

Влияние температуры на кинетику повреждаемости предварительно деформированной стали 10ГН2МФА при циклическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния

Ф. Ф. Гигиняк, П. А. Булах

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

Проанализировано влияние температуры на кинетику повреждаемости предварительно деформированной стали 10ГН2МФА в условиях одно- и двухосного растяжения.

Ключевые слова: деформирование стали, повреждаемость металла, одно- и двухосное растяжение, сложное напряженное состояние.

Введение. В условиях циклической ползучести при нагружении до больших уровней напряжений с достаточно малой скоростью ($\dot{\epsilon}_i < 10^{-3} \text{с}^{-1}$) постепенно увеличивается пластическая деформация и соответственно снижается упругая составляющая. При этом уменьшается напряжение, величина которого связана с упругой частью деформации, т.е. происходит релаксация напряжения.

Если исходное (первоначальное) нагружение происходит недостаточно быстро, микропластические деформации могут возникнуть уже при нагружении, т.е. накопленная пластическая деформация может существенно превысить квазиупругую. Это особенно важно учитывать при высоких температурах.

Необходимо отметить, что эффект температурного фактора обусловлен его влиянием на механизм сопротивления пластической деформации.

Известно, что при деформировании поликристаллических материалов по мере повышения температуры наблюдается уменьшение критического напряжения сдвига и количества полос скольжения, однако они становятся шире и контрастнее. Происходит также интенсивное разупрочнение металла в полосах скольжения, и дальнейшее увеличение деформации может происходить по тем же полосам без образования новых очагов скольжения. При этом при повышенных температурах гомогенность металла изменяется более интенсивно, чем при комнатной.

При оценке повреждаемости в результате деформирования металла необходимо учитывать влияние скорости деформирования на ширину полос скольжения, а также на интенсивность пластического течения в каждой полосе. Заметим, что снижение условного предела текучести при повышении температуры испытаний обусловлено началом процесса скольжения при более низких напряжениях.

В случае стабильной структуры сплава напряжение, вызывающее пластическое течение при повышенной температуре, определяется совместным влиянием температуры и скорости деформирования. Поэтому при повышенных температурах, характерных для условий эксплуатации энергетического оборудования АЭС, наблюдается более интенсивное изменение гомогенности металла.

Следует отметить особенности указанной выше интенсификации изменения гомогенности, связанной со спецификой развития пластического деформирования теплоустойчивых сталей, которые не должны допускать появления ползучести металла в условиях эксплуатации при неизменном (без скачков) процессе нагружения.

При перегрузках, превышающих установленный максимум циклической нагрузки, которая приводит к увеличению на 10...20% предела текучести металла до перегрузки, наблюдается интенсивное (с достаточно большой скоростью) накопление деформации циклической ползучести в течение 2-3 циклов нагружения с после-

дующим прекращением накопления пластической деформации или деформирование завершается квазистатическим разрушением металла. При этом достигнутая деформация достаточно близка к предельной, установленной для исследуемого металла в условиях однократного нагружения при той же температуре. Такое поведение металла при определенных термосиловых условиях нагружения на дислокационном уровне описано в [1].

Представленные ранее [2, 3] результаты, полученные в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины (далее – ИПП) при исследовании теплоустойчивых сталей 10ГН2МФА, 15Х2МФА, свидетельствуют о правомерности изложенных выше соображений о развитии процессов их циклического деформирования в условиях эксплуатации высоконагруженных элементов конструкций основного оборудования АЭС. Заметим, что выполненный цикл исследований изменения параметра гомогенности $m_{отн}$ теплоустойчивых сталей является дополнительным подтверждением работоспособности указанных сталей при рабочем режиме эксплуатации оборудования АЭС без неожиданных перегрузок.

Цель данной работы заключается в исследовании закономерностей влияния температуры на развитие циклической ползучести и малоциклового усталости предварительно деформированной стали 10ГН2МФА с учетом ее поврежденности в условиях сложного напряженного состояния.

Методы испытаний. Для экспериментов использовали тонкостенные трубчатые образцы, которые нагружались на стенде СНТ-8У [3] пульсирующими осевой силой и внутренним давлением в различном их сочетании ($K = \sigma_z / \sigma_\theta = \infty; 1; 0,5$) при температурах 285 и 320°C. Все образцы предварительно были деформированы при $T = 20^\circ\text{C}$ в условиях однократного неравномерного двухосного растяжения ($K = 0,5$) до $\varepsilon_{\theta_{ост}} = 1,4\%$. Циклическое нагружение осуществлялось с постоянной скоростью изменения усилий по трапециевидному циклу с частотой 2 цикл/мин и выдержкой 4 с при максимальном значении интенсивности напряжений цикла. В качестве рабочей среды для создания внутреннего давления в образце использовали жидкость АМГ-10.

