

Влияние предварительного деформирования на характеристики процессов циклической ползучести и повреждаемость стали 10ГН2МФА в условиях плоского напряженного состояния

Ф. Ф. Гигиняк, П. А. Булах

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

Проанализировано влияние предварительного деформирования стали 10ГН2МФА с учетом повреждаемости металла в условиях неравномерного двухосного растяжения на ее пластические свойства при последующем циклическом растяжении в условиях плоского напряженного состояния.

Ключевые слова: деформирование стали, повреждаемость металла, неравномерное двухосное растяжение, плоское напряженное состояние.

Введение. Влиянию пластического деформирования, которое предшествует развитию процесса ползучести и учитывается при оценке несущей способности широкого круга элементов конструкций, уделяется достаточно большое внимание, о чем свидетельствуют, в частности, работы [1, 2]. В указанных работах рассмотрены различные аспекты развития такого влияния на скорость ползучести, продолжительность разных участков кривой ползучести, оптимизацию величины предшествующей деформации для различных технологических процессов и т.д.

Практический интерес для решения проблемы повышения надежности и долговечности энергетического оборудования, в том числе атомного, представляет учет технологической наследственности металла при оценке несущей способности высоконагруженных элементов конструкций.

В настоящей работе рассмотрены закономерности циклической ползучести и малоцикловой усталости предварительно однократно деформированной стали 10ГН2МФА, трубчатые образцы которой в последующем испытывали в условиях циклического нагружения при различном соотношении главных напряжений и температуре 20°C.

Методы испытаний и анализ полученных результатов. Эксперименты проводили с использованием установки и методик, подробно описанных в [3]. Предварительное однократное деформирование тонкостенных трубчатых образцов осуществляли при соотношении главных напряжений $K = \sigma_z / \sigma_\theta = 0,5$ и температуре 20°C до уровня деформации $\varepsilon_{\theta_{ост}} = 0,5\%$, что достаточно близко к условиям гидрозапрессовки теплообменных трубок в коллектор парогенератора.

Последующие испытания образцов выполняли в условиях непрерывного пульсирующего (с частотой 2 цикл/мин) мягкого нагружения по методике [3] в условиях одно- и двухосного растяжения с соотношением главных напряжений $K = \infty; 2; 1; 0,5$. Для каждого соотношения и уровня максимальных напряжений цикла $\sigma_{i \max}$ испытывали не менее трех образцов.

Регистрируемые в процессе эксперимента диаграммы циклического деформирования позволяют определить предельные значения интенсивности пластических деформаций, соответствующих разрушению ε_{ib}^p , и построить кривые циклической ползучести в координатах $\varepsilon_i^p - N$, где ε_i^p – накопленная интенсивность пластических деформаций; N – число циклов нагружения. В качестве примера на рис. 1 представлены некоторые кривые циклической ползучести для различных видов напряженного состояния.

Анализ кривых ползучести в условиях пульсирующего одно- и неравномерного двухосного растяжения свидетельствует о существенном влиянии на их характер вида напряженного состояния (рис. 1).

Закономерности ползучести исследованной стали и материалов подобного класса в исходном состоянии подробно описаны в [4–10]. В частности, при двухосном циклическом растяжении участки установившейся ползучести несколько сокращаются по сравнению с таковыми при одноосном пульсирующем растяжении. Для исследованной стали характерны значения равномерной пластической деформации, полученные после разрушения при циклическом растяжении. Они зависят от соотношения главных напряжений и остаются приблизительно постоянными для каждого из них при квазистатическом разрушении (таблица).

Значения равномерной пластической деформации предварительно деформированной стали 10ГН2МФА при плоском напряженном состоянии

K	$\sigma_{i \max} / \sigma_{ib}$	$\varepsilon_{ib}^p, \%$
∞	0,990	6,13
	0,953	4,00
	0,904	3,16
2	0,977	3,00
	0,959	2,85
	0,945	1,80
1	0,997	4,04
	0,991	3,90
	0,984	2,95
0,5	0,959	3,20
	0,935	3,00
	0,890	3,09

Примечание. $\sigma_{i \max} / \sigma_{ib}$ – интенсивность максимальных напряжений в цикле; σ_{ib} – интенсивность напряжений, соответствующих разрушению при однократном нагружении.

