

КОЭРЦИТИВНАЯ СИЛА ТЕРМОУПРОЧНЕННОЙ СТАЛИ 14X17H2 ПОСЛЕ КОВКИ И ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

В.М. Мацевитый, д-р техн. наук, Институт проблем машиностроения
им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Харьков, Украина,
Г.Я. Безлюдько, канд. техн. наук, фирма „Специальные научные разработки”, Харьков,
Украина

Введение

Одной из наиболее актуальных технических проблем начала XXI века является проблема оценки остаточного ресурса находящегося в эксплуатации оборудования. Актуальность проблемы объясняется существенной изношенностью парка металлоконструкций и исчерпанием ресурсных сроков их эксплуатации.

В решении указанной проблемы можно выделить 2 основных подхода: использование расчетных методов механики деформированного твердого тела и анализ структурного состояния материала конструкции. Одним из основных методов анализа структурного состояния материала, который хорошо зарекомендовал себя при решении конкретных эксплуатационных задач, является метод коэрцитивной силы, реализующийся на приборах, разработанных фирмой «Специальные научные разработки» (г. Харьков) [1]. Следует обратить внимание на то, что до сих пор подобные задачи решаются применительно к конструкциям, изготовленным, как правило, из сталей в состоянии поставки, имеющих малоискаженную кристаллическую структуру, низкий уровень прочности и значительный запас пластичности. Для таких материалов при эксплуатации характерно существенное возрастание коэрцитивной силы, при этом по достижении некоторого критического значения H_c эти материалы разрушаются, что, собственно говоря, и позволяет с помощью измерений H_c материала эксплуатируемой детали в точках, наиболее подверженных концентрации напряжений, судить о степени деградации металла и о необходимости замены соответствующей детали и её ремонте.

Нужно отметить, что основную массу конструкций, нуждающихся в подобном мониторинге, составляют именно высокопластичные стали. Поэтому метод измерения коэрцитивной силы стал весьма востребованным при решении большого числа конкретных задач надежности и безопасной эксплуатации электростанций, трубопроводов, насосных станций, корпусов кораблей и других важных объектов.

В какой мере этот метод может быть использован при анализе структурного состояния сталей, находящихся в упрочненном состоянии, например, в результате упрочняющей термообработки? Этот вопрос далеко не праздный, поскольку существует необходимость решения и таких задач, например, при оценке состояния крупногабаритных деталей турбин. Для ответа на него необходимо знать, каким образом изменяется коэрцитивная сила таких сталей при статических и циклических нагрузках. Поскольку получить такую информацию из литературных источников нам не удалось, исследование этого вопроса и составило цель настоящей работы.

Методика исследования

Исследование проведено на стали 14X17H2 (см. ниже её химический состав), которая является нержавеющей жаропрочной сталью мартенсито-ферритного класса и имеет широкое применение, в частности, для изготовления рабочих лопаток турбин.

Химический состав стали 14X17H2 (%)

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Ti	Cu
0,11 – 0,17	до 0,8	до 0,8	1,5 – 2,5	до 0,025	до 0,03	16 – 18	до 0,2	до 0,3

Сталь была поставлена в виде листа толщиной 6 мм, который распустили гильотинными ножницами на прямоугольные заготовки 180x50 мм. Из этих заготовок были изготовлены образцы толщиной 5 мм для испытаний с припуском на шлифование после термообработки.

Режим термообработки образцов: нагрев до 1050 °С, выдержка 40 минут, закалка в масле, отпуск в течение двух часов при 650 °С с последующим охлаждением в воде.

После термообработки образцы были шлифованы со всех сторон на глубину 0,5 мм. После термообработки сталь имеет твердость HB 2000 МПа, $\sigma_{0,2} = 635$ МПа и $\sigma_b = 835$ МПа.

Коэрцитивную силу измеряли на структуроскопе - коэрцитиметре КРМ-Ц-К2М, изготовленном фирмой «Специальные научные разработки». Эту характеристику измеряли на рабочей части образцов после их термической обработки, а также последующей деформации ковкой и циклическим растяжением-сжатием на универсальной испытательной машине типа МУП-30 с гидравлическим пульсатором. Цикл нагружения – знакопостоянный. Рабочее усилие создается гидравлическим насосом высокого давления. Пульсатор представляет собой бесклапанный одноплунжерный гидравлический насос, предназначенный для создания на испытываемом образце переменных циклических нагрузок. Контроль нагружения осуществляли по показаниям специального силоизмерительного устройства¹⁾.