Максимальное напряжение цикла $\sigma_{i\max}$ задавали таким, чтобы обеспечить долговечность не более $2 \cdot 10^4$ цикл, что соответствует $\sigma_{i\max} = 0,8\sigma_{ib}$ и выше, где σ_{ib} – интенсивность напряжений, которые отвечают разрушению в условиях однократного нагружения при заданной температуре. В качестве характеристик прочности и деформации испытуемой стали при циклическом нагружении использовали интенсивность напряжений σ_i и интенсивность деформаций ε_i соответственно.

Повреждаемость металла оценивали методом ЛМ-твердости [4]. При проведении опытов в условиях повышенных температур необходимые для расчетов измерения твердости выполнялись для установленного числа циклов нагружения после полной разгрузки образца и его охлаждения до комнатной температуры с помощью твердомера COMPUTEST SC (фирма ERNST, Швейцария) совместно с разработанным в ИПП дополнительным оборудованием [5]. Это обусловлено техническими условиями эксплуатации твердомера. Для сравнительной оценки кинетики повреждаемости исследованной стали использовали относительные значения коэффициентов гомогенности в виде [6]

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

где m_i – значение коэффициента гомогенности при обработке измерений твердости образцов, охлажденных до комнатной температуры, после установленного числа циклов нагружения с различным соотношением главных напряжений; $m_{исх}$ – коэффициент гомогенности металла после предварительного деформирования до $\varepsilon_{\theta_{ост}} = 1,4\%$ перед началом циклического нагружения.

Указанные параметры определяли путем обработки результатов испытаний, которые проводили для каждого из реализованных соотношений главных напряжений и уровней максимальных напряжений цикла не менее чем на трех образцах.

Анализ полученных результатов. Оценивая влияние температуры на развитие циклической ползучести и малоциклового усталости при различных видах напряженного состояния, необходимо отметить, что кривые ползучести стали 10ГН2МФА при достаточно больших уровнях максимальных напряжений цикла и температуре 320°C имеют все три достаточно развитых участка замедленной, равномерной и ускоренной ползучести. В то же время на кривых малоциклового усталости для всех реализованных соотношений главных напряжений, полученных при температуре 285°C, области реализации квазистатического разрушения практически отсутствуют, и разрушение образца наступает на стадии установившейся ползучести. Особенно хорошо это видно при ступенчатом нагружении (рис. 1).

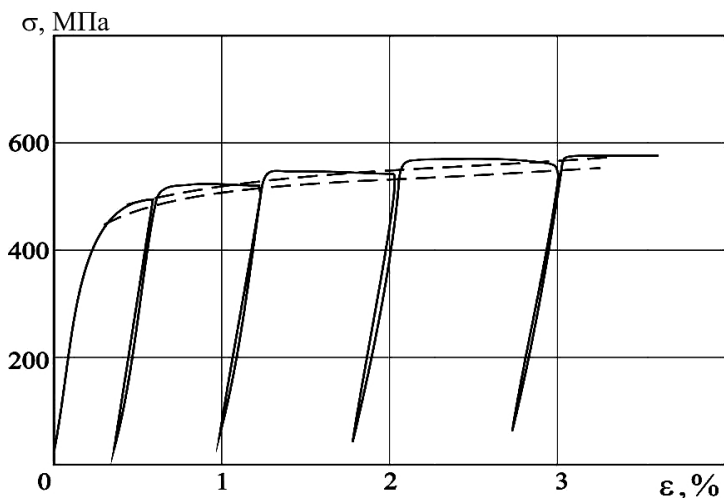


Рис. 1. Диаграмма деформирования стали 10ГН2МФА в условиях ступенчатого нагружения ($K = \infty$) при температуре 285°C.

При повторном нагружении на каждой следующей ступени наблюдается увеличение предела текучести на 30...40 МПа по сравнению с напряжением, которое предшествовало разгрузке и при котором проводилось испытание на ползучесть. После роста напряжения на предыдущей ступени нагружения деформация накапливается скачком на новой ступени с более высоким уровнем напряжения [7]. Одновременно с повышением температуры испытаний деформация, накопленная до разрушения по квазистатическому механизму, снижается по сравнению с таковой при комнатной температуре как для одно-, так и двухосного пульсирующего растяжения.

