

## Кинетика накопления повреждений теплоустойчивых сталей при различных режимах нагружения

Ф. Ф. Гигиняк, П. А. Булах, Т. Н. Можаровская

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

*Представлены результаты исследований кинетики накопления повреждений и процесса деформирования теплоустойчивой стали 10ГН2МФА при различных режимах нагружения в условиях сложного напряженного состояния.*

**Ключевые слова:** накопление повреждений, теплоустойчивая сталь, скорость ползучести, коэффициент гомогенности, твердость.

**Введение.** 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 текущего их состояния и реальных условий эксплуатации. Разработка методов оценки остаточного ресурса машин и конструкций, большинство из которых работает при циклическом нагружении, представляется актуальной задачей. Основной причиной преждевременной потери несущей способности таких объектов являются вышедшие из-под контроля процессы накопления повреждений и трещинообразования в конструкционных материалах.

**Методика испытаний.** В данном сообщении представлены результаты экспериментальных исследований развития процесса деформирования и кинетики накопления повреждений в теплоустойчивой стали 10ГН2МФА при комнатной температуре в условиях однократного, ступенчатого циклического и непрерывного циклического нагружений при сложном напряженном состоянии. Испытания проводили на тонкостенных трубчатых образцах ( $D_n/\delta = 50$ , где  $D_n$  – наружный диаметр образца;  $\delta$  – толщина стенки образца), нагружаемых осевой силой и внутренним давлением в различном сочетании на стенде СНТ-8У [1]. В экспериментах реализовывали одноосное ( $K = \sigma_z/\sigma_\theta = \infty$ ) и неравномерное двухосное ( $K = 0,5$  и  $2$ ) растяжение. В условиях циклического нагружения частота составляла 2 цикл/мин по трапециевидному циклу с выдержкой при максимальной нагрузке 4 с. Контроль и фиксацию нагрузок и деформаций проводили с помощью тензостанции ТИС-ДЕЛЬТА и АЦП У14-140 с передачей данных на компьютер. Для замера твердости на различных ступенях нагружения использовали портативный твердомер фирмы ERNST.

Для оценки поврежденности металла использовали метод LM-твердости [2], разработанный в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины. Метод основан на изменении величины коэффициента гомогенности  $m$  (по Вейбуллу), определяемого по формуле Гумбеля [3, 4]:

$$m = 0,4343 d_n \left[ \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\lg H_i - \overline{\lg H}) \right]^{-1/2},$$

где  $d_n$  – величина, зависящая от количества  $n$  измерений (при  $n = 30$  имеем  $d_n = 1,1124$ );  $H_i$  – значение твердости при  $i$ -м измерении;  $\overline{\lg H}$  – среднее значение логарифма твердости по результатам  $n$  измерений.

**Обсуждение результатов.** Анализ полученных результатов показывает, что коэффициент гомогенности Вейбулла  $m$  является параметром, который более чувствителен к величине накопленной деформации ползучести, уровню максимальных напряжений цикла и числу циклов наработки, чем твердость исследованной стали, подобно тому как это отмечалось для других металлов и сплавов в работах [5, 6]. Подобная закономерность (рис. 1) характерна для всех реализованных видов напряженного состояния. На рис. 1 используются следующие обозначения:  $N$  – число циклов наработки на каждой ступени нагружения;  $N_b$  – число циклов нагружения, накопленных до разрушения образца;  $\sigma_i$  – наибольшая величина интенсивности напряжений каждого цикла на рассматриваемой ступени нагружения, после которой прекращали нагружение без разрушения образца;  $\sigma'_{i \max}$  – максимальное значение интенсивности напряжений цикла, достигнутое перед остановкой циклической нагрузки неразрушенного образца на рассматриваемой ступени нагружения;  $\sigma_{i \max}$  – максимальная интенсивность напряжений цикла на ступени нагружения, завершающейся разрушением образца;  $\sigma_{ib}$  – интенсивность напряжений, соответствующих разрушению образца при однократном нагружении.

