

- ¹ К. В. Вакуленко*, канд. техн. наук
¹ И. Б. Казак*, канд. техн. наук
² Г. Я. Безлюдько**, канд. техн. наук
¹ В. Г. Ярещенко*, канд. техн. наук
² Е. И. Елкина**

¹ Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков,

e-mail: matsevlad@ipmach.kharkov.ua

² Фирма «Специальные научные разработки»

г. Харьков, e-mail: mail@snr-ndt.com

Ключові слова: циклічне навантаження, деградація структури, субмікротріщини, коерцитивна сила, поверхнєве пластичне деформування, залікування дефектів.

Введение

Проблема повышения циклической прочности и износостойкости различных изделий является весьма актуальной. Для решения этой проблемы важно затруднить процесс деформации их поверхностного слоя, что достигается различными технологическими методами, в том числе и методами поверхностной обработки (термомеханическая и химикотермическая обработки, поверхностное пластическое деформирование, нанесение различного рода покрытий и т. п.). Поверхностное упрочнение позволяет создать в поверхностном слое материала такое структурное состояние, которое повышает сопротивление зарождению усталостных трещин, препятствуя (или затрудняя) накоплению, движению и выходу на поверхность дефектов кристаллов (дислокации, скопления точечных дефектов, дефекты упаковки и др.).

Не менее важным вопросом является наличие эффективного метода неразрушающего контроля степени деградации структуры материала в процессе эксплуатации. Таким методом является измерение величины коэрцитивной силы, которая является весьма структурно чувствительной характеристикой, отражающей деградацию материала изделия по мере развития и накопления в нем усталостных дефектов. Кроме того, метод весьма прост в эксплуатации, и его практическое применение достаточно широко представлено в работах [например, 1–4].

Целью настоящей работы является определение закономерности изменения коэрцитивной силы в результате деградации структуры образцов из стали 40X в процессе циклического нагружения в исходном состоянии и после поверхностной пластической деформации.

Методика исследований

Для проведения испытаний были использованы цилиндрические образцы из стали 40X в состоянии поставки (нормализация), размеры рабочей части образцов – диаметр 8 мм и длина 100 мм. Твердость стали составила *HV* 1900 – 2000 МПа.

Испытания проводились на универсальной испытательной машине типа МУИ-30 с гидравлическим пульсатором. Схема испытаний обеспечивает осевое приложение растягивающей нагрузки при знакопостоянном цикле нагружения. Коэффициент асимметрии цикла принят равным 0,3. Испытания осуществляли в воздушной среде при комнатной температуре. Частота нагружения составляла 11,4 Гц. Критерием окончания испытаний являлось достижение заданного числа циклов (в нашем случае $5 \cdot 10^6$ циклов) или полное разрушение образца с фиксацией количества циклов разрушения.

На всех исследуемых образцах осуществляли измерения коэрцитивной силы с помощью коэрцитиметра КРМ-Ц.

УДК 620.178.32,620.179.141:620191.33,539.4, 539.61

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭРЦИТИВНОЙ СИЛЫ ПРИ УСТАЛОСТНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ОБРАЗЦОВ ИЗ СТАЛИ 40X

Досліджено вплив циклічного навантаження та подальшого поверхневого пластичного деформування на змінення коерцитивної сили нормалізованої сталі 40X. Встановлено, що в результаті циклічного навантаження коерцитивна сила збільшується в 1,5–2 рази в усьому інтервалі навантажень, при цьому найбільш суттєвий приріст H_c відзначено при малих значеннях пластичної деформації. Поверхнєве пластичне деформування зразків, які частково вичерпали свою довговічність, приводить до зниження коерцитивної сили. Запропонована гіпотеза, що цей ефект пов'язаний із залікуванням субмікронесуцільностей в структурі матеріалу, набутих в процесі циклічного навантаження.