Как показывают данные исследований, предварительное деформирование стали 10ГН2МФА влияет на изменение коэффициента гомогенности $m_{отн}$ при всех реализованных соотношениях главных напряжений и уровнях температуры (рис. 2, 3).

Полученные экспериментальные данные по изменению параметра повреждаемости $m_{отн}$ позволяют утверждать, что в условиях повышенных температур при всех исследованных соотношениях главных напряжений интенсивность накопления повреждений металла растет по сравнению с таковой при комнатной температуре, несмотря на то что скорость циклической ползучести с повышением температуры снижается. При этом уменьшаются и величины предельных деформаций для различных видов напряженного состояния.

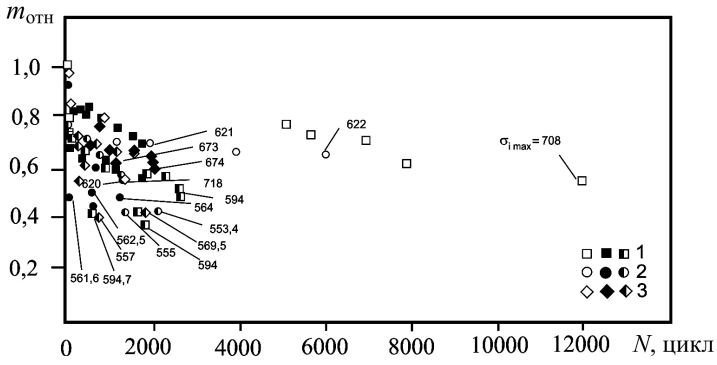


Рис. 2. Зависимость относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ от наработки при ступенчатом циклическом нагружении предварительно деформированной стали 10ГН2МФА с частотой 2 цикл/мин при различном соотношении главных напряжений и уровне температуры: 1 – $K = \infty$, 2 – $K = 0,5$, 3 – $K = 1$; светлые точки – $T = 20^\circ\text{C}$, полузатемненные – $T = 285^\circ\text{C}$, темные – $T = 320^\circ\text{C}$.

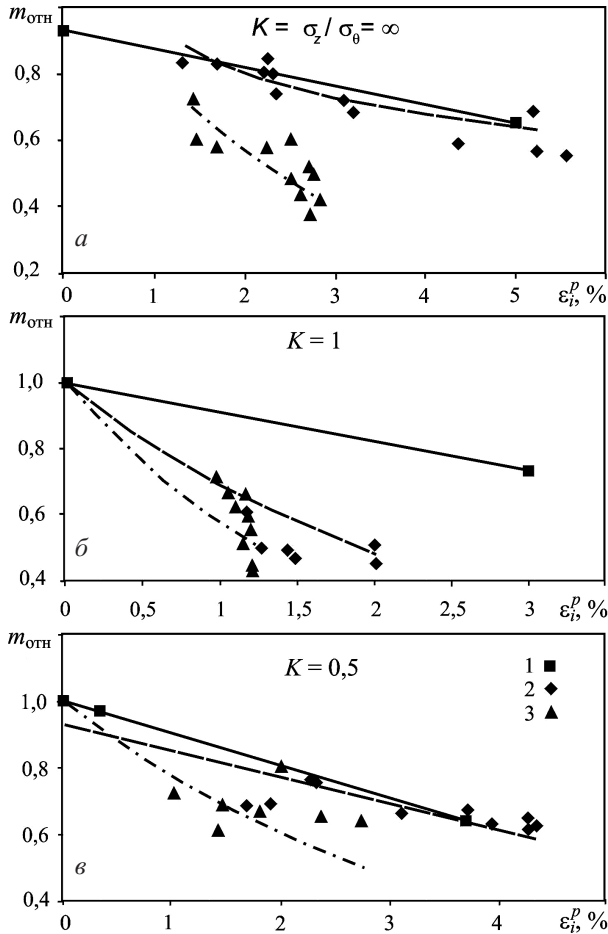


Рис. 3. Зависимость относительного коэффициента гомогенности $m_{отн}$ от уровня накопленной пластической деформации в условиях циклического одноосного (а), равномерного (б) и неравномерного двухосного (в) растяжения с частотой 2 цикл/мин предварительно деформированной стали 10ГН2МФА при различной температуре: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T = 285^\circ\text{C}$; 3 – $T = 320^\circ\text{C}$.

