

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.178.15/179.119

## Исследование процессов деформирования и накопления повреждений в стали 10ГН2МФА при малоцикловом нагружении

А. А. Лебедев, И. В. Маковецкий, Н. Р. Музыка, В. П. Швец

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

*Рассмотрены результаты экспериментальных исследований закономерностей деформирования и кинетики накопления повреждений в теплостойкой реакторной стали при высоких уровнях напряжений в условиях мягкого (отнулевого) малоциклового нагружения до  $10^4$  цикл. Проведены измерения твердости при различных степенях наработки на стадии упруго-пластического деформирования. Установлен качественно различный характер изменения твердости и прочности стали в процессе наработки. С помощью метода LM-твердости исследован процесс накопления повреждений в сталях при статическом и циклическом нагружении. Приведены кривые зависимости коэффициента гомогенности по Вейбуллу от напряжений циклирования и накопленной деформации.*

**Ключевые слова:** статическая прочность, усталость, напряжения, деформация, твердость, рассеяние свойств, поврежденность.

**Введение.** В работах [1–3] описан метод LM-твердости, позволяющий без разрушения материала оценивать его поврежденность по рассеянию характеристик твердости. Высокая достоверность метода, доступность и простота подтверждены данными массовых испытаний (25–30 измерений) материалов после наработки в условиях статического, в том числе длительного нагружения.

Первый опыт использования метода LM-твердости при циклическом нагружении описан в работе [2], где приведены результаты испытания трубной стали 17Г1С в исходном состоянии и после наработки в условиях знакопеременного изгиба до разрушения при  $\sigma_{и} = 37$  МПа и  $N = 0,57 \cdot 10^7$  цикл и без разрушения при  $\sigma_{и} = 28$  МПа и  $N = 10^7$  цикл.

Результаты исследования свидетельствуют, что, как и в случае статического нагружения, при работе в условиях переменных напряжений твердость в процессе наработки изменяется незначительно. В то же время изменения коэффициента  $m$  гомогенности Вейбулла (характеристика рассеяния значений твердости) существенны, а характер этих изменений свидетельствует о том, что процесс накопления повреждений в основном определяется уровнем напряжений. Так, при напряжении  $\sigma_{и} = 37$  МПа он протекает значительно интенсивнее, и к моменту разрушения коэффициент гомогенности снижается почти до половины исходного, при напряжении  $\sigma_{и} = 28$  МПа его

изменение составило не более 10%, хотя материал был подвержен  $10^7$  цикл нагружения и не разрушился.

Результаты большей части экспериментальных работ по малоцикловой усталости получены при жестких режимах нагружения, когда направленного накопления пластических деформаций не происходит и, следовательно, не реализуются процессы накопления повреждений по деформационно-кинетическому механизму. Роль деформации, как одной из важных кинематических характеристик этого процесса, хорошо прослеживается при мягком нагружении, когда интенсивность развития деформаций, т.е. скорость их роста, сравнительно велика [4]. Благодаря этому уже на первой стадии циклирования происходит адаптация материала к режиму нагружения, сопровождаемая перестроением структуры материала с интенсивным ростом его поврежденности и часто с переходом структуры в равновесное состояние, когда скорости упрочнения и разупрочнения практически одинаковы. Поэтому для учета особенностей фрагментации структуры на разных стадиях наработки в расчетах на долговечность в условиях циклической ползучести в качестве параметра свойств материала наряду со скоростью установившейся ползучести используют интенсивность мгновенной пластической деформации в течение первого полуцикла, которая является особенно важной кинематической характеристикой процесса накопления повреждений при отнулевом циклическом нагружении [4, 5].

**Исследуемые материалы и методика испытаний.** В настоящей работе рассмотрены результаты исследований процесса деформирования и кинетики накопления повреждений в теплостойкой стали 10ГН2МФА под воздействием мягкого (отнулевого) нагружения при высоких уровнях напряжений. Сталь (две плавки) подвергали термомеханической обработке, включающей ковку при температуре 850...1220°C, промежуточный отжиг (только заготовки первой плавки), закалку в воду (температура 890...960°C), отпуск при температуре 630...680°C с охлаждением на воздухе.