Усталостные испытания производили на двух партиях образцов. Образцы из второй партии испытывали при тех же амплитудах напряжения, что и в первой партии, но сами испытания осуществляли в два этапа. После того как образец при определенной амплитуде напряжения простоял некоторое количество циклов, его разгружали и снимали с испытательной машины. Затем на данном образце измеряли коэрцитивную силу, которая, как указывалось выше, является мерой степени деградации материала в результате накопления в нем усталостных повреждений. Кроме того, на этом этапе определяли относительное удлинение (деформацию) образцов. Выбор количества циклов на I этапе испытаний, соответствующий ~40%-й долговечности образца, осуществлялся на основании классификации стадий усталости, предложенной В. С. Ивановой. При отработке ~40% ресурса материал чаще всего находится на II стадии усталости, длительность которой составляет от 20 до 50% от общего числа циклов до разрушения [5]. На этой стадии происходит разрыхление материала, связанное с зарождением и развитием субмикротрещин (т. е. дефектов, которые еще могут быть залечены различными видами обработки).

После этого образцы подвергали поверхностной пластической деформации (наклепу) с использованием бойкового инструмента с электромеханическим приводом. Частота удара бойка составляла ~300 Гц.

На обработанных таким образом образцах затем опять измеряли коэрцитивную силу, после чего образцы снова устанавливали на испытательную машину и испытания были продолжены на соответствующем для каждого образца уровне напряжений.

Результаты и их обсуждение

Результаты испытаний образцов в исходном состоянии (нормализация) представлены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры испытаний и значения коэрцитивной силы для образцов I партии

σ_{\max} , МПа	Количество циклов	Значение коэрцитивной силы H_c , А/см		ΔH_c , А/см
		до испытаний	после испытаний	
600	7500	6,8	14,3	7,5
560	26000	6,6	13,4	6,8
530	270000	6,5	13,0	6,5
500	650000	9,3	15,0	5,7
460	700000	6,7	12,5	5,8
440	1500000	6,8	12,2	5,4
420	5000000	8,8	17,2	8,4

Анализ данных таблицы свидетельствует о том, что у всех образцов после испытаний повышается значение коэрцитивной силы. Увеличение коэрцитивной силы в исследованном диапазоне амплитуд нагружения составило от 60 до 110%.

На рис. 1 представлены данные по изменению коэрцитивной силы от относительного удлинения (деформации) в условиях циклического нагружения.

Как видно из рисунка, циклическое нагружение уже на начальном этапе приводит к существенному возрастанию ΔH_c – от 0 до ~4,8–5,5 А/см, что составляет от 54 до 67% от величины H_c образцов до испытаний. Величина деформации образцов при этом изменяется от 1 до 1,5%. При деформациях $\varepsilon > 1,5\%$ наблюдается перелом, и дальнейший прирост ΔH_c происходит с более низкой скоростью – ΔH_c изменяется от 5,5 до 7,9 А/см. Поскольку при отсутствии остаточного удлинения образцов коэрцитивная сила не изменяется ($\Delta H_c = 0$), то можно говорить, что начало ее роста совпадает с нача-

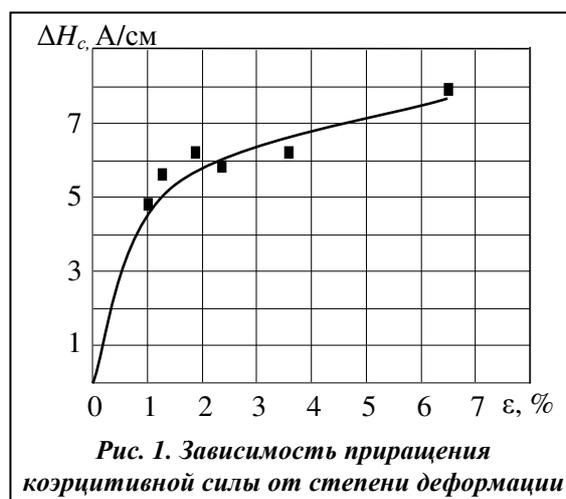


Рис. 1. Зависимость приращения коэрцитивной силы от степени деформации

лом пластического удлинения образца.

