

Повреждаемость теплоустойчивых сталей с учетом условий, имитирующих работу энергетического оборудования*

Ф. Ф. Гигиняк, П. А. Булах

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

Представлены результаты исследования кинетики накопления повреждений и закономерностей деформирования теплоустойчивых сталей 10ГН2МФА и 15Х2МФА при различных режимах нагружения в условиях сложного напряженного состояния.

Ключевые слова: циклическая ползучесть, повреждаемость, теплоустойчивые стали, коэффициент гомогенности, деформация ползучести, сложное напряженное состояние.

Введение. Развитие методов оценки долговечности высоконагруженных элементов конструкций, работающих в сложных условиях малоциклового нагружения, предполагает использование экспериментально установленных закономерностей деформирования и разрушения материалов с учетом влияния основных эксплуатационных факторов, таких как вид напряженного состояния, температура, способ нагружения и повреждаемость материала в процессе эксплуатации.

В настоящее время исследования по оценке несущей способности и долговечности конструкций с учетом текущего состояния конструкционных материалов базируются на сравнительно большом объеме теоретических разработок, в основу которых положены гипотетические предпосылки о свойствах материалов без учета их текущего состояния и реальных условий эксплуатации. Разработка методов определения остаточного ресурса машин и конструкций, большинство из которых работает при циклическом нагружении, представляется актуальной задачей.

Исходя из обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку феноменологических основ для расчета на прочность и долговечность с учетом эксплуатационных факторов высоконагруженных элементов конструкций энергетического оборудования, предлагаются пути развития методов оценки текущего состояния металла в процессе наработки.

В настоящем сообщении представлены полученные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины некоторые результаты экспериментальных исследований перлитных сталей 15Х2МФА и 10ГН2МФА при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния в диапазоне температур 20...350°C и их повреждаемости с учетом вида напряженного состояния.

Методика испытаний. При испытаниях в условиях сложного напряженного состояния использовали тонкостенные трубчатые образцы ($D_n/\delta = 50$). Установка для испытаний и методика их проведения подробно описаны ранее [1]. В ходе испытания на трубчатых образцах было реализовано пульсирующие одно- ($K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$) и двухосное ($K = 2; 1; 0,5$) растяжение. Регистрация повреждаемости с помощью метода ЛМ-твердости [2] позволила изучить кинетику накопления повреждений при изотермическом малоцикловом нагружении в условиях линейного и плоского напряженного состояния.

В качестве рабочей среды для создания внутреннего давления в образце использовали жидкость АМГ-10. Нагружение осуществлялось по трапециевидному циклу с

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

частотой 2 цикл/мин и выдержкой 4 с при максимальном значении интенсивности напряжений цикла. Максимальные напряжения цикла (максимальная интенсивность напряжений цикла) $\sigma_{i \max}$ задавали такими, чтобы обеспечить долговечность, не превышающую $2 \cdot 10^4$ цикл. Это соответствует интервалу значений $\sigma_{i \max}$ от $0,8\sigma_{ib}$ и выше (σ_{ib} – интенсивность напряжений, отвечающая разрушению образца в условиях однократного нагружения при определенных соотношениях главных напряжений и уровне температуры). Число циклов нагружения, равное 0,5, соответствует однократному нагружению при $\sigma_{i \max} = \sigma_{ib}$. Испытания стали 15Х2МФА при пульсирующем растяжении в условиях сложного напряженного состояния проводили при температуре 20, 270, 350°C, стали 10ГН2МФА – при 20, 285, 320°C, что соответствовало реальным температурным режимам эксплуатации энергетического оборудования АЭС. Циклическое нагружение осуществлялось с постоянной скоростью изменения усилий.

В настоящем исследовании в качестве прочностных и деформационных характеристик испытываемых сталей при циклическом нагружении использовали интенсивность напряжений σ_i и интенсивность деформаций ϵ_i .