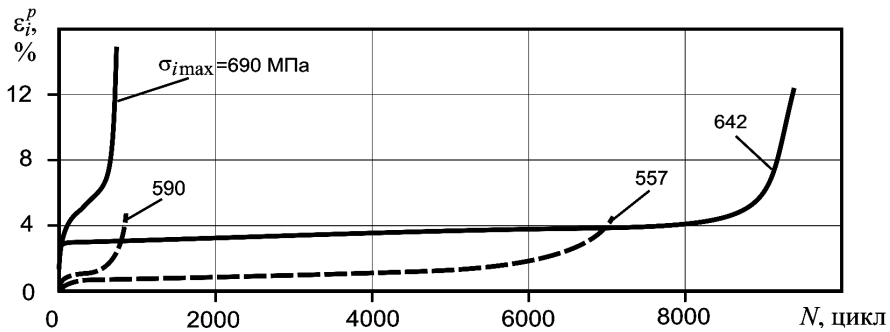


Рис. 1. Кривые циклической ползучести предварительно деформированной стали 10ГН2МФА при пульсирующем одноосном $K = \infty$ (сплошные линии) и неравномерном двухосном $K = 0,5$ (штриховые линии) растяжении.

Данные таблицы подтверждают, что квазистатическое разрушение наступает по достижении пластической деформации величины, полученной при однократном нагружении [11] с заданным соотношением напряжений. В то же время при переходе в область усталостного разрушения величина остаточной деформации ε_{ib}^p уменьшается по сравнению с таковой в условиях однократного нагружения для всех реализованных соотношений главных напряжений. Необходимо отметить, что предварительное деформирование до $\varepsilon_{\text{ост}} = 0,5\%$ практически не влияет на предельную равномерную пластическую деформацию металла, соответствующую квазистатическому разрушению при циклическом одно- ($K = \infty$) и неравномерном двухосном ($K = 2$ и $0,5$) растяжении, по сравнению с аналогичным параметром металла в исходном состоянии. В то же время предварительное деформирование выше указанного уровня при равномерном циклическом двухосном растяжении ($K = 1$) приводит к уменьшению величин остаточной равномерной деформации с 6 до 4%.

Кривые циклической ползучести предварительно деформированной стали 10ГН2МФА использовали для оценки ее сопротивления циклическому деформированию в условиях сложного напряженного состояния. Зависимости интенсивности скорости циклической ползучести от величины максимальных напряжений цикла при различных соотношениях главных напряжений представлены на рис. 2.

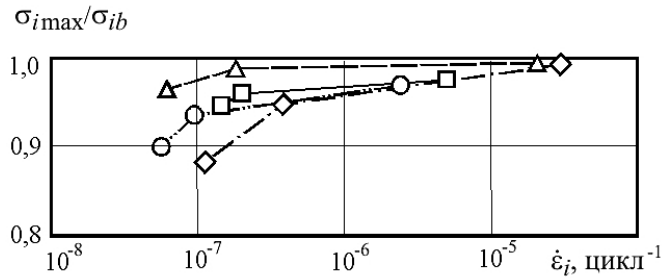


Рис. 2. Предельные кривые интенсивности скорости установившейся ползучести предварительно деформированной стали 10ГН2МФА при различных соотношениях главных напряжений. (Здесь и на рис. 4: \diamond – $K = \infty$; \square – $K = 2$; \triangle – $K = 1$; \circ – $K = 0,5$.)

Отметим, что скорость циклической ползучести в условиях двухосного растяжения при всех реализованных соотношениях главных напряжений меньше таковой при одноосном нагружении. Для предварительно деформированной стали это особенно заметно в области перехода от квазистатического разрушения к усталостному.