Физически кривая отражает изменение скорости накопления дефектов в металле. Высокие скорости роста ΔH_c и значительные изменения величины ΔH_c свидетельствуют о быстром накоплении повреждений в металле, что характерно для малоциклового усталости. При $\varepsilon = 0$ реализуется многоцикловая усталость.

В табл. 2 представлены результаты измерений коэрцитивной силы на образцах II партии после наработки некоторого количества циклов и последующей поверхностной обработки.

Таблица 2. Изменение коэрцитивной силы для образцов после I этапа испытаний и последующей поверхностной обработки (II партия)

σ_{\max} , МПа	H_c^0 , А/см	H_c после I этапа испытаний, А/см	H_c после поверхностной обработки, А/см
440	8,9	13,7	12,4
460	8,4	14,0	12,8
500	9,1	15,6	13,7
530	6,8	12,7	10,6
580	7,9	15,5	12,9

Как следует из приведенных в табл. 2 результатов, на всех образцах после I этапа нагружения (отстоявших ~40% долговечности) произошло повышение H_c , т. е. абсолютный прирост H_c составил от 4,8 до 7,6 А/см. В процентном соотношении коэрцитивная сила на этом этапе испытаний увеличилась на ~54 – 96%. При этом наблюдается увеличение прироста коэрцитивной силы с повышением амплитуды нагружения.

В результате поверхностной обработки образцов II партии после I этапа нагружения произошло снижение H_c от 1,2 до 2,6 А/см, что составило соответственно от 9 до 17%. Наблюдается тенденция к более существенному снижению H_c после поверхностной обработки на образцах, испытывавшихся при более высоких амплитудах ($\sigma_{\max} > 500$ МПа).

После поверхностной обработки образцы II партии снова подвергались циклическому нагружению при соответствующих амплитудах с последующим измерением H_c по окончании испытаний.

Итоговые результаты измерений H_c для образцов II партии, подвергнутых поверхностному пластическому деформированию и прошедших двухстадийные испытания, приведены в табл. 3.

После окончания испытаний прирост коэрцитивной силы по сравнению с исходными значениями увеличился во всем диапазоне исследованных напряжений от 4,4 до 7,4 А/см, что составило от 49 до 94%.

Таблица 3. Параметры испытаний и значения коэрцитивной силы для образцов II партии

σ_{\max} , МПа	Количество циклов	Значение коэрцитивной силы H_c , А/см		ΔH_c , А/см
		до испытаний	после испытаний	
440	5000000	8,9	13,3	4,4
460	5000000	8,4	13,2	4,8
500	2900000	9,1	15,0	5,9
530	1030000	6,8	13,2	6,4
580	700000	7,9	15,3	7,4

Что касается сравнения образцов из обеих партий в плане полученных значений коэрцитивной силы, то можно отметить следующее. Увеличение H_c после испытаний по сравнению с исходными значениями для обеих партий в среднем составляет от 50 до 100%.

Результаты усталостных испытаний (см. табл. 1 и 3) свидетельствуют о том, что проведенная промежуточная поверхностная обработка образцов II партии позволила повысить их долговечность в 2,8–3,4 раза.

Полученный в результате усталостных испытаний обеих партий образцов рост значений коэрцитивной силы характеризует увеличение степени накопления усталостных повреждений в струк-

туре материала (количество точечных дефектов, плотность дислокаций, субмикро- и микронесплошностей, возникновение неоднородности структуры, формирование субструктуры и т.д.), приводящих в конце концов к разрушению материала. Возрастание коэрцитивной силы от начального значения до критического (соответствующего пределу прочности) как при статическом, так и циклическом нагружении было зафиксировано для ряда малоуглеродистых и низколегированных сталей в работах [6–9], а также для сталей с более высоким содержанием углерода и легирующих элементов [10–12]. Анализ полученных результатов однозначно свидетельствует о высокой чувствительности коэрцитивной силы к изменениям структурного состояния материала в результате накопления усталостных повреждений при упруго-пластической деформации.

