_{\text{отн}} = m_i/m_{\text{исх}},$$

где m_i – текущее значение коэффициента гомогенности, рассчитанное по результатам замеров твердости металла образца после текущего блока циклического нагружения при заданном уровне нагрузки; $m_{\text{исх}}$ – значение коэффициента гомогенности, полученное по результатам замеров твердости металла образца в исходном состоянии.

Твердость стали измеряли по окружности рабочей части образца ($l = 20$ мм) после каждой ступени циклического нагружения портативным твердомером ERNST (Швейцария), снабженным автоматической системой обработки опытных данных, что позволяет исключить субъективные ошибки оператора. На этой поверхности в процессе нагружения замеряли продольную и поперечную деформации. При непрерывном циклическом нагружении твердость измеряли после определенного числа циклов нагружения.

С помощью модернизированной упруговязкопластической (УВП) модели [3], согласно которой при равновесном напряженно-деформированном состоянии металла коэффициент гомогенности $m_{\text{отн}}$ инвариантен к виду напряженного состояния (в диапазоне соотношений главных напряжений $K = 0 \dots \infty$) в условиях пульсирующего нагружения, минимальную скорость циклической ползучести при различных видах напряженного состояния можно рассчитать по уравнению [3]

$$\dot{\varepsilon}_i = cm_{\text{отн}}^{-d}, \quad (2)$$

где c и d – параметры материала, определяемые экспериментально на основании зависимости $\dot{\varepsilon}_i - m_{\text{отн}}$. Для исследуемого материала имеем $c = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, $d = 4,2$. При расчетах достаточно располагать значениями коэффициента гомогенности m , полученными из эксперимента при ступенчатом циклическом одноосном растяжении в условиях равновесного напряженно-деформированного состояния.

Как и ранее [2], полагаем, что стадия минимальной (установившейся) ползучести для случая квазистатического разрушения определяется условием самокомпенсации снижения несущей способности объекта исследования (образца) в связи с деформированием за счет деформационного упрочнения металла. Это позволяет утверждать, что значения параметра C'_i в уравнении (1) для разных видов напряженного состояния будут коррелировать с величинами C_i , определенными при однократном нагружении согласно условию потери устойчивости пластического деформирования. Указанное допущение подтверждено экспериментально для ряда конструкционных материалов [2, 4] и для исследуемой стали.

Для оценки долговечности исследованной стали при циклическом нагружении в условиях различных напряженных состояний параметр C'_i рассчитывали на основе экспериментальных данных, полученных при пульсирующем ступенчатом одноосном растяжении, с использованием системы уравнений, в которой учитывается потеря устойчивости деформирования [2].

Преобразуя уравнение (1) с помощью зависимости (2), получаем расчетное уравнение для оценки долговечности металла высоконагруженных элементов конструкций с учетом повреждаемости:

$$N_b = C'_i \frac{m_{\text{отн}}^d}{c}. \quad (3)$$

Изложенные выше рассуждения справедливы для области устойчивого пластического деформирования.

Сравнение расчетных значений долговечности (3) с экспериментальными, полученными при непрерывном пульсирующем нагружении с различными соотношениями главных нормальных напряжений, свидетельствует об удовлетворительном (в первом приближении) их совпадении (рис. 1).

Следовательно, соотношение вида (3) можно использовать в инженерных расчетах для предварительной экспресс-оценки долговечности металла с учетом повреждаемости высоконагруженных элементов конструкций, подвергающихся воздействию циклических нагрузок в условиях сложного напряженного состояния.

Более физически обоснованная оценка долговечности исследованной стали с учетом повреждаемости может быть выполнена с использованием расчетной зависимости, которая аналогична предложенной ранее [2] для других теплоустойчивых сталей. С помощью усовершенствованной УВП

модели [3], позволяющей учитывать повреждаемость металла, можно уточнить исходные параметры указанной выше зависимости вида

$$N_b = \frac{C'_i}{a(\sigma_{i\max} - \sigma_{in})^{b+1}}, \quad (4)$$

где a и b – константы материала, определяемые из опытов при ступенчатом циклическом одноосном растяжении или на основе двух опытов на циклическую ползучесть при непрерывном одноосном растяжении; $\sigma_{i\max}$ – максимальная интенсивность напряжений цикла, где под интенсивностью напряжений следует понимать величину, пропорциональную второму инварианту девиатора напряжений; σ_{in} – интенсивность напряжения перехода от усталостного разрушения к квазистатическому.