Результаты исследований и их обсуждение. Анализ кривых ползучести исследованных сталей при одноосном и неравномерном двухосном пульсирующем растяжении при комнатной и повышенной температуре показывает, что вид напряженного состояния существенно влияет на их характер [3]. В частности, при двухосном пульсирующем растяжении несколько сокращаются участки установившейся ползучести по сравнению с таковыми при одноосном.

Кривые циклической ползучести использовали для оценки сопротивления циклическому деформированию сталей в условиях сложного напряженного состояния. Зависимости интенсивности скоростей циклической ползучести от величины максимальных напряжений цикла при различных соотношениях главных напряжений для стали 10ГН2МФА аналогичны полученным ранее [3] для стали 15Х2МФА (рис. 1).

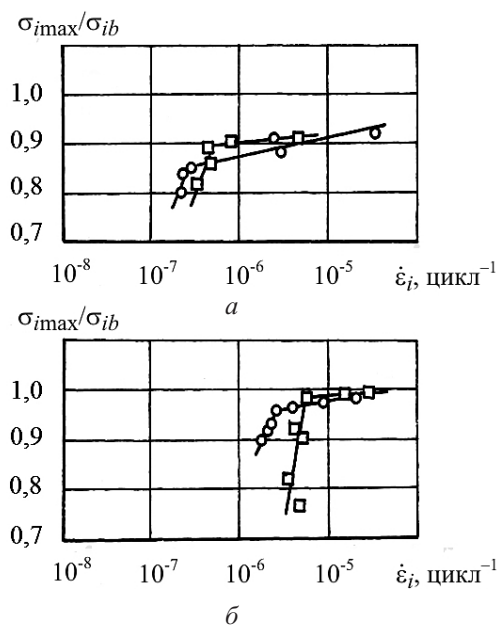


Рис. 1. Влияние вида напряженного состояния на интенсивность скорости циклической ползучести стали 10ГН2МФА при температуре $T = 20$ (а) и 320°C (б) и при разных видах напряженного состояния: $\circ - K = \infty$; $\square - K = 2$. (Частота нагружения – 2 цикл/мин.)

Анализ полученных результатов и кривых циклической ползучести показывает, что наложение второй растягивающей повторно-статической компоненты напряжений снижает способность металла сопротивляться усталостному разрушению при одновременном повышении скорости циклической ползучести по сравнению с таковой в условиях циклического одноосного растяжения при одинаковых уровнях максимальной интенсивности напряжений цикла. Это обстоятельство, естественно, приводит к смещению зоны перехода от квазистатического разрушения к усталостному (напряжения перехода σ_{in}) в область больших скоростей ползучести при двухосном пульсирующем растяжении по сравнению с одноосным.

Оценивая влияние температуры испытаний на характер развития процессов циклической ползучести и малоциклового усталости сталей перлитного класса при различных видах напряженного состояния, отметим, что повышение температуры до 320°C приводит к снижению их способности сопротивляться усталостному разрушению при реализованных соотношениях главных напряжений (рис. 1). Однако в условиях неравномерного двухосного циклического растяжения такое воздействие температуры испытаний более интенсивно, чем при одноосном.

Анализ вязкопластических характеристик сталей при сложном напряженном состоянии с учетом влияния температуры позволяет установить аномальные особенности кинетики процессов деформирования сталей 15Х2МФА при $T = 270^\circ\text{C}$ и 10ГН2МФА при $T = 285^\circ\text{C}$ в условиях ступенчатого нагружения по сравнению с развитием этих процессов при 20, 350 и 320°C. Показано, что для температуры 270 и 285°C характерным является отсутствие деформации ползучести при всех реализованных соотношениях главных напряжений. При этом пластическая деформация накапливается скачкообразно на каждой ступени нагружения в процессе активного деформирования по достижении напряжений, превышающих предел текучести на предыдущей ступени нагружения на 30...40 МПа. Последующий переход на каждой ступени нагружения от активного деформирования к испытаниям на ползучесть не приводит к накоплению деформации ползучести.