Вызывают интерес результаты, полученные в экспериментах по изучению влияния поверхностной обработки частично деградированного материала на изменение коэрцитивной силы (табл. 2).

Уменьшение величины коэрцитивной силы после поверхностного пластического деформирования может свидетельствовать о залечивании элементов разрушения структуры материала, накопленных в результате циклического нагружения на первом этапе испытаний.

О возможности залечивания поверхностных дефектов под воздействием деформаций в условиях наложения сильного гидростатического сжатия материала свидетельствуют результаты, полученные в работе [13]. Проведенные авторами эксперименты указывают на залечивание в материале заранее созданных пор и субмикротрещин при деформации под гидростатическим давлением. Авторы считают, что в этих условиях происходит не только залечивание имеющихся трещин, но и подавление зарождения новых. Механизм залечивания авторы объясняют следующим образом: внешнее давление, подавляя силы, стремящиеся раскрыть трещину, не позволяет этой трещине разрастаться и создает возможность образования все большего числа контактных мостиков между противоположными выступами. В точках контакта вследствие высоких контактных напряжений и взаимного проскальзывания происходит восстановление несплошностей, аналогичное так называемой холодной сварке.

Здесь необходимо подчеркнуть, что условия пластической деформации при гидростатическом сжатии с точки зрения схватывания (адгезии) являются идеальными [14, 15]. По нашему мнению, гидростатическое давление способствует сближению атомов на различных берегах субмикротрещин, приводя к повышению вероятности перекрытия их валентных орбиталей и способствуя ускорению процесса залечивания дефекта.

Залечивание дефектов происходит также в условиях импульсного механического воздействия на металл, когда имеет место аномальный массоперенос (АМП) [16]. Единичный импульс, приходящийся на небольшой объем металла, может инициировать лавинообразный процесс распространения химической адгезии на смежные области, что приводит к залечиванию дефектов в большем объеме твердого тела. Для достижения эффективного и управляемого залечивания дефектов и формирования упрочненного структурного состояния с повышенной пластичностью необходимо осуществить подбор оптимальной энергии импульсного воздействия на материал и переход от единичного импульса к многократному с оптимизированной частотой.

При ударном механическом воздействии происходит деформация поверхностного слоя материала, при которой развиваются высокие динамические напряжения. В центре ковочных ударов под поверхностью стали эти напряжения имеют значительную гидростатическую составляющую, что, как уже указывалось выше, может способствовать залечиванию субмикротрещин. Подтверждением этому служит снижение значений H_c в результате поверхностной обработки образцов II партии после наработки некоторого количества циклов (см. табл. 2). В обработанном поверхностном слое вследствие аннигиляции дислокаций и ликвидации субмикротрещин происходит увеличение концентрации вакансий в прилегающих объемах металла в результате растворения пустот. Это, в свою очередь, должно способствовать активизации процессов самодиффузии, ускорению переползания дислокаций (даже при комнатной температуре) и формированию новых границ и диспергированию структуры.

В работах [17, 18] рассмотрены наиболее важные аспекты процесса пластической деформации и разрушения металлов с учетом зарождения, развития, а также залечивания несплошностей в металле с учетом современной теории адгезии твердых тел.

По нашему мнению, на способность к залечиванию несплошностей существенное влияние оказывает несколько факторов – напряженное состояние, температура деформации и природа твердого тела [17].

Чем выше сжимающие напряжения и температура деформации, тем выше вероятность залечивания несплошностей (т.е. восстановление разрушенных межатомных связей) в результате перекрытия валентных орбиталей атомов, находящихся на разных берегах несплошности.