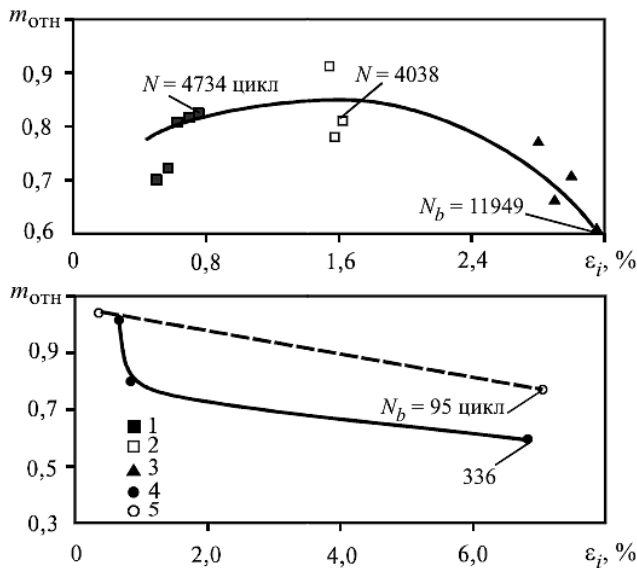


Рис. 1. Экспериментальные зависимости относительного коэффициента гомогенности  $m_{отн}$  от величины накопленной деформации ползучести  $\varepsilon_i$  при ступенчатом циклическом нагружении стали 10ГН2МФА в условиях неравномерного двухосного растяжения  $K = 0,5$  с частотой 2 цикл/мин и различных уровнях максимальной интенсивности напряжений цикла: 1 –  $\sigma_i/\sigma'_{i \max} = 0,986$  ( $\sigma'_{i \max} = 427$  МПа); 2 –  $\sigma_i/\sigma'_{i \max} = 0,997$  ( $\sigma'_{i \max} = 440$  МПа); 3 –  $\sigma_{i \max}/\sigma_{ib} = 0,987$ ; 4 –  $\sigma_{i \max}/\sigma_{ib} = 0,933$ ; 5 –  $\sigma_{i \max}/\sigma_{ib} = 0,998$  ( $\sigma_{ib} = 679$  МПа).

В связи с достаточно большим разбросом значений твердости и коэффициента гомогенности от образца к образцу в качестве параметра, характеризующего повреждаемость металла, принимали относительную величину коэффициента гомогенности Вейбулла  $m_{отн}$ :

$$m_{отн} = m_i / m_{исх},$$

где  $m_i$  – текущее значение коэффициента гомогенности, определяемое на каждой ступени нагружения образца после его циклического растяжения при заданном уровне нагрузки;  $m_{исх}$  – значение коэффициента гомогенности, полученное по результатам обработки замеров твердости металла образца в исходном состоянии (до начала эксперимента).

Установлено, что по мере увеличения числа циклов нагружения относительная величина коэффициента гомогенности снижается по сравнению с его исходным значением, особенно существенно в диапазоне циклов нагружения, предшествующих разрушению. Отметим, что темп снижения коэффициента гомогенности  $m$  на стадии ускоренной ползучести при одноосном ( $K = \infty$ ) циклическом растяжении выше, чем при двухосном ( $K = 0,5$  и  $2$ ). Однако при  $K = 2$  темп снижения несколько выше, чем при  $K = 0,5$  (рис. 2). В то же время изменение коэффициента гомогенности  $m$  на стадии установившейся ползучести при  $K = \infty$ ;  $0,5$  и  $2$  достаточно близко.

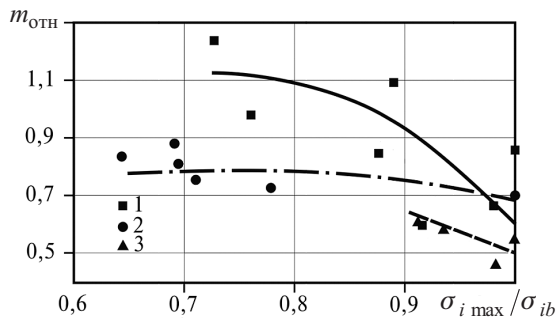


Рис. 2. Зависимость коэффициента гомогенности стали 10ГН2МФА от уровня максимальной относительной интенсивности напряжений цикла в условиях циклического нагружения на стадии ускоренной ползучести при различных видах напряженного состояния: 1 –  $K = \infty$ ; 2 –  $K = 0,5$ ; 3 –  $K = 2$ .