Сравнение полученных скоростей циклической ползучести предварительно деформированной стали с таковыми стали в исходном состоянии [4, 9, 11] свидетельствует о том, что предварительное неравномерное двухосное растяжение оказывает влияние на способность металла сопротивляться циклическому нагружению. При этом скорость циклической ползучести предварительно деформированной стали при циклическом двухосном растяжении меньше, чем при одноосном, при одинаковом уровне максимальных напряжений цикла в области перехода от квазистатического разрушения к усталостному. В условиях неравномерного циклического двухосного растяжения ($K = 2$ и $0,5$), которое заканчивается квазистатическим разрушением, значения скорости циклической ползучести практически совпадают со скоростью циклической ползучести при одноосном циклическом нагружении.

С кривыми циклической ползучести и предельными кривыми интенсивности скорости циклической ползучести предварительно деформированной стали 10ГН2МФА удовлетворительно согласуются кривые малоциклового усталости (рис. 3).

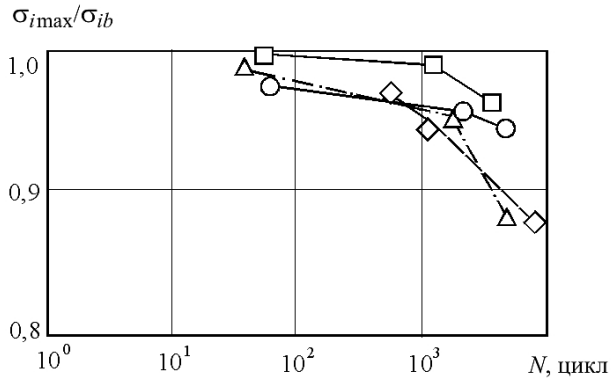


Рис. 3. Кривые малоциклового усталости предварительно деформированной стали 10ГН2МФА при различных соотношениях главных напряжений: \diamond – $K = 0,5$; \square – $K = 1$; \triangle – $K = \infty$; \circ – $K = 2$.

При всех реализованных соотношениях главных напряжений на кривых малоциклового усталости предварительно деформированного металла есть участки разной длины, где он не разрушался, в отличие от кривых усталости металла в исходном состоянии [11]. При циклическом одноосном растяжении длина такого участка наибольшая. Анализ предельных кривых интенсивности пластических деформаций (рис. 4) подтверждает вышеприведенное предположение о влиянии вида напряженного состояния на развитие процессов циклического деформирования и разрушения исследованной стали при пульсирующем нагружении.

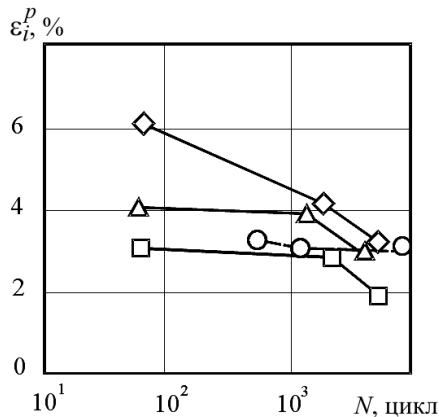


Рис. 4. Предельные кривые интенсивности пластических деформаций предварительно деформированной стали 10ГН2МФА при различном соотношении главных напряжений.

Испытываемые образцы использовали также для изучения влияния предварительного деформирования на кинетику повреждаемости стали 10ГН2МФА при различных соотношениях главных напряжений.

Ниже представлены результаты экспериментальных исследований развития процессов деформирования и кинетики накопления повреждений предварительно деформированной до $\epsilon_{\text{ост}} = 0,5\%$ стали 10ГН2МФА в условиях непрерывного циклического нагружения при плоском напряженном состоянии ($K = \infty; 2; 1; 0,5$) и температуре 20°C . Повреждаемость исследуемого металла оценивали методом ЛМ-твёрдости [12].

Для сравнительной оценки кинетики повреждаемости исследуемой стали использовали относительные значения коэффициентов гомогенности в виде

$$m_{\text{отн}} = \frac{m_b}{m_{\text{исх}}}, \quad (1)$$

где m_b – коэффициент гомогенности, полученный на основе обработки данных измерений твердости разрушенных образцов при различных соотношениях главных напряжений; $m_{\text{исх}}$ – коэффициент гомогенности металла в исходном состоянии.