Экспериментально установлено, что долговечность материала при пульсирующем нагружении в условиях сложного напряженного состояния в случае квазистатического разрушения зависит, с одной стороны, от ресурса располагаемой равномерной пластичности, свидетельствующего о наступлении потери устойчивости процесса деформирования, с другой – от скорости циклической ползучести при заданных условиях нагружения, обуславливающей кинетику достижения этого предельного состояния. Следовательно, для оценки долговечности исследованных сталей может быть использовано разработанное ранее [4] с учетом упруговязкопластической модели [5] и условия потери устойчивости процесса пластического деформирования [6] расчетное соотношение вида

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

где a и b – константы материала, определяемые из опытов на циклическое ступенчатое нагружение или на основе двух опытов на циклическую ползучесть при одноосном нагружении; $a(\sigma_{i \max} - \sigma_{in})^{b+1} = \dot{\epsilon}_{i \min}$ – минимальная скорость ползучести; C'_i – постоянная при заданных виде напряженного состояния и температуре, определяемая на основе условия потери устойчивости процесса пластического деформирования.

Экспериментальная проверка соотношения (1) как для стали 10ГН2МФА, так и 15Х2МФА [4] показывает удовлетворительную достоверность выполненных расчетов долговечности (рис. 2).

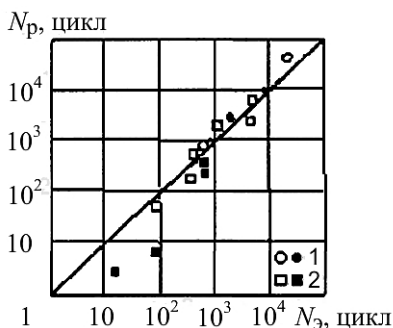


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных значений долговечности стали 10ГН2МФА с расчетными по условию (1) при разных видах напряженного состояния и температуре 20 (светлые точки) и 320°C (темные точки): 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 2$. (Частота нагружения – 2 цикл/мин.)

Однако для получения исходных данных расчета по критерию (1) необходимо проводить достаточно сложные эксперименты с использованием специального испытательного оборудования.

С учетом изложенного выше на основе результатов замеров твердости испытуемых образцов известным методом ЛМ-твердости [2], который базируется на фиксации изменений параметра рассеяния значений твердости, при массовых измерениях оценивалась повреждаемость металла в условиях изотермического циклического нагружения при линейном и плоском напряженном состоянии. В данных исследованиях в качестве параметра поврежденности использовали коэффициент гомогенности распределения Вейбулла

$$m = \frac{d(n)}{2,30259 S(\lg H)}. \quad (2)$$

При анализе результатов использовали коэффициент $m_{\text{отн}} = m_i / m_{\text{исх}}$, где m_i – текущее значение коэффициента гомогенности, определяемое по данным замеров твердости после циклического нагружения при заданном уровне усилий; $m_{\text{исх}}$ – значение коэффициента гомогенности, рассчитанное по результатам замеров твердости перед началом эксперимента (исходное состояние).

Оценивая влияние вида напряженного состояния на кинетику повреждаемости исследованных сталей (рис. 3), необходимо отметить, что на стадиях замедленной и установившейся ползучести значения относительного коэффициента гомогенности $m_{\text{отн}}$ располагаются на одной, общей для всех реализованных соотношений главных напряжений линии как в зависимостях параметра поврежденности от уровня достигнутой деформации ползучести ε_{il} (рис. 3,а,в), так и от уровня максимальных напряжений цикла (рис. 3,б,г).

