

Изменение коэрцитивной силы при статическом растяжении и усталостном нагружении образцов из стали ШХ15

В. М. Мацевитый^{а,1}, Г. Я. Безлюдько^{б,2}, И. Б. Казак^а, К. В. Вакуленко^а,
Е. В. Белоус^а

^а Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина

^б Фирма “Специальные научные разработки”, Харьков, Украина

¹ matsevlad@ipmash.kharkov.ua

² bezlyudko@yahoo.com

Проанализирован характер изменения коэрцитивной силы образцов из отожженной стали ШХ15 в условиях статического растяжения и циклического отнулевого нагружения в широком диапазоне амплитуд напряжений. Установлена возможность быстрого и надежного определения амплитудных интервалов мало- и многоциклового усталости, а также квазистатического нагружения за счет высокой чувствительности коэрцитивной силы к величине остаточной пластической деформации стали.

Ключевые слова: коэрцитивная сила, статическое растяжение, малоцикловая усталость.

Введение. Известно, что коэрцитивная сила достаточно сильно зависит от изменения структуры ферромагнитных материалов. Этот факт учитывается в технике для контроля состава и качества термообработки сталей, для неразрушающего контроля дефектности материалов в условиях малоциклового усталости и в других случаях. Вместе с тем причина существенной структурной чувствительности коэрцитивной силы изучена слабо, также не ясно, почему она не изменяется при многоциклового усталости пластичных сталей.

Цель настоящей работы – исследовать изменение коэрцитивной силы образцов из стали ШХ15 при статическом растяжении и циклическом отнулевом нагружении в широком диапазоне амплитуд напряжений. Предполагается, что решение поставленной задачи будет способствовать как углублению знаний в области коэрцитиметрии, так и развитию представлений об изменении структурного состояния данной стали в разных интервалах амплитуд циклического нагружения.

Методика исследования. Образцы для исследования изготавливали из отожженной стали ШХ15 (*HV* 200) – рис. 1. К сталям такого класса предъявляются высокие требования: недопустимо наличие неметаллических включений, пор, пузырей и других металлургических дефектов, а также крупных неравномерно распределенных карбидов, после отжига структура должна соответствовать однородной структуре мелкозернистого перлита. Такие требования к качеству металла позволяют при испытаниях уменьшить разброс исследуемых свойств образцов из стали ШХ15.

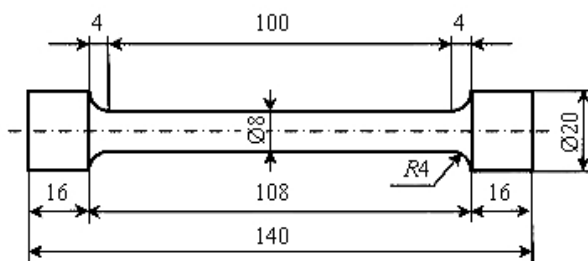


Рис. 1. Образец для испытаний.

Испытания образцов на статическое растяжение проводили на разрывной машине УИМ-50М, при циклическом отнулевом нагружении – на установке ЦДМ-10ПУ. При этом частота нагружения составляла 11 Гц, амплитуда нагружения варьировалась от 169 до 550 МПа.

Коэрцитивную силу определяли на структуроскопе – коэрцитиметре КРМ-Ц-К2М (изготовлен Харьковской фирмой “Специальные научные разработки”) как среднее значение по данным трех измерений, полученным на образцах перед испытаниями, после нагружения и последующей разгрузки.

Результаты и их обсуждение. Обращает на себя внимание тот факт, что основная пластическая деформация ε образцов при амплитудах циклического отнулевого растяжения несколько выше предела текучести ($\sigma_{0,2} \approx 300$ МПа) наблюдается в начале испытаний при небольшой наработке: в диапазоне $10^3 \dots 10^4$ цикл остаточная деформация образцов изменяется очень мало (таблица). Характер изменения величины H_c согласно данным таблицы аналогичен.

Изменение остаточной деформации и коэрцитивной силы от параметров нагружения

$(\sigma_a)_{\varepsilon=0}$ *, МПа	N , цикл	ε , %	ΔH_c , А/см
318	10^3	1,15	3,85
	10^4	1,45	3,85
348	10^3	1,35	4,60
	10^4	1,40	4,20

* $(\sigma_a)_{\varepsilon=0}$ – амплитуда напряжения в начале испытаний, когда геометрия образца еще не изменилась, т.е. его относительное удлинение $\varepsilon = 0$.

