

УДК 531

## СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ И МАГНИТНОЙ СТРУКТУРОСКОПИИ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН В УСЛОВИЯХ НАГРУЖЕНИЯ

С.Ю. Митропольская

### Введение

Одним из путей обеспечения безаварийной эксплуатации машин и механизмов является оперативный контроль величины действующих напряжений, а также надежная оценка максимальных напряжений, ранее возникавших в предыстории нагружения. Известные методики неразрушающей оценки напряженно-деформированного состояния элементов конструкций [1], как правило, трудоемки, не всегда оперативны и точны. Магнитный метод контроля напряжений давно привлекает внимание исследователей, но его возможности до сих пор не реализованы в полной мере. Для конструкционных сталей с феррито-перлитной структурой показана возможность оценки действующих напряжений и деформаций магнитными методами, поскольку выявлено качественное подобие между диаграммой напряжение-деформация и изменением коэрцитивной силы от деформации [2]. Однако практическое применение предложенного подхода сдерживается из-за неоднозначного характера изменения магнитных свойств в упругой области растяжения. Частично преодолеть указанную трудность можно за счет привлечения дополнительного источника информации – сигнала акустической эмиссии (АЭ).

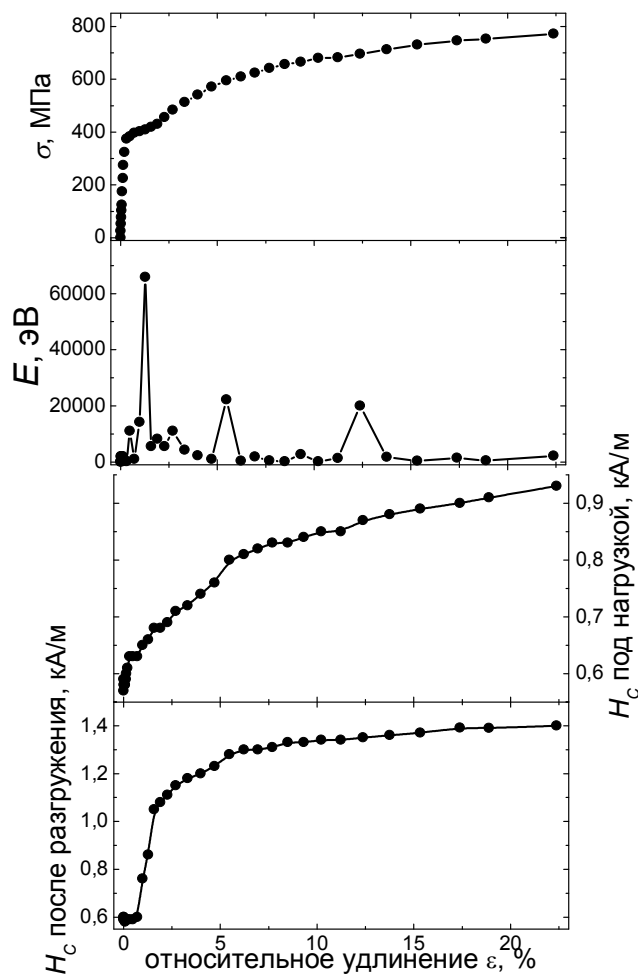


Рис. 1. Диаграмма «напряжение-деформация» и зависимости акустических и магнитных характеристик стали 45 от величины относительного удлинения при растяжении.

Известные методики неразрушающей оценки напряженно-деформированного состояния элементов конструкций [1], как правило, трудоемки, не всегда оперативны и точны. Магнитный метод контроля напряжений давно привлекает внимание исследователей, но его возможности до сих пор не реализованы в полной мере. Для конструкционных сталей с феррито-перлитной структурой показана возможность оценки действующих напряжений и деформаций магнитными методами, поскольку выявлено качественное подобие между диаграммой напряжение-деформация и изменением коэрцитивной силы от деформации [2]. Однако практическое применение предложенного подхода сдерживается из-за неоднозначного характера изменения магнитных свойств в упругой области растяжения. Частично преодолеть указанную трудность можно за счет привлечения дополнительного источника информации – сигнала акустической эмиссии (АЭ).