Это позволяет с определенной степенью достоверности принять, что $m_{\text{отн}}$ является параметром, инвариантным к виду напряженного состояния на указанных этапах процесса ползучести для исследованных сталей. Вместе с тем при наступлении потери устойчивости процесса деформирования четко проявляется влияние вида напряженного состояния на кинетику повреждаемости исследованных теплоустойчивых сталей. Установлены предельные значения параметра поврежденности $m_{\text{отн}}$, соответствующие потере устойчивости процесса накопления деформации ползучести в условиях одно- и двухосного растяжения. Для стали 10ГН2МФА при одноосном пульсирующем растяжении предельное $m_{\text{отн}} = 0,63$, при двухосном – 0,75; для стали 15Х2МФА соответственно 0,8 и 0,88.

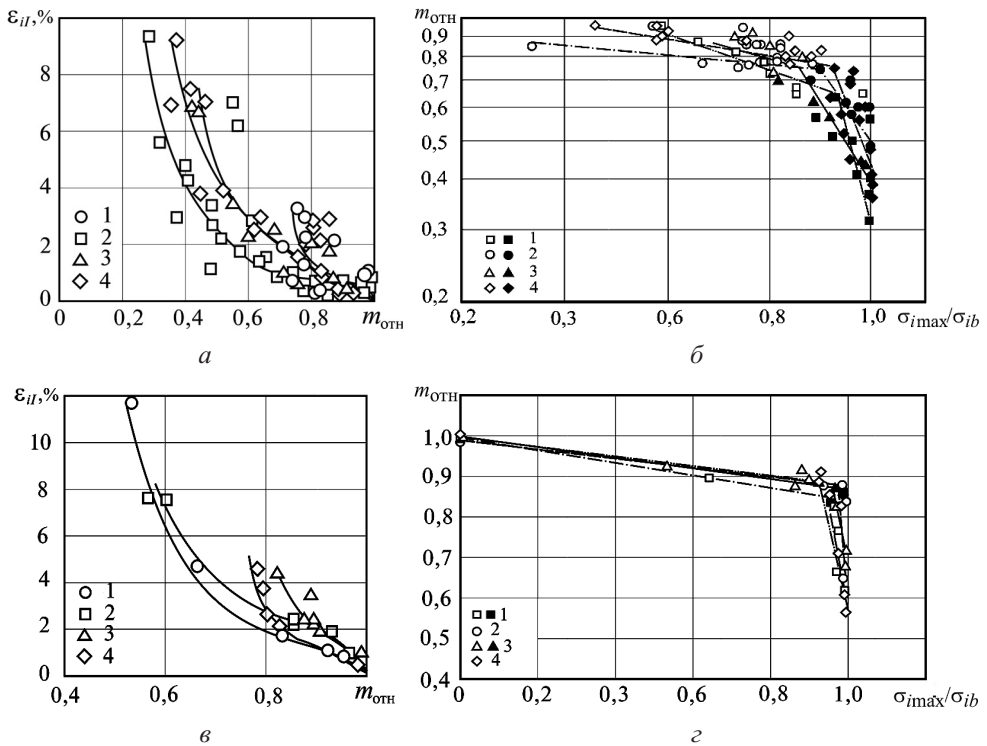


Рис. 3. Влияние вида напряженного состояния на кинетику накопления повреждений теплоустойчивых сталей 10ГН2МФА и 15Х2МФА при различных соотношениях главных напряжений: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 1$; 3 – $K = 0,5$; 4 – $K = 2$ (темные точки соответствуют достижению предельного состояния металла).

Оценивая влияние температуры испытаний на кинетику повреждаемости исследованных сталей, отметим, что при повышенных температурах по сравнению с комнатной темп накопления повреждений металла больший, о чем свидетельствуют данные, представленные в качестве примера для стали 10ГН2МФА на рис. 4.