Что касается природы твердого тела, то она достаточно полно может быть охарактеризована статистическим весом атомов со стабильными электронными конфигурациями (СВАСК) и стабильностью валентных электронных конфигураций, а также количеством коллективизированных электронов. Эти параметры определяют кристаллическую структуру твердого тела, тип и энергию межатомных связей, энергию дефекта упаковки, которые существенно влияют на формирование дислокационной структуры деформированного металла.

Для материалов с высоким СВАСК и стабильностью самих валентных электронных конфигураций твердого тела затрудняется разрыв межатомных связей (такие тела характеризуются высокими значениями прочности). В этом случае залечивание субмикротрещин (субмикронесплошностей) также затруднено, поскольку для перекрытия валентных орбиталей атомов, лежащих на противоположных берегах, необходимы либо очень высокие сжимающие напряжения, либо весьма высокие амплитуды колебаний поверхностных атомов (нужен сильный разогрев).

Залечивание несплошностей в сплавах затруднено в случае их образования на границах металлической и неметаллической фаз (карбиды, включения фосфидов, оксидов и др. в металлической матрице, границы фаз – феррит и цементит в перлите, например), а также при проникновении элементов окружающей среды (например, кислорода) на поверхности несплошностей с образованием на них экранирующих пленок.

Таким образом, исследование кинетики увеличения концентрации поверхностных несплошностей металла дает возможность прогнозирования его долговечности. Можно также говорить о том, что долговечность является функцией способности металла залечивать имеющиеся несплошности.

Учитывая вышеизложенное, можно говорить о том, что существует реальная возможность использовать различного рода поверхностные обработки для залечивания дефектов изделий, бывших в эксплуатации и нуждающихся в снижении уровня деградации металла с целью продления их ресурса. Подобного рода обработки могут применяться и для новых (еще неэксплуатируемых) изделий для залечивания дефектов поверхности, возникших в результате их изготовления.

Заключение

Исследовано влияние циклического нагружения и поверхностной пластической деформации на изменение коэрцитивной силы образцов из нормализованной стали 40Х. Установлено, что при циклическом нагружении значения коэрцитивной силы увеличиваются во всем диапазоне используемых нагрузок от 1,5 до 2 раз. Анализ зависимости прироста коэрцитивной силы от степени деформации свидетельствует о том, что наиболее существенное увеличение H_c происходит на начальных стадиях деформации (до 1 – 1,5 %). Обнаружено, что поверхностное пластическое деформирование образцов, прошедших предварительное циклическое нагружение, приводит к снижению коэрцитивной силы. Высказано предположение, что это связано с залечиванием субмикронесплошностей. Такое предположение базируется на современных представлениях о возможности залечивания дефектов в условиях ударного воздействия на поверхность материала изделия. Проведенная поверхностная обработка образцов с частично деградированной структурой после I этапа усталостных испытаний позволила повысить их долговечность в 2,8 – 4 раза.

Литература

1. *Обзорная оценка состояния и детальная экспертиза усталости металла больших размеров объектов и конструкций неразрушающим коэрцитиметрическим методом* / Г. Я. Безлюдько, О.П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко, А. Ю. Марченко, Р. Н. Соломаха // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2012. – № 3. – С. 57–65.
2. *Магнитный контроль и структурно-текстурные особенности металла кислородных баллонов* / Л. М. Лобанов, В. А. Нехотящий, М. Д. Рабкина и др. // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2011. – № 1. – С. 7–12.