Испытания проводили в соответствии с ГОСТ 25.507-79 «Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость» и ГОСТ 25.507-85 «Методы испытаний на усталость при эксплуатационных режимах нагружения. Общие требования».

Коэффициент асимметрии цикла был принят равным 0,3. Частота нагружения составляла 5,8 Гц при испытаниях на малоцикловую усталость и 11,4 Гц – при испытаниях на многоцикловую усталость.

Испытания осуществляли в воздушной среде при комнатной температуре в основном при двух амплитудах: при амплитуде $\sigma_{max} = 725$ МПа (среднее напряжение $\sigma_{cp} = 471$ МПа, минимальное напряжение $\sigma_{min} = 217$ МПа) и при амплитуде $\sigma_{max} = 438$ МПа (среднее напряжение $\sigma_{cp} = 284,7$ МПа, а минимальное напряжение $\sigma_{min} = 131,4$ МПа). Некоторое количество испытаний проведено и при других амплитудах.

Обратим внимание на то, что в процессе испытаний образцы находятся все время при растягивающих напряжениях различной, меняющейся со временем величины.

Результаты и их обсуждение

Испытания показали, что коэрцитивная сила, измеренная на пластинах, вырубленных из листовой стали в состоянии поставки, равна ~ 13,6 А/см. После термообработки H_c существенно возрастает и находится в интервале значений 20,5 – 22 А/см. При этом имеет место некоторое снижение твердости стали по Бриннелю от 2100 МПа в состоянии поставки до 2000 МПа после термообработки.

Имеющийся разброс значений H_c после термообработки говорит о некоторой неидентичности условий термообработки для образцов партии. В связи с этим об изменении H_c термообработанных образцов в результате последующих нагружений судили по измерениям, проведенным на каждом образце отдельно.

Несколько образцов после термообработки были прокованы на наковальне при комнатной температуре с толщины 4 мм до разных толщин, после чего были измерены значения H_c образцов и проанализировано влияние на H_c степени деформации ковкой (рис.1). Как видно из рис.1, коэрцитивная сила стали в результатековки достаточно резко снижается при малых степенях деформации, затем скорость снижения H_c уменьшается, и при деформациях > 8 % коэрцитивная сила остается примерно на одном уровне (~ 16 А/см).

Максимальное снижение H_c в результатековки составляет 5 А/см, при этом микротвердость стали в результатековки практически не изменяется.

¹⁾ Испытательная машина МУП-30 позволяет создавать максимальную статическую нагрузку 300 кН и максимальную циклическую нагрузку 150 кН с погрешностью ± 1 %.

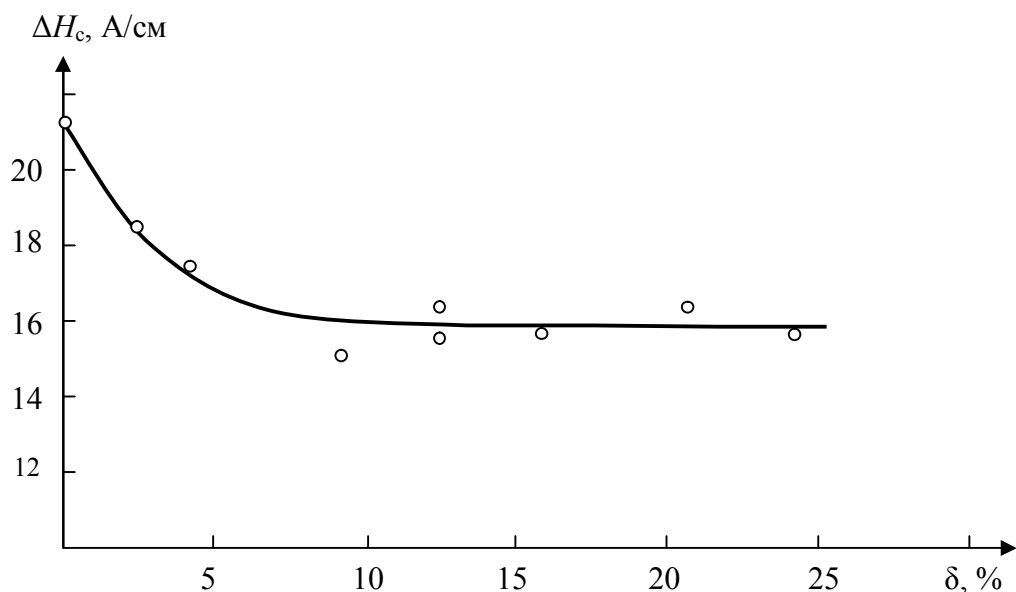


Рис. 1. Зависимость H_c стали 14X17H2 после термообработки от степени последующей деформации ковкой при комнатной температуре

