

Исследование развития процесса накопления повреждений в металле при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния

П. А. Булах

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

Представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей деформирования стали 10ГН2МФА при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния. Показано влияние вида напряженного состояния на темп изменения величины коэффициента гомогенности, представленного в качестве меры поврежденности металла.

Ключевые слова: сложное напряженное состояние, поврежденность, коэффициент гомогенности.

Введение. Поскольку большинство элементов конструкций работает в условиях сложного нагружения, существенное значение имеет описание кинетики достижения предельного состояния металла конструкции с учетом вида напряженного состояния. Комплексные исследования закономерностей деформирования и кинетики накопления повреждений в материалах в условиях малоциклового нагружения при различных видах напряженного состояния представляют большой практический интерес. Результаты таких экспериментальных исследований позволяют получить данные с высокой точностью и сделать необходимые выводы для разработки методов оценки долговечности с учетом поврежденности металла.

Следует отметить, что известные результаты длительных испытаний конструкционных материалов, работающих при сложном напряженном состоянии, свидетельствуют о том, что процессы пластического деформирования при ползучести существенно зависят от вида напряженного состояния [1, 2].

Целью настоящего исследования является установление закономерностей изменения деформационных свойств стали 10ГН2МФА с учетом поврежденности металла при циклическом нагружении (отнулевой цикл) в зависимости от вида напряженного состояния.

Микроструктура исследуемой стали представляет собой феррит с упрочняющей карбидной фазой (рис. 1) [3].

Методика проведения испытаний. Испытывали тонкостенные трубчатые образцы ($D_n/\delta = 50$, где D_n – наружный диаметр образца; δ – толщина стенки образца) при комнатной температуре в условиях ступенчатого циклического и непрерывного циклического нагружений осевой силой и внутренним давлением в различном соотношении на стенде СНТ-8У [4]. Модернизированный стенд позволяет проводить испытания с непрерывной регистрацией усилий и деформаций, выводить цифровую информацию и осуществлять построение соответствующих диаграмм с помощью ЭВМ. Это существенно снижает трудоемкость экспериментальных исследований и повышает достоверность определения характеристик и зависимостей, необходимых для дальнейшего расчета.

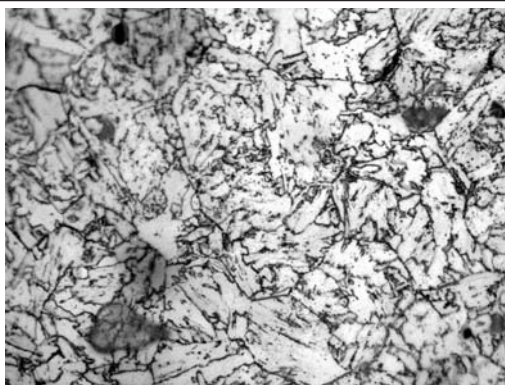


Рис. 1. Микроструктура стали 10ГН2МФА в исходном состоянии [3].

В эксперименте было реализовано циклические одноосное ($K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty$), а также 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.

Использовали разработанный в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины метод [5, 6], позволяющий оценивать поврежденность металла по рассеянию характеристик твердости. Достоинством данного метода являются доступность и простота использования. Метод прошел апробацию на элементах конструкций, находящихся в условиях статического и циклического нагружения при одноосном растяжении. В качестве характеристики рассеяния механических свойств выбран коэффициент гомогенности m , определяемый по формуле

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

где d_n – параметр, зависящий от количества n измерений; H_i – значение твердости при i -м измерении; $\overline{\lg H}$ – среднее значение логарифма твердости по результатам n измерений.

Твердость стали измеряли на специально подготовленной поверхности рабочей части по окружности базы образца ($l = 20$ мм) портативным твердомером ERNST (Швейцария), снабженным автоматической системой обработки опытных данных. На этой поверхности в процессе нагружения замеряли продольную и поперечную деформации. При ступенчатом циклическом нагружении твердость измеряли для каждого блока с постоянной нагрузкой, а в условиях непрерывного циклического нагружения – через определенное количество циклов после полной разгрузки образца. Полученные данные обрабатывали известными статистическими методами.