Как отмечалось выше, предварительное деформирование исследованной стали до $\varepsilon_{\theta_{\text{ост}}} = 0,5\%$ не оказывает существенного влияния на остаточные равномерные деформации, соответствующие разрушению при различных соотношениях главных напряжений.

Заметим, что характер изменения значений $m_{\text{отн}}$ для предварительно деформированной стали и стали в исходном состоянии зависит от реализованных в процессе циклического нагружения соотношений главных напряжений (рис. 5).

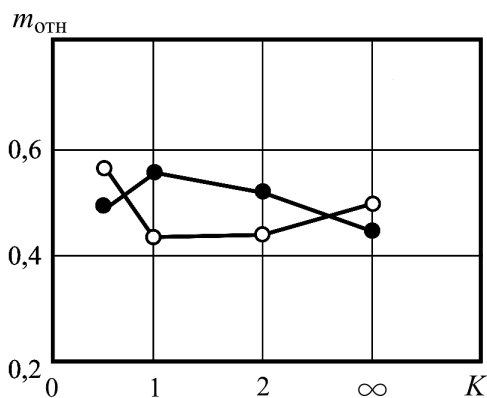


Рис. 5. Влияние предварительного деформирования на повреждаемость стали 10ГН2МФА в условиях циклического нагружения при различном соотношении главных напряжений: ○ – исходное состояние; ● – после предварительного деформирования.

Анализ полученных результатов показывает, что при циклическом одноосном растяжении предварительно деформированной стали 10ГН2МФА ($\varepsilon_{\theta_{\text{ост}}} = 0,5\%$) относительное значение коэффициента гомогенности $m_{\text{отн}}$ по сравнению с таким же параметром, полученным после испытаний металла в исходном состоянии в идентичных условиях циклического нагружения, уменьшается. Это свидетельствует о том, что аналогичная картина наблюдается также для стали при циклическом неравномерном двухосном растяжении ($K = 0,5$). Вместе с тем при циклическом равномерном ($K = 1$) и неравномерном ($K = 2$) двухосном растяжении отмечается замедление темпа накопления повреждений предварительно деформированного металла по сравнению с металлом в исходном состоянии при одинаковых максимальных напряжениях цикла.

Анализируя характер развития процесса повреждаемости предварительно деформированной стали в условиях плоского напряженного состояния, необходимо отметить отсутствие различия между предельными значениями коэффициента гомогенности $m_{\text{отн}}$, рассчитанными по замерам твердости металла в окружном направлении (по диаметру) образца и в продольном (по образующей), о чем свидетельствуют данные, представленные на рис. 6.

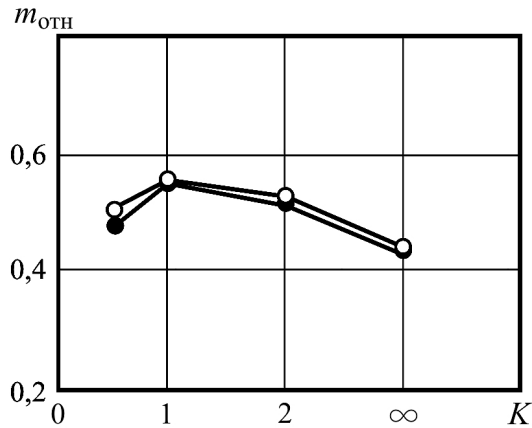


Рис. 6. Влияние измерений твердости в продольном (\circ) и окружном (\bullet) направлении на коэффициент гомогенности $m_{отн}$ предварительно деформированной стали 10ГН2МФА в условиях циклического нагружения при различном соотношении главных напряжений.

Заметим также, что сравнение экспериментальных данных, обработанных по соотношению (1) – рис. 5 и 6, указывает на влияние вида напряженного состояния на темп изменения повреждаемости металла.

