

УДК 621.03

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В СТАЛЯХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ ИХ МАГНИТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

© Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, С.Ю. Митропольская, Д.И. Вичужанин  
*Институт машиноведения УрО РАН, Россия, Екатеринбург*

***Аннотация.** Целью настоящего исследования стала разработка подходов для оценки напряжений, действующих в деталях машин и элементах конструкций, выполненных из сталей различных систем легирования.*

***Ключевые слова:** магнитный метод контроля напряжений.*

Задача определения напряженного состояния элементов конструкций из ферромагнитных материалов методами неразрушающего контроля является актуальной и имеет как научное, так и прикладное значение. Перспективным представляется магнитный метод контроля напряжений, возможности которого до сих пор не реализованы в полной мере. Целью настоящего исследования стала разработка подходов для оценки напряжений, действующих в деталях машин и элементах конструкций, выполненных из сталей различных систем легирования.

В качестве материала исследования были выбраны: 1) низко- и среднеуглеродистые и низколегированные конструкционные стали, в том числе малоперлитная трубная сталь 12ГБ повышенной коррозионной стойкости; 2) образцы стали 45, подвергнутые поверхностному термоупрочнению лазерным излучением; 3) метастабильные аустенитные стали системы Fe-Mn-Cr; 4) мартенситностареющая сталь ЭП678 в различных структурных и фазовых состояниях.

Влияние микронапряжений на параметры двойного резонансного электромагнитно-акустического преобразования (ЭМАП) изучали на примере сталей 25, 70 и У8, ШХ15, Р6М5 и 13Х15Н5АМЗШ. Различный уровень микронапряжений в образцах получали варьированием температуры отпуска после закалки (образцы из сталей У8, ШХ15, Р6М5 и 13Х15Н5АМЗШ) или холодным пластическим деформированием (образцы патентованных сталей 25 и 70, подвергнутых волочению). Особенности проявления магнитоупругого эффекта в условиях одноосного растяжения и сжатия изучали на стали 45, а также на образцах чистого никеля и чистого кобальта.

***Определение напряжений в изделиях из углеродистых сталей.*** Для магнитнооднородных изделий из углеродистых сталей в отпущенном, нормализованном или горячекатаном состоянии показано, что к приложенным напряжениям и деформациям чувствительна коэрцитивная сила, что согласуется с ранее опубликованными данными. Однако выполненные нами измерения *in-situ* позволили предложить методику контроля, которая заключается в определении коэрцитивной силы по предельной и/или по частным петлям магнитного гистерезиса непосредственно в условиях нагружения и в последующем сравнении полученного значения с полученной нами коэрцитивной диаграммой напряжений и деформаций (рис. 1). Видно, что зависимость коэрцитивной силы  $H_C$  горячекатаной стали 12ГБ от степени деформации качественно подобна диаграмме «напряжение-деформация» вплоть до образования шейки, что позволяет оценить изменение напряженно-деформированного состояния объекта в условиях растяжения. Немонотонное поведение коэрцитивной силы в области упругих напряжений обсуждено с учетом магнитоупругого эффекта, который меняет «знак» при растяжении сталей вследствие изменения знака магнитострикции. Определяющая роль этого фактора показана для никеля и кобальта, которые в отличие от сталей не меняют знак магнитострикции при нагруже-

нии и демонстрируют монотонную зависимость  $H_C$  от напряжений. Зависимости магнитных характеристик четко обозначают начало пластического течения материала и могут быть использованы, в частности, для определения предела текучести без измерения деформации. Разработанный подход проиллюстрирован для ряда конструкционных сталей с феррито-перлитной структурой (45, Ст3, 12ГБ и другие) в условиях растяжения.

**Определение напряжений в поверхностно-упрочненных стальных изделиях.** Деформационное поведение и изменение магнитных свойств при нагружении стальных элементов, подвергнутых поверхностному упрочнению, имеет свою специфику по сравнению с однородными. Нами была исследована эволюция магнитных характеристик стали 45 с упрочненным поверхностным слоем под действием растяжения на всех участках диаграммы «напряжение–деформация» до образования шейки. Для этого с помощью магнитоизмерительного комплекса были зарегистрированы петли магнитного гистерезиса *in-situ* в условиях растяжения одновременно с записью диаграммы «напряжение–деформация» (рис. 2а), а также после снятия нагрузки. Путем математической обработки зарегистрированных петель получены полевые зависимости дифференциальной магнитной проницаемости (рис. 2б) и исследована их связь с напряжениями, возникающими в отдельных слоях изделия при нагружении; выявлены особенности поведения магнитных характеристик при переходе от упругой деформации к пластической, а также вблизи исчерпания ресурса.