На рис.2 представлены кривые зависимости прироста коэрцитивной силы от количества циклов нагружения при двух амплитудах $\sigma_{\max} = 725$ МПа (кривая 1) и $\sigma_{\max} = 438$ МПа (кривая 2). Первая амплитуда взята выше значений предела текучести стали, а вторая – ниже. Это обстоятельство, а также количество циклов до разрушения, выдерживаемое образцами при указанных амплитудах, свидетельствует о том, что первая амплитуда позволяет реализовать малоцикловую усталость, а вторая – многоцикловую.

Как видно из рис.2, циклическое нагружение при $\sigma = 725$ МПа приводит к быстрому возрастанию H_c примерно на 5 А/см, что составляет $\sim 25\%$ от величины H_c после термообработки. Это увеличение реализуется в интервале от 1 до $10^3 - 10^4$ циклов, после чего при дальнейших испытаниях ΔH_c уменьшается и разрушение образцов происходит при меньших значениях H_c (уровень ΔH_c к моменту разрушения образцов составляет 3,5 – 4 А/см).

При малой амплитуде нагружения ($\sigma_{\max} = 438$ МПа) также имеет место возрастание коэрцитивной силы, но на меньшую величину (максимальный прирост H_c в этом случае достигает $\Delta H_c = 3$ А/см). Этот рост происходит сначала быстро, а затем при увеличении числа циклов нагружения от 10^4 до 10^5 – с меньшей скоростью. При дальнейшем увеличении числа циклов наблюдается некоторое снижение ΔH_c , и разрушение образцов может наступить при значениях $\Delta H_c \sim 2,0$ А/см.

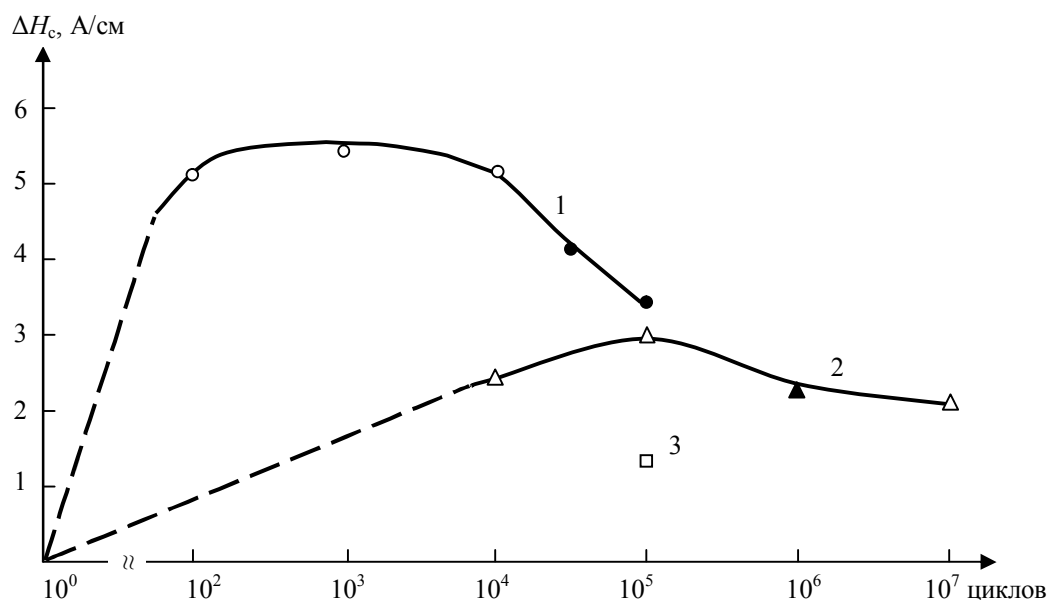


Рис. 2. Зависимость прироста коэрцитивной силы от количества циклов нагружения (закрашенные точки соответствуют разрушенным образцам).