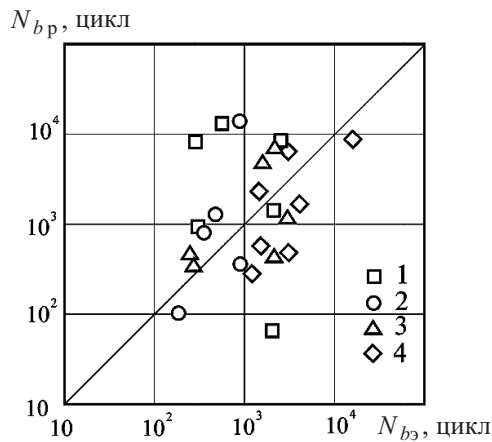


Рис. 1. Сопоставление экспериментальных и расчетных (3) величин долговечности стали 10ГН2МФА при различных соотношениях главных напряжений: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 0,5$; 3 – $K = 2$; 4 – $K = 1$.

Следует отметить, что область применения критериев (1) и (4) ограничена напряжением перехода σ_{in} [8]. Настоящие результаты, как и полученные ранее [2], показывают, что изменение механизма разрушения обусловлено устойчивостью процесса пластического деформирования, а уровни напряжений перехода зависят от вида напряженного состояния и могут быть рассчитаны для любого соотношения главных напряжений K ($K = 0 \dots \infty$) из условия потери устойчивости деформирования [2]. При этом уравнение обобщенной кривой деформирования заменяется уравнением квазистатической кривой [3]. Необходимые для расчетов данные определяются на основе кривых малоциклового усталости при двух наиболее легко реализуемых в условиях циклического нагружения опытах – одноосное пульсирующее растяжение и пульсирующее внутреннее давление. Поскольку при σ_{in} возможно достижение равновесного напряженно-деформированного состояния, заключаем, что минимальное неравновесное напряжение, обуславливающее минимальную скорость $\dot{\epsilon}_{i\min}$ циклической ползучести при реализации квазистатического разрушения, будет $\sigma_i^* = \sigma_{i\max} - \sigma_{in}$.

Ниже представлены расчетные значения интенсивности напряжений перехода для реализованных соотношений главных напряжений исследованной стали, определенные на основе экспериментальных данных при ступенчатом циклическом растяжении, $T = 20^\circ\text{C}$: при $K = \infty; 2; 1; 0,5$ соответственно имеем $\sigma_{ип} = 603; 550; 635; 657$ МПа.

На рис. 2 представлены построенные по различным критериям предельные диаграммы напряжений перехода.

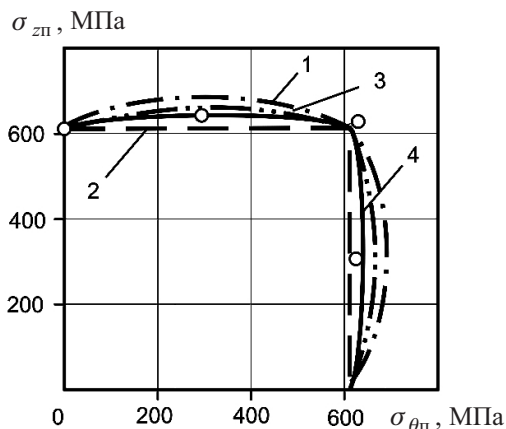


Рис. 2. Напряжения перехода от усталостного к квазистатическому разрушению стали 10ГН2МФА. (Точки – экспериментальные результаты, линии – расчетные предельные поверхности: 1 – по условию Мизеса; 2 – по условию Треска; 3 – по условию Писаренко–Лебедева; 4 – по обобщенному условию [2].)

Подробно рассмотренные ранее [1] характеристики квазивязких свойств стали также подтверждены проведенными исследованиями, установившими их взаимосвязь с параметрами повреждаемости металла [3].

Таким образом, для описания ползучести с учетом динамических эффектов начального деформирования при циклическом нагружении и повреждаемости металла необходимо получить квазистатическую (равновесную) диаграмму при ступенчатом циклическом одноосном растяжении, неравновесные напряжения σ_i^* и значения коэффициента вязкости стали k'_i (параметра, инвариантного к виду напряженного состояния), определяемые по методике, подробно изложенной в [2]:

$$k'_i = a(\sigma_i^*)^b. \quad (5)$$

При этом необходимо учитывать взаимосвязь неравновесных напряжений с $m_{отн}$ [3] в виде

$$\sigma_{ип}^* = gm_{отн}^{-h}, \quad (6)$$

где g и h – константы материала, определяемые экспериментально на основе зависимости $\sigma_{ип}^* - m_{отн}$ [3], $g = 0,95$ МПа, $h = 2,4$; $\sigma_{ип}^*$ – приведенное неравновесное напряжение, рассчитываемое согласно [3] на основе экспериментально определенных значений коэффициента гомогенности $m_{отн}$.