На рис. 2 представлены зависимости истинного напряжения течения от достигнутой пластической деформации ε при статическом нагружении образцов (кривая 1), а также соотношение между истинной амплитудой отнулевого циклического нагружения и достигнутыми значениями пластической деформации после 10^4 цикл (кривая 2).

Видно, что одной и той же деформации статического растяжения соответствуют более высокие значения истинного напряжения. Следует заметить, что при статическом растяжении разрушение происходит при $\varepsilon = 24,3\%$, а соответствующий прирост коэрцитивной силы по отношению к исходному состоянию составляет ≈ 8 А/см (на рис. 2 не показано). При циклическом

отнулевом нагружении получить деформацию более 5,2...6,0% не удастся (образцы разрушаются раньше), при этом максимально достигнутый уровень прироста коэрцитивной силы равен 6,2 А/см.

Таким образом, при статическом растяжении скорость упрочнения образца выше и достигаемый к моменту разрушения уровень упрочнения также выше.

Значительный интерес представляет зависимость прироста коэрцитивной силы ΔH_c^* от достигнутой пластической деформации при статическом и циклическом нагружении (рис. 3).

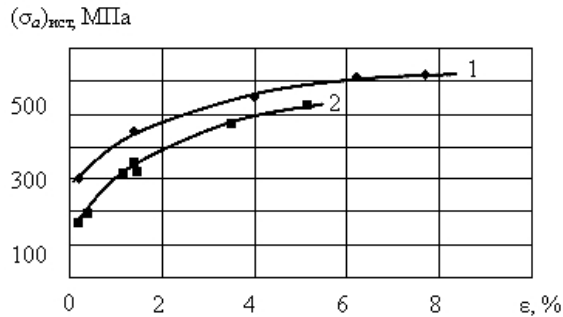


Рис. 2. Зависимость истинного напряжения течения от пластической деформации ϵ .

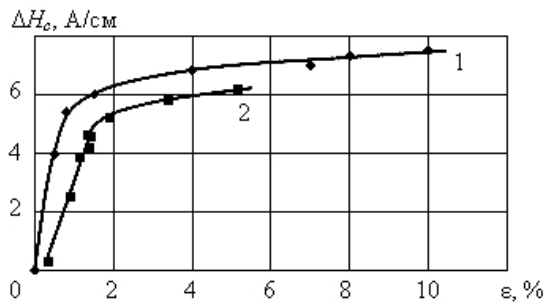


Рис. 3. Зависимость прироста коэрцитивной силы от пластической деформации при статическом (1) и циклическом (2) нагружении.

Из рис. 3 следует, что скорость увеличения ΔH_c с ростом ϵ выше при статическом нагружении, причем наиболее явно это проявляется при малых (до 1...2%) деформациях.

Поскольку при отсутствии остаточного удлинения образцов коэрцитивная сила не изменяется ($\Delta H_c = 0$), можно говорить, что начало повышения H_c совпадает с началом пластического удлинения образца. Далее при циклическом нагружении с увеличением деформации до $\epsilon = 1,6\%$ наблюдается линейный рост ΔH_c , после чего на этой зависимости наступает достаточно резкий перелом (ему соответствует $\Delta H_c = 4,5...5,0$ А/см), и дальнейшее увеличение ΔH_c происходит с существенно меньшей скоростью. Можно предположить, что деформация ϵ в интервале 0,3...1,6% соответствует малоциклового усталости, при $\epsilon = 0$ — многоциклового, при $\epsilon > 1,6\%$ — квазистатическому нагружению.

* Значения ΔH_c определяли после прекращения испытаний образцов.

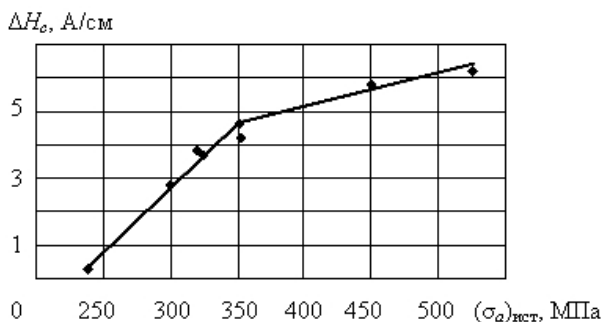


Рис. 4. Зависимость изменения коэрцитивной силы от истинной амплитуды приложенного напряжения.

Данное предположение подтверждает тот факт, что скорость роста ΔH_c в интервале деформации $\varepsilon = 2...5\%$ примерно такая же, как при статическом нагружении (ср. характер кривых 1 и 2 в этом интервале деформаций на рис. 3). Зависимость ΔH_c от истинной амплитуды приложенного напряжения (рис. 4) также подтверждает вышеизложенное.