Оценивая влияние вида напряженного состояния на развитие процесса накопления повреждений в условиях циклического нагружения, заметим, что при переходе от одноосного растяжения к двухосному на стадии ускоренной ползучести замедляется темп изменения относительного коэффициента гомогенности  $m_{отн}$  при увеличении максимальной относительной интенсивности напряжений цикла  $\sigma_{i\max} / \sigma_{ib}$  (рис. 2) и продолжительности наработки при заданном усилии нагружения. Вместе с тем известно [1], что для теплоустойчивых сталей в условиях малоциклового нагружения при двухосном растяжении скорость циклической ползучести на стадии установившейся ползучести несколько выше, чем при одноосном растяжении для одинаковых уровней  $\sigma_{i\max} / \sigma_{ib}$ . Учитывая, что величины предельных деформаций, соответствующих разрушению при разных видах напряженного состояния, су-

щественно различаются [7] (при двухосном растяжении деформация меньше, чем при одноосном), можно предположить, что долговечность металла в условиях двухосного циклического растяжения должна быть ниже, чем при одноосном. Данные соображения получили экспериментальное подтверждение не только для исследованной стали, но и для ряда других конструкционных сталей [1, 7].

Отметим также, что изменение относительной величины коэффициента гомогенности  $m_{\text{отн}}$  имеет характерную закономерность как для одноосного ( $K = \infty$ ), так и для двухосного ( $K = 0,5$  и  $2$ ) видов растяжения. В случае разрушения образца по механизму усталости величина  $m$  на стадии замедленной ползучести несколько возрастает по сравнению с исходной, что, вероятно, свидетельствует о некотором упорядочении структуры материала. При квазистатическом характере разрушения увеличения значения  $m$  на этой стадии не наблюдается. На стадии установившейся ползучести величина  $m$  уменьшается незначительно, а при переходе к стадии ускоренной ползучести темп ее уменьшения существенно возрастает независимо от вида разрушения.