Тогда зависимость коэффициента вязкости стали от приведенных равновесных напряжений будет

$$k'_i = a_{\text{пр}} (\sigma_{\text{ипр}}^*)^{b_{\text{пр}}}, \quad (7)$$

где $a_{\text{пр}}$, $b_{\text{пр}}$ – константы материала, определенные из двух экспериментов при циклическом одноосном растяжении в условиях заданной температуры на основе зависимости $k'_i - \sigma_{\text{ипр}}^*$, $a_{\text{пр}} = 0,00025 \text{ \%}/(\text{цикл} \cdot \text{МПа})$, $b_{\text{пр}} = 0,5$.

Преобразовать уравнение (4) с учетом повреждаемости металла можно с помощью экспериментально обоснованной [3] для исследованной стали зависимости между коэффициентом вязкости k'_i и расчетным значением $\sigma_{\text{ипр}}^*$ (7):

$$N_b = \frac{C'_i}{a_{\text{пр}} (\sigma_{i \max} - \sigma_{\text{ип}})^{b_{\text{пр}}+1}}. \quad (8)$$

Сравнение рассчитанных по (8) значений долговечности исследуемой стали с данными экспериментов при непрерывном циклическом нагружении свидетельствует об удовлетворительном их совпадении (рис. 3).

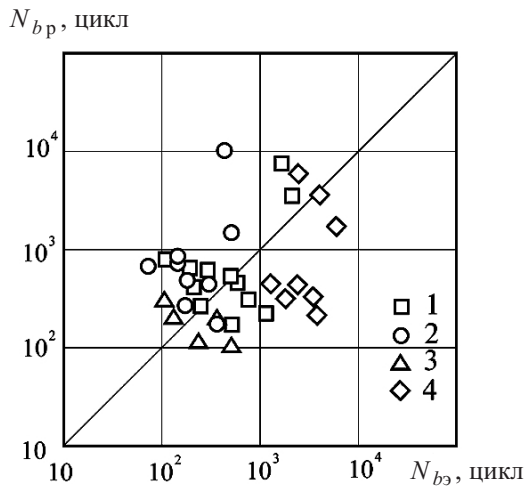


Рис. 3. Сопоставление экспериментальных величин долговечности стали 10ГН2МФА с расчетными при различных соотношениях главных напряжений. (Обозначения те же, что и на рис. 1.)

Заключение. Выполнены многочисленные экспериментальные исследования по оценке долговечности стали 10ГН2МФА с учетом ее повреждаемости с помощью метода LM-твёрдости при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния. Предложены варианты критерия, позволяющие рассчитать долговечность конструктивных элементов стали с учетом повреждаемости при сложном напряженном состоянии в условиях циклического мягкого нагружения, завершающегося квазистатическим разрушением, на основе результатов ограниченного объема относительно простых базовых экспериментов.

Результаты выполненных исследований весьма актуальны в связи с развитием работ по оценке продления сроков эксплуатации основного оборудования АЭС Украины.

Резюме

На основі аналізу результатів проведених досліджень запропоновано розрахунково-експериментальний метод оцінки довговічності металічних матеріалів при циклічному навантаженні в умовах складного напруженого стану з урахуванням пошкоджуваності металу.

1. 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.
2. Гигиняк Ф. Ф., Лебедев А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.
3. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А. Усовершенствование упруговязкопластической модели деформирования с учетом повреждаемости металла при циклическом нагружении // Пробл. прочности. – 2012. – № 4. – С. 58 – 66.
4. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровская Т. Н. К оценке долговечности высокопрочных материалов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – 2009. – № 2. – С. 139 – 143.
5. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровская Т. Н. Кинетика накопления повреждений теплоустойчивых сталей при различных режимах нагружения // Там же. – 2010. – № 1. – С. 120 – 126.
6. Булах П. А. Исследование развития процесса накопления повреждений металла при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – 2011. – № 2. – С. 122 – 127.
7. 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.
8. Стрижало В. А. Исследование закономерностей перехода от квазистатического к усталостному разрушению легких сплавов при малоцикловоом нагружении // Пробл. прочности. – 1974. – № 5. – С. 42 – 43.

Поступила 17. 10. 2011