Поскольку испытания с большими амплитудами осуществляли при частоте 5,8 Гц, а с малыми амплитудами – при 11,4 Гц, то следовало бы выяснить, какой из этих двух факторов (амплитуда или частота) сильнее влияет на скорость увеличения H_c с ростом количества циклов. Для ответа на этот вопрос было испытано несколько образцов тоже с амплитудой 438 МПа, но при частоте нагружения 5,8 Гц. Оказалось, что при этой частоте прирост коэрцитивной силы происходит еще медленнее (соответствующая точка отмечена цифрой 3 и соответствует 10^5 циклов). Таким образом, более быстрое возрастание H_c с увеличением числа циклов при больших амплитудах (по сравнению с малыми) происходит в связи с величиной самой амплитуды.

По положению точки 3 можно также предположить, что при одинаковых амплитудах нагружения чем выше частота нагружения, тем быстрее происходит рост коэрцитивной силы.

На рис.3 представлен прирост коэрцитивной силы, достигаемый после $10^5 - 10^6$ циклов, в зависимости от амплитуды нагружения σ_{\max} .

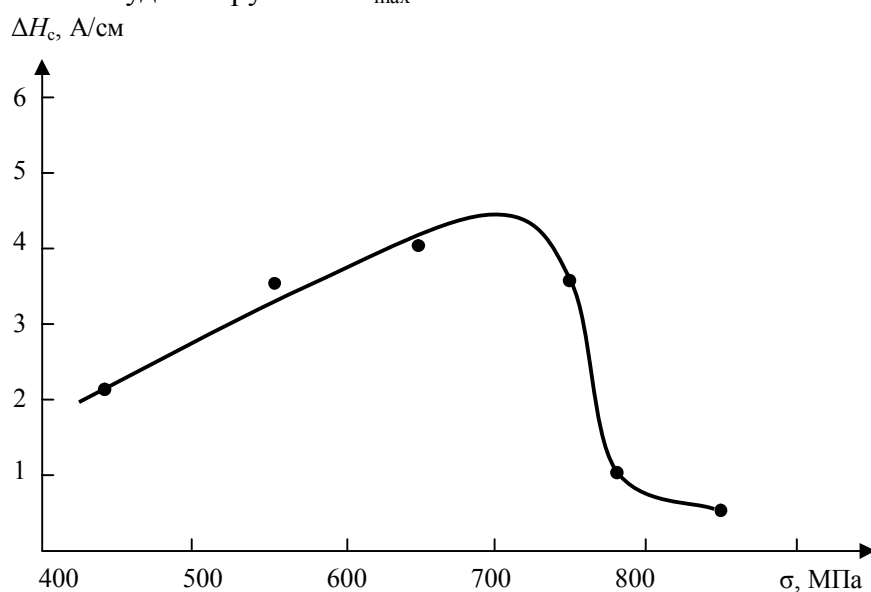


Рис. 3. Зависимость прироста коэрцитивной силы разрушенных образцов от амплитуды нагружения

Видно, что с увеличением амплитуды ΔH_c сначала возрастает (до $\sigma_{\max} = 725$ МПа), а при более высоких σ_{\max} резко снижается.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что коэрцитивная сила стали является сложной функцией амплитуды, количества циклов и частоты нагружения.

Попробуем объяснить некоторые из полученных результатов.

Прежде всего – о снижении коэрцитивной силы термообработанной стали в результате еёковки.

Ковка – это, как известно, один из способов пластической деформации металла, который широко используется в производстве. В зависимости от состояния металла перед ковкой можно получить различное по величине упрочнение (наклеп), а в случае сильно упрочненного состояния (за счет предварительной пластической деформации, либо термообработки) в результатековки можно получить разупрочнение. В рассматриваемом случае мы обнаруживаем отсутствие упрочнения в результатековки (микротвердость стали практически не изменилась), но фиксируем существенное уменьшение коэрцитивной силы. Этот эффект – свидетельство большей структурной чувствительности коэрцитивной силы по сравнению с твердостью. Что касается физических причин такого поведения коэрцитивной

силы, то можно предположить, по крайней мере, две. Во-первых, это дальнейший распад мартенсита, который не был завершен при высоком отпуске закаленной стали. Прохождение же дислокаций при ковке по такому мартенситу может способствовать дальнейшему уходу углерода из α -твердого раствора. Во-вторых, понижение коэрцитивной силы при ковке может быть связано с некоторым снижением плотности дислокаций по причине динамического отдыха, а также залечивания субмикротрещин, образовавшихся ранее при закалке. Деформация ковкой, при которой развиваются высокие динамические напряжения, имеющие значительную гидростатическую составляющую под поверхностью стали в центре ковочных ударов, может способствовать залечиванию субмикротрещин, в этих условиях в результате аннигиляции дислокаций, а также ликвидации субмикротрещин должна увеличиваться концентрация вакансий в соседних объемах металла (в результате растворения пустот). Это приводит к повышению коэффициента самодиффузии, что обеспечивает ускоренное переползание дислокаций (даже при комнатной температуре) и способствует формированию новых границ и диспергированию структуры.