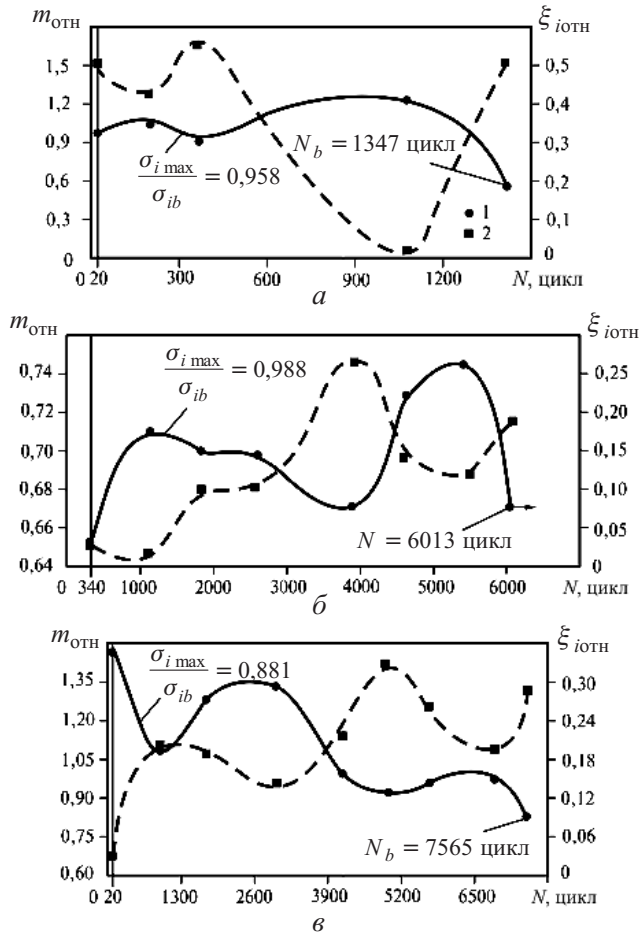


Рис. 3. Зависимости относительных коэффициента гомогенности  $m_{\text{отн}}$  (1) и скорости установившейся ползучести  $\xi_{\text{отн}}$  (2) от наработки в условиях одноосного ступенчатого циклического растяжения стали 10ГН2МФА с частотой 2 цикл/мин при различных долговечностях: а, б, в – соответственно образцы № 1, 2, 3. (Стрелка показывает, что образец не разрушен.)

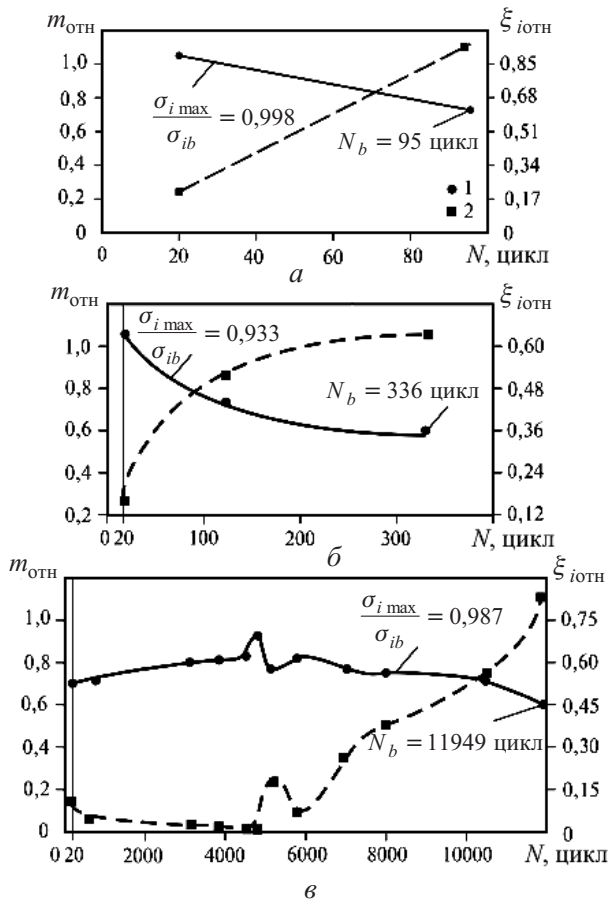


Рис. 4. Зависимости относительных коэффициента гомогенности  $m_{отн}$  (1) и скорости установившейся ползучести  $\xi_{иотн}$  (2) от наработки в условиях ступенчатого циклического неравномерного двухосного растяжения ( $K = 0,5$ ) стали 10ГН2МФА с частотой 2 цикл/мин при различных долговечностях: а, б, в – соответственно образцы № 5, 6, 7.

Для оценки кинетики скорости циклической ползучести использовали относительные значения минимальной интенсивности скорости ползучести  $\xi_{иотн} = \dot{\epsilon}_{i \text{ creep}} / \dot{\epsilon}_i$ , где  $\dot{\epsilon}_{i \text{ creep}}$  – минимальная скорость циклической ползучести рассматриваемой ступени циклического нагружения при установленном уровне усилия, после которого определяли коэффициент гомогенности  $m_i$ ;  $\dot{\epsilon}_i$  – скорость деформации ползучести, накопленной за время наработки всей рассматриваемой ступени циклического нагружения при установленном уровне усилия, после которого определяли коэффициент гомогенности  $m_i$ .