### Методика экспериментов

Эксперимент проводили на установке одновременной реги-

страции магнитных характеристик и сигналов АЭ ин-ситу в условиях растяжения. Данная установка представляет собой синтез трех составных частей: универсальной испытательной машины с максимальным усилием 50 кН, магнито-измерительного комплекса и системы АЭ, а также включает два персональных компьютера, вторичные и вспо-

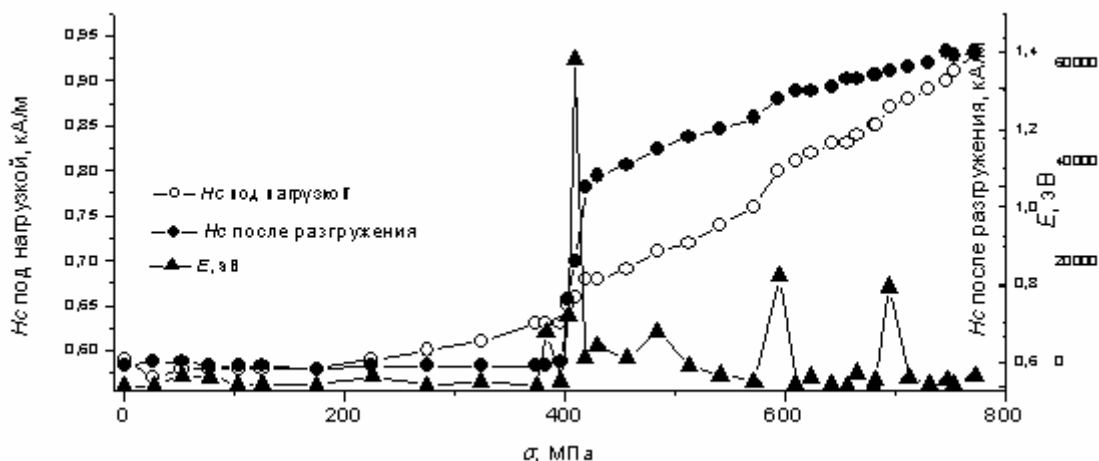


Рис. 2. Зависимости акустических и магнитных характеристик стали 45 от величины приложенных растягивающих напряжений

могательные приборы. Растяжение образцов проводили в режиме простого нагружения с весьма малым шагом по нагрузке. Для регистрации петли магнитного гистерезиса процесс нагружения приостанавливали. Перед началом каждого шага нагружения и по окончании его образец размагничивали. Магнитные характеристики измеряли как в нагруженном состоянии, так и после разгрузки образца. Сигнал АЭ регистрировали только на этапе нагружения. Эксперименты проводили на цилиндрических образцах целого ряда низко- и среднеуглеродистых конструкционных сталей с феррито-перлитной структурой (45, Ст.3, 12ГБ и других). Кроме того, испытывали образцы стали 45, поверхностно термоупрочненные лазером.

### Результаты экспериментов и их обсуждение

Результаты магнитных и акустико-эмиссионных измерений в условиях механических испытаний образцов стали стали 45 после нормализации приведены на рис.1 и 2. Величина энергии  $E$  сигнала АЭ и значения коэрцитивной силы  $H_C$ , измеренной по предельной петле магнитного гистерезиса под нагрузкой и после разгрузки образца, представлены как функция достигнутого относительного удлинения (рис. 1) и как функция приложенных растягивающих напряжений (рис. 2). Из представленных совмещенных диаграмм видно, что вблизи предела текучести ( $\sigma=400$ МПа) на кривых изменения коэрцитивной силы  $H_C$  наблюдаются характерные перегибы. Их физическая природа была подробно обсуждены нами с учетом магнитной текстуры напряжений, магнитострикции и плотности дефектов кристаллического строения [2,3]. При этом одновременно с возрастанием коэрцитивной силы регистрируется пик энергии сигнала АЭ, который свидетельствует о переходе металла в пластическую область нагружения [4]. Однако в наиболее практически важной области нагружения, при напряжениях до  $0,7...0,9 \sigma_{0,2}$ , неоднозначная зависимость коэрцитивной силы по предельной петле  $H_C$  от приложенного напряжения заставляет искать альтернативные контролируемые параметры. В некоторых случаях плодотворным может оказаться привлечение метода

ЭА, если акустическая активность материала начинает проявляться при напряжениях ниже предела текучести, как это происходит в стали Ст.3 со структурой отожженного феррита (рис. 3).