3. *Безлюдько, Г. Я.* Радикальное улучшение оценки текущего состояния кислородных баллонов применением метода коэрцитивной силы (по результатам исследований 1990–2000 гг.) / Г. Я. Безлюдько, Е. И. Елкина, Б. Е. Попов // В мире неразрушающего контроля. – 2009. – № 3. – С. 34–35.
4. *Осташ, О. П.* Діагностування структурно-механічного стану сталей парогонів коерцитиметричним методом і прогнозування їх ресурсу / О. П. Осташ, О. В. Вольдемаров, П. В. Гладиш // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2013. – № 5. – С. 98–111.
5. *Иванова, В. С.* Усталостное разрушение металлов / В. С. Иванова – М.: Гос. науч.-техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1963. – 272 с.
6. *Бида, Г. В.* Размер зерна и корреляция прочностных пластических и вязких свойств с коэрцитивной силой феррито-перлитных сталей / Г. В. Бида // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – 2010. – № 4. – С. 40–44.
7. *Оценка* структурообразования при деформации малоуглеродистых сталей / Т. С. Скобло, Г. Я. Безлюдько, А. И. Сидашенко и др. // Сталь. – 2014. – № 9. – С. 65–70.
8. *Магнитная* диагностика и остаточный ресурс подъемных сооружений / Б. Е. Попов, В. С. Котельников, А. В. Зарудный, Е. А. Левин, Г. Я. Безлюдько // Безопасность труда в промышленности. – 2011. – № 2. – С. 44–49.
9. *Влияние* температуры конца прокатки и степени обжатия на механические свойства и коэрцитивную силу стали 3 сп / Э. В. Аронсон, Г. В. Бида, В. М. Камардин, М. Н. Михеев, Д. М. Понер // Дефектоскопия. – 1977. – № 4. – С. 99–104.
10. *Некоторые* закономерности изменения коэрцитивной силы пластических (незакаленных) сталей при активном растяжении / В. М. Мацевитый, Г. Я. Безлюдько, К. В. Вакуленко, И. Б. Казак, В. В. Карабин // Вестн. НТУ «ХПИ». Технологии в машиностроении. – 2010. – № 25. – С. 19–24.
11. *Способность* к перемагничиванию стали 14X17H2 после термообработки,ковки и циклического нагружения / В. М. Мацевитый, Г. Я. Безлюдько, Е. В. Белоус, К. В. Вакуленко, И. Б. Казак // Пробл. машиностроения. – 2009. – Т. 12, № 4. – С. 79–85.
12. *Изменение* коэрцитивной силы при статическом растяжении и циклическом нагружении образцов из стали ШХ15 / В. М. Мацевитый, Г. Я. Безлюдько, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко, Е. В. Белоус // Пробл. прочности. – 2012. – № 3. – С. 151–155.
13. *Пластичность* и прочность твердых тел при высоких давлениях / Б. И. Береснев, Е. Д. Мартынов, К. П. Родионов, Д. К. Булычов, Ю. Н. Рябинин. – М.: Наука, 1969. – 161 с.
14. *Мацевитый, В. М.* Физико-технические аспекты адгезии твердых тел / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко. – Киев: Наук. думка, 2010. – 253 с.
15. *Вакуленко, К. В.* Обобщенная концепция адгезии твердых тел / К. В. Вакуленко, В. М. Мацевитый, И. Б. Казак // Восточ.-Европ. журн. передовых технологий. – 2008. – № 4/2 (34). – С. 13–23.
16. *Аномальное* ускорение диффузии при импульсном нагружении металлов // Л. Н. Лариков, В. М. Фальченко, В. Ф. Мазанко и др. // Докл. АН СССР. – 1975. – Т. 221, № 5. – С. 1073–1075.
17. *К физическому* механизму разрушения металлов / В. М. Мацевитый, И. Б. Казак, К. В. Вакуленко и др. // Пробл. машиностроения. – 2008. – Т. 11, № 5–6. – С. 87–96.
18. *Мацевитый, В. М.* О залечивании дефектов в металлах при пластической деформации / В. М. Мацевитый, К. В. Вакуленко, И. Б. Казак // Пробл. машиностроения. – 2012. – Т. 15, № 1. – С. 66–76.

*Светлой памяти
доктора технических наук, профессора
Владимира Михайловича Мацевитого,
чьи научные разработки послужили
основой для этой работы, посвящается*

Поступила в редакцию 19.03.15