На основании подробного анализа результатов выполненного цикла экспериментальных исследований повреждаемости стали 10ГН2МФА в условиях малоциклового нагружения, выраженной через относительный коэффициент гомогенности  $m_{отн}$ , и изменения относительной минимальной интенсивности скорости ползучести  $\xi_{иотн}$  в зависимости от числа циклов нагружения  $N$  установлена взаимосвязь между изменениями относительного коэффициента гомогенности и относительной минимальной скорости ползучести. Обработка результатов испытаний показывает, что при увеличении

$\xi_{i\text{отн}}$  величина  $m_{\text{отн}}$  уменьшается, и наоборот, при уменьшении  $\xi_{i\text{отн}}$  значение  $m_{\text{отн}}$  увеличивается. Подтверждением вышеизложенного служат графики, приведенные на рис. 3 и 4.

Представленные данные о взаимосвязи коэффициента гомогенности со скоростью ползучести свидетельствуют, что кинетика структурных изменений исследуемого материала в процессе его нагружения зависит от характера развития циклического деформирования металла образца. В дальнейшем это позволит существенно упростить получение экспериментальных результатов, которые необходимы для расчетов долговечности элементов конструкций, работающих в условиях малоциклового нагружения, с помощью аппроксимации зависимости  $m_{\text{отн}} - \xi_{i\text{отн}}$  степенной функцией (рис. 5).

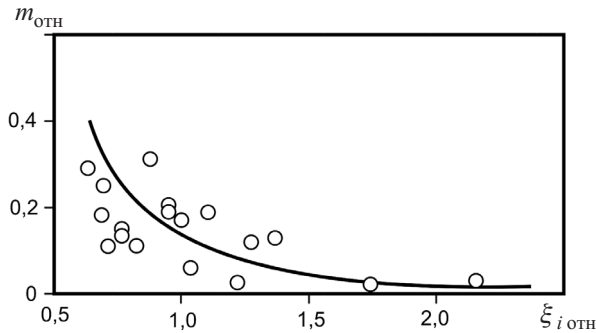


Рис. 5. Аппроксимация зависимости  $m_{\text{отн}} - \xi_{i\text{отн}}$  степенной функцией вида  $\xi_{i\text{отн}} = 0,2355 m_{\text{отн}}^{-3,8728}$  на примере экспериментальных данных для  $K = \infty$ .

Результаты обработки полученных экспериментальных данных (рис. 5) могут служить основой для дальнейшего совершенствования методов оценки долговечности при циклическом нагружении металлов в условиях сложного напряженного состояния.

## Выводы

1. Отмеченная закономерность взаимосвязи коэффициента гомогенности со скоростью ползучести позволяет совершенствовать существующие методики оценки несущей способности и долговечности металла конструкций, основанные на учете кинетики процессов повреждаемости, протекающих в металлических материалах при нагружении с учетом условий их эксплуатации.

2. Анализ полученных данных позволяет существенно упростить экспериментальные исследования по оценке кинетики деформирования в условиях циклической ползучести с помощью метода ЛМ-твёрдости. В дальнейшем зависимость между  $m_{\text{отн}}$  и  $\xi_{i\text{отн}}$  можно использовать для усовершенствования деформационно-кинетического критерия [1], на основе которого ранее в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины разработан расчетно-экспериментальный метод оценки долговечности металлов при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния.

## Резюме

Наведено результати досліджень кінетики накопичення пошкоджень і процесу деформування теплотривкої сталі 10ГН2МФА за різних режимів навантаження в умовах складного напруженого стану.

1. 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.
2. Патент 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 15.01.2003.
3. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 12.
4. Писаренко Г. С., Лебедев А. А. Деформирование и прочность материалов при сложном напряженном состоянии. – Киев: Наук. думка, 1976. – 416 с.
5. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Музыка Н. Р., Швец В. П. Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении // Пробл. прочности. – 2008. – № 2. – С. 5 – 25.
6. Лебедев А. А., Швец В. П. Оценка поврежденности конструкционных сталей по параметрам рассеяния характеристик твердости материалов в нагруженном и разгруженном состояниях // Там же. – 2008. – № 3. – С. 29 – 37.
7. Лебедев А. А., Ковальчук Б. И., Гигиняк Ф. Ф., Ламашевский В. П. Механические свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии. – 3-е изд. перераб. и доп. – Киев: Издательский дом “Ин Юре”, 2003. – 540 с.

Поступила 21. 06. 2009