Из рис. 4 следует, что перелом на указанной зависимости имеет место при $\Delta H_c \approx 4,5...5,0$ А/см. Интервалу $\Delta H_c \approx 0,3...4,8$ А/см соответствует интервал $\sigma = 240...350$ МПа, при этом значение предела текучести стали $\sigma_{0,2} = 300$ МПа находится практически посередине интервала. Это также свидетельствует о том, что рассматриваемый интервал является интервалом деформаций и напряжений, соответствующих малоциклового усталости.

Приведенная на рис. 4 кривая, по-видимому, отражает изменение скорости накопления дефектов в металле: до перелома кривой $\Delta H_c = f((\sigma_a)_{ист.})$ высокие скорости роста ΔH_c и значительные изменения величины ΔH_c соответствуют быстрому накоплению дефектов; после перелома кривой скорость роста ΔH_c существенно снижается, как и сам прирост ΔH_c (4,8...6,2 А/см).

Таким образом, на стадии малоциклового усталости наблюдается высокая скорость накопления дефектов (при сравнительно небольшой величине относительного удлинения), т.е., по сути, можно говорить о значительном упрочнении, хотя и не столь высоком, как при статическом растяжении. Меньшая скорость упрочнения при малоциклового усталости по сравнению с таковой при статическом нагружении, возможно, связана с малой прочностью границ зерен и развитием вследствие этого межзеренного разрушения, большая вероятность которого отмечается в ряде работ [1–3].

Если под дефектами понимать дислокации, то речь может идти о высоких скоростях роста плотности дислокаций и упрочнения на стадии малоциклового усталости. Тогда на стадии квазистатического нагружения можно говорить о снижении скорости упрочнения (сравнительно малый прирост ΔH_c и более высокие пластические деформации).

Причина такого поведения металла на стадии квазистатического разрушения, на наш взгляд, связана с большой интенсивностью как динамического отрыва, так и накопления разрушений при высоких растягивающих напряжениях. Оба процесса обеспечивают значительную релаксацию напряжений и замедление роста ΔH_c .

Следует заметить, что описанная методика позволяет достаточно быстро и надежно определять амплитудные интервалы мало- и многоциклового усталости, а также квазистатического нагружения.

Выводы

1. Коэрцитивная сила образцов из стали ШХ15 в отожженном состоянии в условиях циклического нагружения увеличивается только при наличии макропластической деформации. При $\varepsilon = 0$ имеем $\Delta H_c = 0$.

2. Проведенный анализ позволяет по характеру зависимостей $\Delta H_c - \varepsilon$ и $\Delta H_c - (\sigma_a)_{\text{ист}}$ определять амплитудные и деформационные интервалы реализации мало- и многоциклового усталости, а также квазистатического нагружения.

3. При малоциклового усталости наблюдается высокая скорость накопления дефектов при сравнительно малой величине пластической деформации, хотя скорость эта и не столь высока, как на начальной стадии статического растяжения.

4. Снижение скорости накопления дефектов при переходе к квазистатическому нагружению обусловлено увеличением интенсивности релаксационных процессов при высоких амплитудах напряжений.

5. Критические значения коэрцитивной силы стали ШХ15, соответствующие началу макроразрушения образцов в условиях малоциклового усталости, несколько ниже значений H_c , характерных для начала макроразрушения в условиях статического напряжения.

6. Сделано предположение, что более низкий уровень упрочнения при малоциклового усталости по сравнению со статическим растяжением обусловлен реализацией межзеренного разрушения.

Резюме

Проаналізовано характер зміни коерцитивної сили зразків із відпаленої сталі ШХ15 в умовах статичного розтягання і циклічного віднульового навантаження у широкому діапазоні амплітуд напружень. Установлено можливість швидкого та надійного визначення амплітудних інтервалів мало- і багатоциклової втоми, а також квазістатичного навантаження за рахунок високої чутливості коерцитивної сили до величини залишкової пластичної деформації сталі.

1. *Иванова В. С.* Усталостное разрушение металлов. – М.: Гос. науч.-техн. изд-во по черной и цветной металлургии, 1963. – 272 с.
2. *Троценко В. Т.* Прочность металлов при переменных нагрузках. – Киев: Наук. думка, 1978. – 176 с.
3. *Коцаньда С.* Усталостное растрескивание металлов / Пер. с польск. под ред. С. Я. Яремы. – М.: Металлургия, 1990. – 623 с.

Поступила 12. 04. 2010