Анализ микроструктуры стали показывает, что она представляет собой феррит с упрочняющей карбидной фазой (рис. 1). Выделение карбидов произошло по кристаллографическим плоскостям, в основном в крупных зернах, и может быть связано с перегревом металла при ковке. Этот эффект сильнее выражается в стали первой плавки. Из сравнения структур следует, что их различие, по-видимому, обусловлено термообработкой заготовок из стали второй плавки, включающей промежуточный отжиг, который способствовал повышению ее однородности и уменьшению размеров зерен.

Испытания проводили по ранее разработанной методике [6] на машине TF-2 (Венгрия), снабженной устройством для реализации малоциклового нагружения образцов осевой силой по трапецеидальному отнулевому циклу с частотой 20 цикл/мин с выдержкой под нагрузкой и в разгруженном состоянии в течение 1 с. С целью сокращения времени испытаний использовали трехступенчатые образцы с разными площадями поперечного сечения ступеней, что позволяло реализовать на одном образце три уровня напряжений за одно испытание (рис. 2).

Твердость стали (по Виккерсу) на каждой ступени деформированного образца измеряли портативным твердомером производства фирмы "ERNST"

(Швейцария), снабженным автоматической системой обработки опытных данных с выводом значений твердости на дисплей. Это позволяло исключить влияние субъективных ошибок оператора на результаты измерений.

Шероховатость рабочих поверхностей подготовленного к испытаниям образца соответствовала требованиям по эксплуатации прибора ( $R_a = 1$  мкм). Параметр рассеяния значений твердости – коэффициент  $m$  гомогенности Вейбулла рассчитывали по результатам 30 измерений по методике Гумбеля [2, 3].

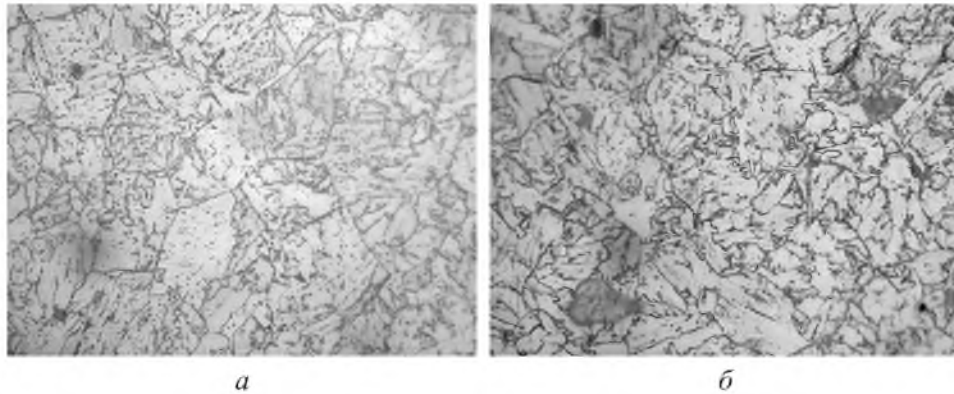


Рис. 1. Микроструктура стали: *a* – первая плавка; *б* – вторая плавка ( $\times 200$ ).

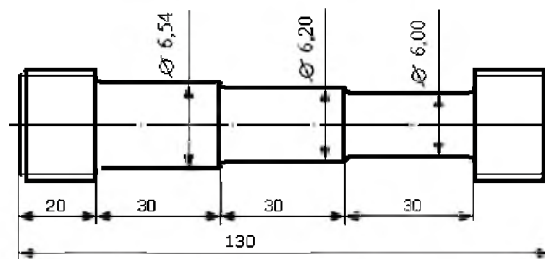


Рис. 2. Трехступенчатый образец для испытаний.

О механических свойствах стали 10ГН2МФА (первая плавка) при статическом однократном нагружении можно судить по диаграмме растяжения, приведенной на рис. 3 сплошной линией. Характеристики кратковременной прочности этой стали ( $\sigma'_{0,2} = 480$  МПа,  $\sigma'_b = 610$  МПа) оказались значительно ниже таковых стали второй плавки, особенно по пределу текучести ( $\sigma''_{0,2} = 510$  МПа,  $\sigma''_b = 622$  МПа). Ниспадающий участок диаграммы на рис. 3 не показан, поскольку деформационные свойства стали обеих плавки практически одинаковые. Их максимальные деформации находятся в пределах обычного разброса и составляют 24...28%.