Установлено, что полевая зависимость дифференциальной магнитной проницаемости может являться эффективным инструментом контроля напряженно-деформированного состояния многослойных и поверхностноупрочненных изделий. В качестве параметра неразрушающего контроля напряжений и деформаций магнитнонеоднородного изделия рекомендована величина поля максимальной дифференциальной магнитной проницаемости составляющих компонент: при малых деформациях – поле максимальной магнитной проницаемости магнитомягкой компоненты, а при более высоких деформациях – поле максимальной магнитной проницаемости магнитотвердой компоненты. На основе анализа смещения пиков дифференциальной проницаемости при растяжении поверхностноупрочненной стали 45 показано, что вовлечение различных структурных составляющих в пластическую деформацию происходит в строго определенной последовательности: сначала деформируются зерна феррито-перлитной сердцевины, а затем, при напряжениях свыше 700 МПа, пластическую деформацию начинает испытывать упрочненный поверхностный слой. Показано, что потеря бимодального характера полевой зависимости дифференциальной магнитной проницаемости, зарегистрированной после снятия нагрузки, указывает на близость к исчерпанию ресурса стального изделия с упрочненным поверхностным слоем.

**Определение напряжений, возникающих при растяжении и кручении элементов из метастабильных аустенитных сталей.** Изучен комплекс магнитных характеристик двухфазных ( $\gamma+\epsilon$ ) и аустенитных Fe-Mn и Fe-Mn-Cr сталей, подвергнутых упругопластической деформации при комнатной температуре по схемам одноосного растяжения и кручения. Выявленные различия в характере изменения таких магнитных характеристик как намагниченность насыщения и коэрцитивная сила от степени пластической деформации растяжением и кручением позволяют определить предысторию нагружения изделий и конструкций из слабомагнитных сталей. Для сталей с содержанием немагнитных фаз в количестве свыше 70% (например, 03Г21Х13, рис. 3) показано, что деформационное поведение магнитных характеристик в условиях растяжения и кручения обусловлено, главным образом, количеством и морфологией частиц магнитоупорядоченной фазы и потому является четким индикатором степени деформационной метастабильности двухфазных ( $\gamma+\epsilon$ ) и аустенитных сталей. Эволюция структуры сталей в процессе пластической деформации и, главным образом, образование в сталях с метастабильным аустенитом под действием приложенных нагрузок ферро-

магнитного  $\alpha'$ -мартенсита деформации приводит к существенному изменению комплекса их магнитных характеристик. Это позволяет использовать магнитные методы для оперативной оценки содержания ферромагнитной фазы в метастабильных сталях, определения накопленной степени пластической деформации и деформационной поврежденности.