При схеме циклического нагружения, использованной в настоящей работе, гидростатической составляющей в металле нет. Возможно, поэтому мы и наблюдаем увеличение коэрцитивной силы, причем достаточно интенсивное (по отношению к количеству циклов нагружения). Это увеличение разумно связать как с дальнейшим увеличением плотности дислокаций, так и с ростом концентрации несплошностей (субмикротрещин), тем более, что, как показано в ряде работ [см., например, 2–3] основное изменение дефектной структуры при усталости происходит как раз в начальной стадии нагружения (после достижения $\sim 5\%$ от общей деформации металла от начала до полного разрушения). Далее, по мере накопления дислокаций и несплошностей в металле начинают преобладать процессы разупрочнения (динамического отдыха), что интегрально ведет к снижению внутренних напряжений и коэрцитивной силы, после чего быстро развивается и макроразрушение.

Здесь важно отметить, что чем выше амплитуда колебаний, тем быстрее растет H_c , быстрее достигает своего насыщения и раньше начинает уменьшаться. Если амплитуда напряжения достигает критического значения (в наших экспериментах – при $\sigma_{\max} = 700 - 725$ МПа), то дальнейшее увеличение амплитуды приводит к резкому снижению коэрцитивной силы и быстрому разрушению металла.

При малых амплитудах процесс упрочнения и накопления элементов разрушения идет весьма медленно и в значительно меньших масштабах: как следствие, рост коэрцитивной силы мал. При таких амплитудах разрушение может произойти либо при очень большом количестве циклов, либо вообще не произойти (скорости процессов упрочнения и разупрочнения становятся равными).

В целом, учитывая величину изменения коэрцитивной силы при циклических нагружениях, можно сказать, что определение критического состояния металла конструкции из стали 14X17H2 после закалки, высокого отпуска и последующего циклического нагружения с большими и малыми амплитудами принципиально возможно при условии обязательного периодического проведения достаточно точных измерений H_c в течение всего периода эксплуатации оборудования. Разработка методики такого мониторинга – это отдельная задача, которую следует решать применительно к конкретному оборудованию с учетом режима его предполагаемой эксплуатации.

Заключение

Исследовано влияниековки и циклического нагружения на коэрцитивную силу образцов из стали 14X17H2 после закалки и высокого отпуска. При этом получены следующие результаты.

1. Установлено, что коэрцитивная сила стали при ковке существенно уменьшается. Высказано предположение, что связан этот эффект с залечиванием субмикронесплошностей и развитием процессов динамического отдыха.

2. Установлено, что при циклическом нагружении стали после термообработки H_c является сложной функцией амплитуды, частоты и количества циклов нагружения.

3. Показано, что при циклическом нагружении стали после термообработки коэрцитивная сила быстро растёт, причем чем выше амплитуда, тем быстрее происходит этот рост. При дальнейших испытаниях коэрцитивная сила достигает максимума, после чего уменьшается. При больших амплитудах при этом наступает разрушение, а при малых амплитудах разрушение может наступить после 10^6 и 10^7 циклов либо может не наступить вовсе.

4. Высказано предположение, что увеличение H_c при циклическом нагружении стали после термообработки связано с накоплением субмикротрещин, а также с упрочнением участков металла, свободных от элементов разрушения. Последующее снижение H_c (после достижения максимума) связано с развитием процессов динамического отдыха и микроразрушения.

5. Обнаруженные закономерности изменения коэрцитивной силы под влиянием циклического нагружения свидетельствуют о принципиальной возможности использования прецизионной коэрцитиметрии для анализа состояния металла конструкций из стали 14X17H2.

Литература

1. *Безлюдько Г.Я.* Эксплуатационный контроль усталостного состояния и ресурса металлопродукции неразрушающим магнитным (коэрцитиметрическим) методом // Техн. диагностика и неразрушающий контроль. – Киев, 2003. – №2. – С. 20 – 26.

2. *Черемской П.Г.* Поры в твёрдом теле / П.Г. Черемской, В.В. Слезов, В.И. Бетехтин – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 376с.

3. *Иванова В.С.* Усталостное разрушение металлов. – М.: Гос. науч.– техн. изд-во лит. по чёрной и цветной металлургии, 1963.– 272с.