При анализе результатов исследований использовали относительные величины коэффициента гомогенности

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

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

Изменение величины коэффициента гомогенности в процессе деформирования. Анализ экспериментальных данных показывает, что подтверждаются полученные ранее [7] закономерности изменения коэффициента гомогенности m при деформировании материала в зависимости от величины накопленной деформации в процессе нагружения. Такие закономерности характерны для всех реализованных соотношений главных напряжений. Доказательством изложенного служат представленные на рис. 2 и 3 данные, аналогичные полученным ранее [8] для неравномерного двухосного нагружения, где N – число циклов наработки на каждой ступени нагружения образца перед полной его разгрузкой и переходом на следующую ступень нагружения при более высоком уровне напряжений, при этом образец остается не разрушенным; N_b – число циклов нагружения, накопленных до разрушения образца; σ_i – максимальная интенсивность напряжений цикла на рассматриваемой ступени нагружения при прекращении циклической нагрузки без разрушения образца; $\sigma'_{i\max}$ – максимальная интенсивность напряжений цикла после достижения равновесного состояния металла образца (прекращение накопления деформаций) на рассматриваемой ступени нагружения при прекращении циклической нагрузки без разрушения образца; $\sigma_{i\max}$ – максимальная интенсивность напряжений цикла на ступени нагружения, завершающейся разрушением образца; σ_{ib} – интенсивность напряжений, соответствующих разрушению образца при однократном нагружении.

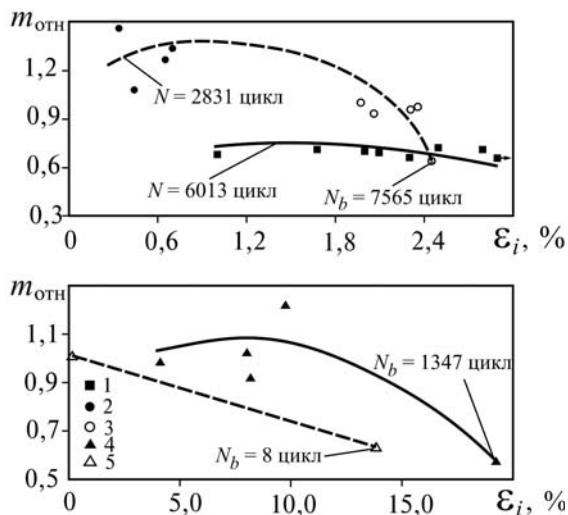


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ от величины накопленной деформации ползучести ϵ_i в условиях ступенчатого одноосного циклического нагружения стали 10ГН2МФА ($K = \infty$) с частотой 2 цикл/мин при различных уровнях максимальной интенсивности напряжений цикла: 1 – $\sigma_i/\sigma'_{i\max} = 0,988$ ($\sigma'_{i\max} = 596$ МПа); 2 – $\sigma_i/\sigma'_{i\max} = 0,998$ ($\sigma'_{i\max} = 562$ МПа); 3 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,991$; 4 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,958$; 5 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,962$ ($\sigma_{ib} = 769$ МПа). (Стрелка показывает, что образец не разрушился.)

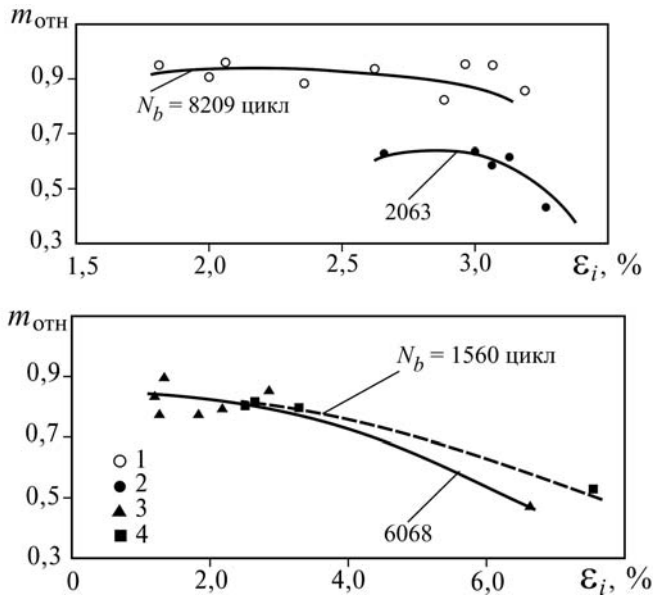


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ от величины накопленной деформации ползучести ϵ_i в условиях ступенчатого равномерного двухосного циклического нагружения ($K = 1$) стали 10ГН2МФА с частотой 2 цикл/мин при различных уровнях максимальной интенсивности напряжений цикла: 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 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,997$; 4 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,933$; 5 – $\sigma_{i\max}/\sigma_{ib} = 0,998$ ($\sigma_{ib} = 679$ МПа).

Изменение величины коэффициента гомогенности в зависимости от вида напряженного состояния. Установлено, что при всех реализованных соотношениях главных напряжений на степень изменения твердости в процессе нагружения больше влияет уровень максимальных напряжений цикла $\sigma_{i\max}$, чем продолжительность наработки (рис. 4, 5). Анализ экспериментальных данных показывает, что для всех видов разрушения как по квазистатическому механизму, так и по механизму усталости величина $m_{отн}$ для исследованной стали по мере наработки уменьшается, особенно существенно в диапазоне циклов нагружения, предшествующих разрушению (рис. 4).