Сравнение значений $m_{отн}$, рассчитанных по данным измерений твердости исследуемого металла после разрушения образцов, испытываемых при высоких температурах и при 20°C [8] при различном соотношении главных напряжений (рис. 4), показывает, что характер изменения $m_{отн}$ при $T = 285$ и 320°C в зависимости от вида напряженного состояния такой же, как при комнатной температуре.

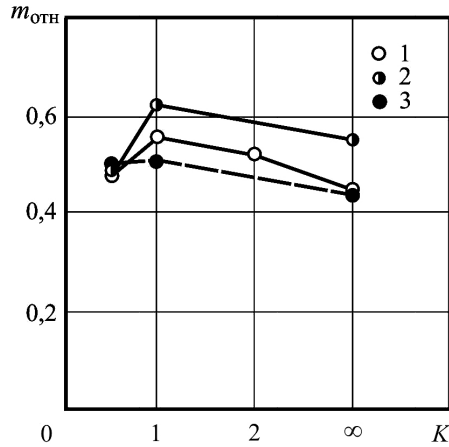


Рис. 4. Влияние температуры на повреждаемость предварительно деформированной стали 10ГН2МФА в условиях циклического нагружения при сложном напряженном состоянии и различной температуре: 1 – $T = 20^\circ\text{C}$; 2 – $T = 285^\circ\text{C}$; 3 – $T = 320^\circ\text{C}$.

Это свидетельствует о том, что критическое повреждение металла в условиях $T = 285^\circ\text{C}$ достигается раньше, чем при комнатной температуре. Вместе с тем при $T = 320^\circ\text{C}$ критические значения $m_{отн}$ в случае равномерного двухосного растяжения ниже, чем при 20 и 285°C. Следовательно, при таком уровне температуры и указанных условиях нагружения металл до начала разрушения успевает накопить больше повреждений, чем при других реализованных уровнях температуры. По-видимому, это обусловлено процессом ползучести металла при 320°C по сравнению с таковым при 285°C.

Анализ полученных экспериментальных данных по влиянию температуры на повреждаемость показывает, что при ее повышении до 285 и 320°C повреждаемость увеличивается на 15 на 30% соответственно.

Установленный характер влияния температуры на повреждаемость стали 10ГН2МФА достаточно хорошо согласуется с результатами исследований, представленными в [9] в виде диаграммы предельных повреждений металла в координатах $T(^{\circ}\text{C}) - \lg d_{ср}^-$, где $d_{ср}^- = d_{цикл}^- / (d_{цикл}^- + d_{ст}^-)$ – усредненное относительное повреждение.

Полученные предельные значения $m_{отн}$ для исследованной стали в условиях эксплуатационных температур могут использоваться в качестве параметров контроля состояния металла в процессе эксплуатации.

Заключение. Для всех реализованных соотношений главных напряжений интенсивность накопления повреждений при циклическом нагружении увеличивается с повышением температуры в диапазоне 20...320°C.

Резюме

Проаналізовано вплив температури на кінетику пошкоджуваності попередньо деформованої сталі 10ГН2МФА в умовах одно- і двовісного розтягу.

1. Бернштейн М. Л., Займовский В. А. Механические свойства металлов. – М.: Металлургия, 1979. – 495 с.
2. Харченко В. В., Степанов Г. В., Гигиняк Ф. Ф. Влияние напряженного состояния на долговечность металла парогенераторов ПГВ-1000 // Новини енергетики. – 2001. – № 3. – С. 79–82.
3. 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.
4. Пат. 25197А Україна, 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 від 15.01.2003.
5. Пат. Україна 42162, МПК, G 01 N 3/00, G 01, N 3/40. Пристрій для випробування матеріалу на твердість / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, В. П. Швець. – Чинний від 25.06.2009.
6. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А., Можаровская Т. Н., Можаровский В. Н. Исследование закономерностей деформирования теплоустойчивых сталей в условиях ползучести при сложном напряженном состоянии // Пробл. прочности. – 2010. – № 4. – С. 62–70.
7. Русинко С. Н. Теория пластичности и неустановившейся ползучести. – Львов: Вища шк., 1981. – 148 с.
8. Гигиняк Ф. Ф., Булах П. А. Влияние предварительного деформирования на характеристики процессов циклической ползучести и повреждаемость стали 10ГН2МФА в условиях плоского напряженного состояния // Пробл. прочности. – 2015. – № 3. – С. 84–90.
9. Махутов Н. А., Гаденин М. М., Гохфельд Д. А и др. Уравнения состояния при малоцикловоом нагружении. – М.: Наука, 1981. – 245 с.

Поступила 18. 05. 2016