Характер изменения твердости стали в зависимости от наработки показан на рис. 3 штриховыми линиями 1, 2, 3, циклические диаграммы 2 ( $N = 3918$  цикл, образец разрушился) и 3 ( $N = 10^4$  цикл) – штрихпунктирными. Как видно, кривые  $HV - \varepsilon$  при циклическом отнулевом и статическом нагружении подобны. Аналогичное подобие наблюдается также между циклическими диаграммами 2, 3 и кривой деформации 1 при стати-

ческом растяжении (рис. 3). Это свидетельствует о возможности их совмещения путем простого перемещения в направлении координатных осей, т.е. о наличии между ними соответствующих корреляций, позволяющих прогнозировать свойства материала при циклическом отнулевом нагружении на разные сроки наработки по результатам статических испытаний.

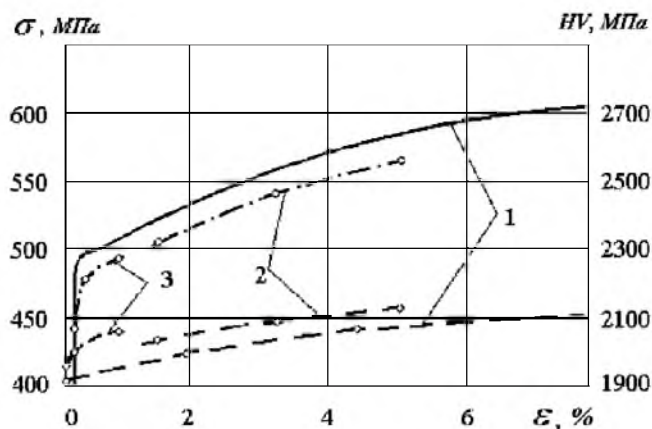


Рис. 3. Результаты испытаний стали 10ГН2МФА (первая плавка) при статическом (1) и циклическом (2, 3) ( $2 - N = 3918$  цикл, образец разрушился;  $3 - N = 10^4$  цикл) нагружении.

Обращает на себя внимание тот факт, что при наличии отмеченного выше подобия кривые  $HV - \epsilon$  при циклическом нагружении (на рис. 3 штриховые линии 2 и 3) располагаются выше аналогичной кривой при статическом растяжении (штриховая линия 1), а соответствующие циклические диаграммы (штрихпунктирные линии 2 и 3) – ниже кривой статического растяжения (сплошная линия 1). Это указывает на то, что исследуемая сталь является циклически упрочняющейся по твердости и циклически разупрочняющейся по прочности. Отмеченная неадекватность, не согласующаяся с известными моделями, в соответствии с которыми твердость металлических материалов, имеющих качественно одинаковые корреляции с характеристиками их статической и циклической прочности, связана, очевидно, с различием в процессах изменения параметров структуры на микро- и макроуровнях, которые контролируют твердость и прочность стали при статическом и малоцикловом нагружении.

Из рис. 3 также следует, что твердость стали в процессе циклического нагружения изменяется не существенно. Как отмечалось ранее [2], более чувствительным к наработке является коэффициент  $m$  гомогенности Вейбулла. Соответствующие данные, полученные на основе рассматриваемых опытов и подтверждающие это, приведены на рис. 4, где показаны зависимости коэффициента  $m$  от накопленных деформаций при статическом и циклическом нагружении. Зависимости в первом приближении можно считать линейными как при статическом, так и при циклическом (отнулевом) нагружении.

Влияние уровня максимальных напряжений цикла на величину коэффициента гомогенности при разных наработках иллюстрирует рис. 5. Отметим, что предельные значения коэффициента гомогенности, при которых

происходит разрушение в условиях статического нагружения (на рис. 5 кривая I) и при наработке 3918 цикл (кривая II), одинаковые и равны половине соответствующих значений коэффициента гомогенности для стали в исходном состоянии. Представляет интерес то, что такое же соотношение значений коэффициентов гомогенности, а следовательно, и степеней поврежденности в исходном состоянии и при разрушении в условиях циклического нагружения имело место для трубной стали 17Г1С [2].

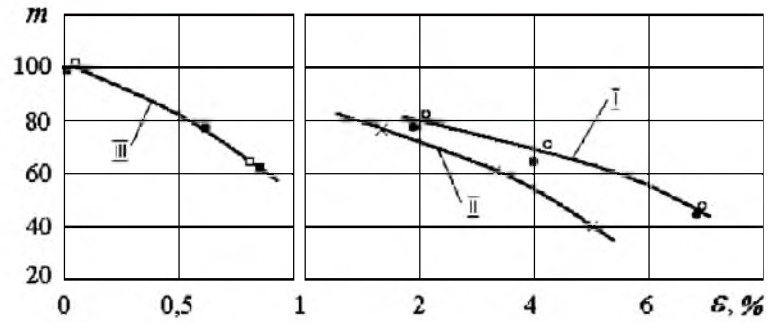


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $m$  от накопленной деформации. Здесь и на рис. 5: I – статическое растяжение (для разных образцов); II – циклическое нагружение до  $N = 3918$  цикл; III – циклические нагружения до  $N = 10^4$  цикл (для разных образцов).