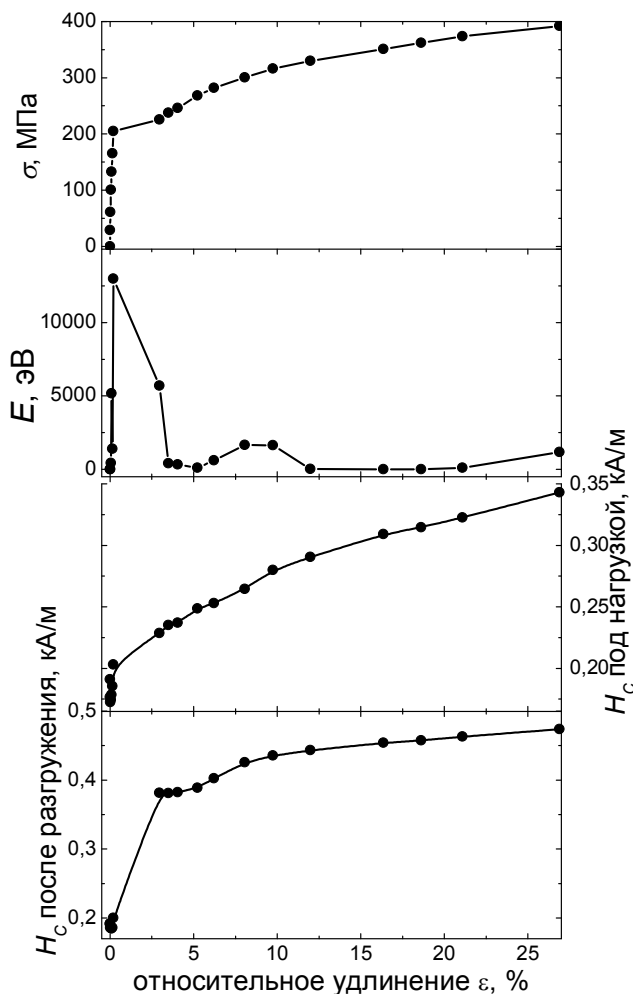


Рис. 3. Диаграмма «напряжение-деформация» и зависимости магнитных и акустических характеристик от величины относительного удлинения при растяжении для стали Ст3.

На стадии деформационного упрочнения, когда отмечается резкий спад энергии АЭ, значения коэрцитивной силы исследованных сталей остаются весьма высокими и продолжают неуклонно возрастать с увеличением степени пластической деформации и с ростом приложенных напряжений.

Магнитное и акустическое поведение магнитнонеоднородных деталей машин при нагружении изучено на примере элементов цилиндрической формы из стали 45, подвергнутого лазерному поверхностному упрочнению. Построенные зависимости изменения величины поля максимальной дифференциальной магнитной проницаемости магнитотвердой и магнитомягкой подсистем как функция приложенных растягивающих напряжений позволяют отслеживать изменения напряженно-деформированного состояния в каждой из компонент двухслойного (поверхностно-упрочненного) изделия на основании измерения его магнитных характеристик [5-7].

Полученные результаты указывают на перспективность неразрушающего контроля стальных деталей

за счет сочетания магнитного и акустико-эмиссионного методов, которые дополняют друг друга и позволяют дать более обоснованную оценку состояния действующего оборудования.

### Заключение.

Совместное привлечение методов магнитной структуроскопии и акустической эмиссии позволяет более обоснованно оценить растягивающие напряжения, возникающие в стальных элементах конструкций в условиях их эксплуатации. В упругой области нагружения в ряде случаев для низко- и среднеуглеродистых сталей неоднозначное изменение магнитных характеристик не позволяет оценить приложенные растягивающие напряжения, при этом информативными могут оказаться значения энергии сигнала

акустической эмиссии. Достижение напряжений, близких пределу текучести материала, надежно регистрируется и магнитным, и акустико-эмиссионным методом. Для оценки напряжений, превышающих предел текучести, преимущество имеет метод магнитной структуроскопии, поскольку коэрцитивная сила неуклонно и значительно возрастает с увеличением степени пластической деформации.

Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (гранты 06-01-03028, 08-08-90030).

### Литература

1. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А.Б. Кудрин, Л. Кабанов и др. – Киев: Наукова думка. 1981. – 582 с.
2. Горкунов Э.С., Смирнов С.В., Задворкин С.М., Митропольская С.Ю., Вичужанин Д.И. Взаимосвязь между параметрами напряженно-деформированного состояния и магнитными характеристиками углеродистых сталей // ФММ. 2007. №3. С. 1-6.
3. Емельянов И.Г., Митропольская С.Ю. Определение матричных зависимостей между магнитными и упругопластическими характеристиками сталей при растяжении // Металлы. 2008. №2. С. С. 89-95.
4. Фадеев Ю.И., Бартенев О.А., Волкова З.Г., Чекмарев Н.Г. Определение механических характеристик сталей методом акустической эмиссии // Дефектоскопия. 1987. №8. С.44-49.
5. Горкунов Э.С., Емельянов И.Г., Задворкин С.М., Митропольская С.Ю. Модель напряженно-деформированного состояния двухслойного стального изделия при одноосном растяжении // Металлы. 2007. №1. С. 78-82.
6. Горкунов Э.С., Емельянов И.Г., Задворкин С.М., Митропольская С.Ю. Закономерности изменения магнитных характеристик двухслойных изделий из углеродистых сталей в условиях растяжения // ФММ. 2007. Т.103. №6. С.657–666.
7. Горкунов Э.С., Митропольская С.Ю., Задворкин С.М., Осинцева А.Л., Вичужанин Д.И. Влияние лазерного поверхностного упрочнения на магнитные характеристики углеродистой стали в условиях нагружения // Дефектоскопия. 2008. №8. С. 58-66.

*Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия*

*Поступила: 03.04.09.*