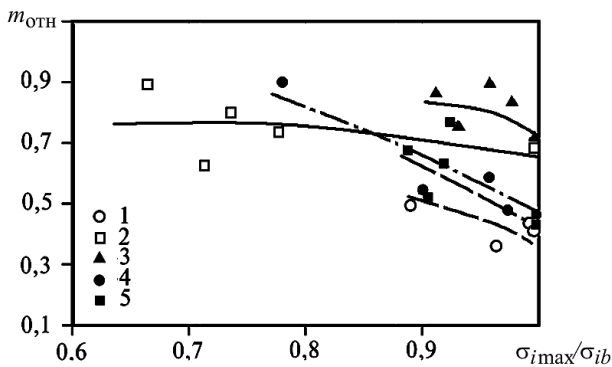


Рис. 4. Влияние температуры на развитие повреждаемости стали 10ГН2МФА при $K = 0,5$ (светлые точки) и $K = 2$ (темные точки): 1, 5 – $T = 320^\circ\text{C}$; 2, 3 – $T = 20^\circ\text{C}$; 4 – $T = 285^\circ\text{C}$.

Установленное ранее [7] влияние скорости циклической ползучести на характер развития процесса повреждаемости исследованных сталей (рис. 5) подтверждает инвариантность $m_{отн}$ к виду напряженного состояния в диапазоне соотношений

главных напряжений $K = 0 \dots \infty$. При этом, как показано в [8], взаимосвязь между коэффициентом гомогенности и скоростью ползучести удовлетворительно описывает соотношение

$$\dot{\epsilon}_i = cm_{отн}^{-d}, \tag{3}$$

где c и d – параметры материала, определяемые экспериментально, $c = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$; $d = 4,2$.

Экспериментально обоснованное соотношение между скоростью ползучести и параметром поврежденности $m_{отн}$ в виде (3) позволяет усовершенствовать известную [9] зависимость вида

$$N_b \dot{\epsilon}_{i \min} = C'_i. \tag{4}$$

В результате получим уравнение вида

$$N_b = C'_i \frac{m_{отн}^d}{c}. \tag{5}$$

Сравнение экспериментальных данных с расчетными по (5) (рис. 5) свидетельствует о принципиальной возможности практического использования указанного расчетного соотношения как предварительный экспресс-метод оценки качества металла конструкции в процессе ее эксплуатации после более полного его экспериментального обоснования. При этом следует учитывать достаточную простоту и доступность в условиях эксплуатации получения необходимых для предварительных оценок исходных расчетных данных.

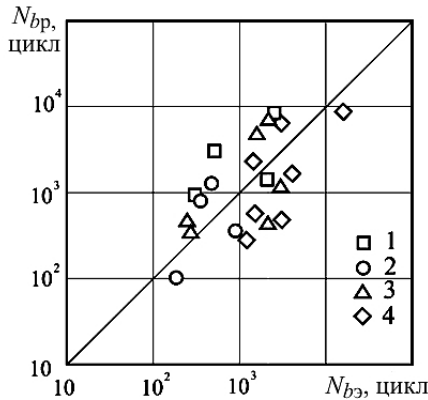


Рис. 5. Сопоставление расчетных по (5) значений долговечности стали 10ГН2МФА с экспериментальными при различных соотношениях главных напряжений, $T = 20^\circ\text{C}$: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 2$; 3 – $K = 1$; 4 – $K = 0,5$.

Использование установленной взаимосвязи между параметром поврежденности $m_{отн}$ и характеристиками вязкопластических свойств исследованных сталей позволило усовершенствовать критерий оценки долговечности (1) [10]. В результате получена расчетная зависимость в виде

$$N_b = \frac{C'_i}{a_{пр} (\sigma_{i \max} - \sigma_{ин})^{b_{пр}+1}}, \tag{6}$$

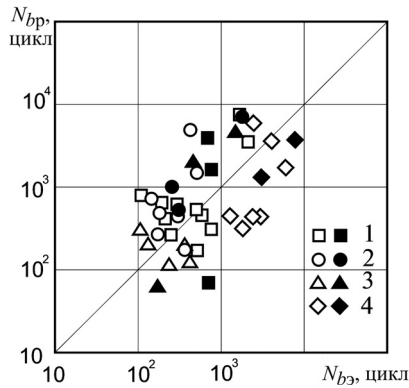


Рис. 6. Сопоставление экспериментально полученных значений долговечности стали 10ГН2МФА с расчетными по (6) при сложном напряженном состоянии с учетом повреждаемости металла, $T = 20^{\circ}\text{C}$: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 0,5$; 3 – $K = 2$; 4 – $K = 1$ (светлые точки – исходное состояние, темные – после наработки $\varepsilon_{\theta_{\text{ост}}} = 0,5\%$).