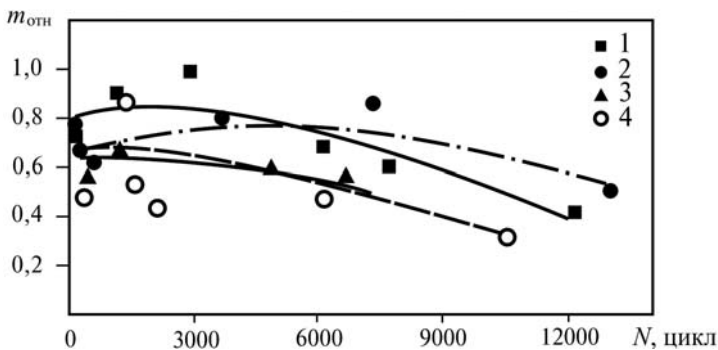


Рис. 4. Зависимость величины относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ от числа циклов в условиях циклического нагружения стали 10ГН2МФА на стадии ускоренной ползучести при различных видах напряженного состояния: 1 – $K = \infty$; 2 – $K = 0,5$; 3 – $K = 2$; 4 – $K = 1$.

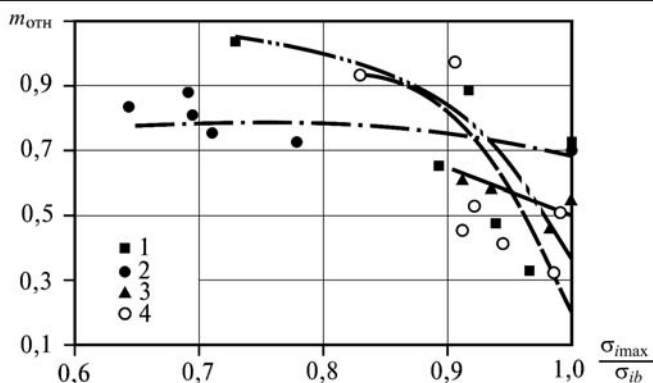


Рис. 5. Зависимость величины относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ от уровня максимальной интенсивности напряжений цикла в условиях циклического нагружения стали 10ГН2МФА на стадии ускоренной ползучести при различных видах напряженного состояния. (Обозначения те же, что и на рис. 4.)

Как было показано ранее [8], темп снижения коэффициента гомогенности с увеличением максимальной интенсивности напряжений в условиях одноосного циклического нагружения несколько выше, чем при неравномерном двухосном. Подтверждением этого являются полученные результаты экспериментальных исследований. В то же время темпы уменьшения величины $m_{отн}$ при соотношении главных напряжений $K = \infty$ и 1 достаточно близки (рис. 5).

Характер изменения относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ в зависимости от уровня максимальной интенсивности напряжений цикла имеет следующие особенности. На стадиях замедленной и установившейся ползучести с ростом $\sigma_{i\max}$ величина $m_{отн}$ уменьшается незначительно, в условиях ускоренной ползучести темп уменьшения существенно повышается. Указанная закономерность наблюдается для всех реализованных видов нагружения.

Заключение. Выполненный цикл экспериментальных исследований позволяет выявить влияние вида напряженного состояния на кинетику повреждаемости стали. Переход от квазистатического характера разрушения к усталостному способствует замедлению темпа процесса изменения относительного коэффициента гомогенности.

Резюме

Отримано результати експериментальних досліджень закономірностей деформування сталі 10ГН2МФА при циклічному навантаженні. Показано вплив виду напруженого стану на темп зміни величини коефіцієнта гомогенності, що використовується як міра пошкодженості матеріалу.

1. Лебедев А. А., Гигиняк Ф. Ф., Баица В. В. Исследование циклической ползучести в условиях сложного напряженного состояния в диапазоне температур 20...400°С // Пробл. прочности. – 1978. – № 10. – С. 11 – 14.

2. Гігіняк 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. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А. С. Зубченко, М. М. Колоскова, Е. Т. Долбенко и др. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.
4. Гигиняк Ф. Ф., Шкодзинский О. К., Федоров Р. К. Автоматизированный стенд для испытаний конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния // Пробл. прочности. – 1991. – № 10. – С. 70 – 74.
5. Патент України №52107А. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання. “Метод LM-твердості” / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Чинний з 15.01.03, Бюл. № 1.
6. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Определение поврежденности конструкционных материалов по параметрам рассеяния характеристик твердости // Пробл. прочности. – 2002. – № 4. – С. 5 – 11.
7. Лебедев А. А., Маковецкий И. В., Музыка Н. Р., Швец В. П. Исследование деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении // Там же. – 2008. – № 2. – С. 5 – 10.
8. 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.

Поступила 19. 05. 2010