Заключение. Выполненные исследования показывают, что предварительное деформирование стали 10ГН2МФА в случае неравномерного двухосного растяжения до $\varepsilon_{\theta_{ост}} = 0,5\%$ не оказывает существенного влияния на ее пластические свойства при последующем циклическом растяжении в условиях плоского напряженного состояния.

Вместе с тем результаты оценки кинетики накопления повреждений металла свидетельствуют, что предварительное деформирование при двухосном нагружении по-разному, в зависимости от соотношения главных напряжений ($K = \infty \dots 0$), влияет на темп повреждаемости металла при его последующем циклическом нагружении.

Результаты экспериментальных исследований циклической ползучести теплоустойчивой стали 10ГН2МФА с учетом предварительного деформирования и повреждаемости металла позволят более полно учитывать влияние ряда технологических процессов изготовления и эксплуатации высоконагруженных элементов конструкций энергетического оборудования с целью оценки их несущей способности.

Резюме

Проаналізовано вплив попереднього деформування сталі 10ГН2МФА з урахуванням пошкодження металу в умовах нерівномірного двовісного розтягу на її пластичні властивості при наступному циклічному розтязі в умовах плоского напруженого стану.

1. Розенберг В. М. Ползучесть металлов. – М.: Металлургия, 1967. – 76 с.
2. Приданцев М. В., Ланская К. А. Стали для котлостроения. – М.: Металлургиздат, 1959. – 161 с.
3. Гігіняк Ф. Ф., Лебедєв А. О., Шкодзінський О. К. Міцність конструкційних матеріалів при малоцикловому навантаженні за умов складного напруженого стану. – Київ: Наук. думка, 2003. – 270 с.

4. Гигиняк Ф. Ф., Можаровская Т. Н., Булах П. А. Ползучесть конструкционных материалов при малоцикловом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Сб. тр. международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию Г. С. Писаренко “Прочность материалов и элементов конструкций”. – Киев: ВИПОЛ, 2011. – С. 625–636.
5. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровский В. Н., Можаровская Т. Н. Исследование закономерностей деформирования теплоустойчивых сталей в условиях ползучести при сложном напряженном состоянии // Пробл. прочности. – 2010. – № 4. – С. 62–70.
6. Можаровская Т. Н., Можаровский В. Н., Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А. Исследование закономерностей деформирования конструкционных материалов в условиях ползучести при длительном статическом и циклическом нагружении с учетом влияния вида напряженного состояния // Вісн. нац. техн. ун-ту України “КПІ”. Сер. Машинобудування. – 2009. – 56. – С. 166–173.
7. Лебедев А. А., Гигиняк Ф. Ф., Баишта В. В. Исследование циклической ползучести корпусных сталей в условиях сложного напряженного состояния в диапазоне температур 20...400°C // Пробл. прочности. – 1978. – № 10. – С. 11–14.
8. Giginyak F. F., Zvezdin Yu. I., Lebedev A. A., and Timofeev B. T. Low-cycle fatigue and cyclic creep of high-pressure vessel in multiaxial stress state // Res Mechanica. – 1987. – 21. – P. 35–53.
9. Булах П. О. Деформування і міцність реакторної сталі 10ГН2МФА в умовах одноразового та циклічного двовісних навантажень: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Київ, 2012. – 21 с.
10. Гигиняк Ф. Ф. Экспериментальное исследование закономерностей циклической ползучести и критериев прочности некоторых конструкционных сталей при плоском напряженном состоянии в условиях повторно-статического нагружения в диапазоне температур 20...400°C // III Всесоюз. симп. “Малоцикловая усталость элементов конструкций”. – Паланга, 1979. – Вып. 1. – С. 137–139.
11. Гигиняк Ф. Ф., Тимофеев Б. Т. Малоцикловая усталость и циклическая ползучесть сталей перлитного и аустенитного классов и их сварных соединений при сложном напряженном состоянии // Вопр. материаловедения. – 2007. – № 3. – С. 272–285.
12. Пат. Україна 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.

Поступила 07. 07. 2014