где $a_{\text{пр}}$, $b_{\text{пр}}$ – параметры материала, определяемые с учетом повреждаемости металла и ее взаимосвязи с характеристиками вязкопластических свойств исследованных теплоустойчивых сталей.

Представленное на рис. 6 сопоставление расчетных по (6) значений долговечности стали 10ГН2МФА с экспериментальными свидетельствует о возможности использования предложенного расчетного метода в инженерной практике при эксплуатации материала конструкции.

Выводы

1. На основе обобщений результатов экспериментальных исследований циклической ползучести с учетом повреждаемости теплоустойчивых сталей в исходном состоянии и после предварительного деформирования определены предельные значения относительного коэффициента гомогенности, соответствующие потере устойчивости процесса накопления деформаций ползучести в условиях линейного и плоского напряженного состояния.

2. Установлена инвариантность параметра поврежденности $m_{\text{отн}}$ к виду напряженного состояния при одно- и двухосном растяжении на стадии установившейся ползучести.

3. На основе параметров поврежденности металла, определяемых по результатам ограниченного объема относительно простых базовых экспериментов, предложены расчетные зависимости для экспресс-оценки долговечности трубчатых оболочечных конструкций из теплоустойчивых сталей, нагружаемых циклически изменяющимися осевой силой и внутренним давлением.

Резюме

Представлено результати дослідження кінетики накопичення пошкоджень і закономірностей деформування теплотривких сталей 10ГН2МФА і 15Х2МФА за різних режимів навантаження в умовах складного напруженого стану.

1. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Федоров Р. К. и др. Автоматизированный стенд для испытаний конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1991. – № 10. С. 70 – 74.

2. Пат. України 25197А, МКИ 7, G 01 N 3/00, G 01, N 3/40. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “LM-метод твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек – Чинний з 15.01.03.
3. Лебедев А. А., Гигиняк Ф. Ф., Баишта В. В. Исследование циклической ползучести в условиях сложного напряженного состояния в диапазоне температур 20...400°C // Пробл. прочности. – 1978. – № 10. – С. 11 – 14.
4. Шкодзинский О. К., Лебедев А. А., Гигиняк Ф. Ф. К оценке долговечности теплоустойчивых сталей при пульсирующем мягком нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – 1989. – № 5. – С. 36 – 39.
5. Гигиняк Ф. Ф., Лебедев А. А., Шкодзинский О. К. Упруговязкопластическая модель, описывающая свойства сталей перлитного класса // XXI Всесоюз. науч. сов. по проблемам прочности двигателей: Тез.докл. – М.: ЦИАМ, 1986. – С. 57.
6. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Лебедев А. А., Тимофеев Б. Т. О потере устойчивости процесса пластического деформирования при сложном напряженном состоянии // Пробл. прочности. – 1991. – № 10. – С. 3 – 8.
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. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А. Прогнозирование долговечности теплоустойчивых сталей 10ГН2МФА с учетом повреждаемости металла при пульсирующем растяжении в условиях сложного напряженного состояния // Там же. – 2012. – № 5. – С. 98 – 104.
9. Гігіняк Ф. Ф., Лебедев А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка. – 270 с.
10. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А. Усовершенствование упруговязкопластической модели деформирования с учетом повреждаемости при циклическом нагружении // Пробл. прочности. – 2012. – № 4. – С. 58 – 66.

Поступила 14. 11. 2013