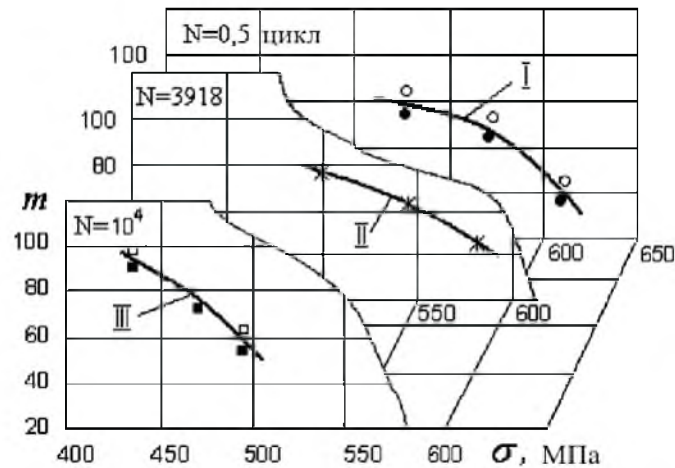


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $m$  от уровня приложенных напряжений.

Результаты испытаний стали 10ГН2МФА второй плавки качественно совпадают с описанными выше.

**Заключение.** Получены новые данные о процессах деформирования и накопления повреждений в теплостойкой стали при высоких уровнях напряжений в условиях отнулевого малоциклового нагружения. Показано, что исследованная сталь является циклически упрочняющейся по твердости и циклически разупрочняющейся по прочности. Установленная неадекватность поведения стали указывает на необходимость внесения корректив в известные модели, рекомендуемые для определения характеристик статической и циклической прочности материала по его твердости. Подтверждена высокая

чувствительность коэффициента гомогенности Вейбулла к уровню накопленных повреждений в процессе наработки в условиях циклического нагружения. Установлена практически линейная зависимость этого коэффициента от накопленной деформации при статическом и циклическом нагружении.

## Резюме

Розглянуто результати експериментальних досліджень закономірностей деформування та кінетики накопичення пошкоджень у теплостійкій реакторній сталі при високих рівнях напружень в умовах м'якого (віднульовий) малоциклового навантаження до  $10^4$  цикл. Проведено вимірювання твердості за різних ступенів напрацювання на стадії пружно-пластичного деформування. Установлено якісно різний характер зміни твердості і міцності сталі в процесі напрацювання. За допомогою методу ЛМ-твердості досліджено процес накопичення пошкоджень у сталях за статичного та циклічного навантаження. Наведено криві залежності коефіцієнта гомогенності за Вейбуллом від напружень циклування і деформації, що накопичується.

1. Патент № 52107А, МКИ 7 G01N 3/00, G01N 3/40. Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу внаслідок накопичення пошкоджень в процесі напрацювання, "ЛМ-метод твердості" / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка, Н. Л. Волчек. – Опубл. 15.01.2003. Бюл. № 1.
2. 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.
3. Патент № 4806, МКИ 7 G01N 3/00, G01N 3/40. Україна. Спосіб оцінки деградації матеріалу / А. О. Лебедев, М. Р. Музыка. – Опубл. 17.01.2005. Бюл. № 1.
4. Стрижало В. А. О взаимосвязи процессов деформирования и разрушения материалов при циклическом нагружении // Пробл. прочности. – 1980. – № 10. – С. 44 – 47.
5. Лебедев А. А., Руденко В. Н., Спиваков А. С. и др. Влияние механической тренировки на ресурс прочности и пластичности конструкционных материалов / Под ред. А. А. Лебедева. – Киев: Наук. думка, 1978. – 68 с.
6. Лебедев А. А., Музыка Н. Р., Волчек Н. Л. Новый метод оценки деградации материала в процессе наработки // Залізничний транспорт України. – 2003. – № 5. – С. 30 – 33.

Поступила 04. 05. 2007