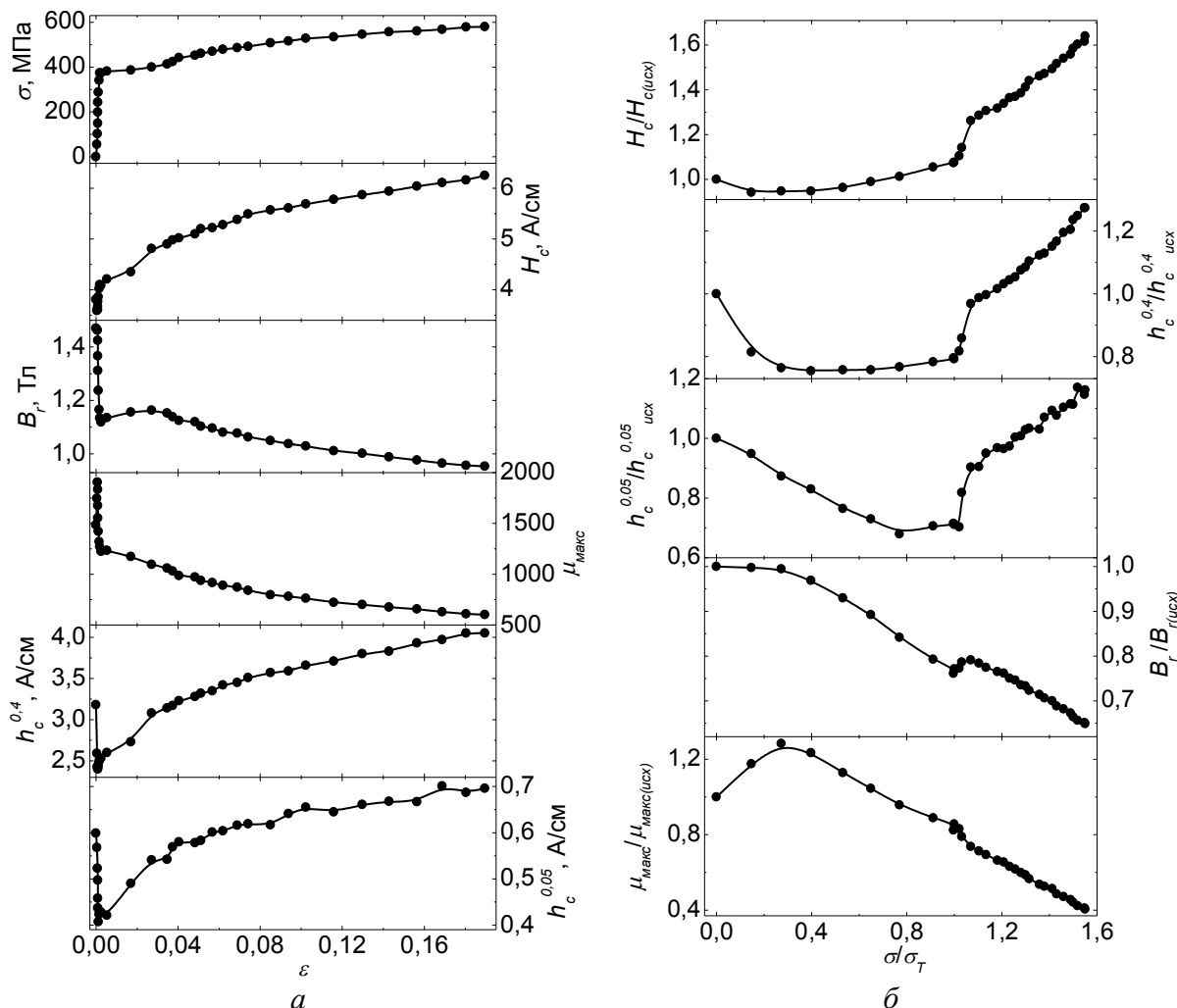
**Магнитный контроль напряжений в мартенситностареющих сталях.** На примере бескобальтовой мартенситностареющей стали ЭП678 систематизированы факторы, влияющие на магнитные характеристики, обусловленные структурными и фазовыми превращениями в условиях термических (закалка, старение) и силовых (растяжение, кручение, малоцикловая усталость) воздействий. Для материала с содержанием неферромагнитных фаз в количестве до 5% (ЭП678 после закалки и старения в интервале 450-580°C) выявлен вклад в деформационное поведение магнитных характеристик двух конкурирующих факторов: формирования магнитной текстуры напряжений и повышением дефектности микроструктуры. Показано, что в «недостаренном» материале превалирование первого фактора приводит к снижению коэрцитивной силы  $H_c$  при растяжении. В «перестаренных» материалах потеря когерентности и коагуляция интерметаллидных частиц усиливает действие второго фактора, что приводит к значительному росту  $H_c$  при пластической деформации.

Для материала с содержанием немагнитных фаз в количестве до 40% (ЭП678 после закалки и старения в интервале 620-660°C, рис. 4) установлено, что использование магнитных методов анализа позволяет контролировать особенности кинетики деформационного распада ревертированного аустенита и количество вновь образовавшегося мартенсита деформации. Полученные результаты создают основу для диагностики изделий из мартенситностареющей стали, находящихся в условиях длительной эксплуатации в широком диапазоне температур.

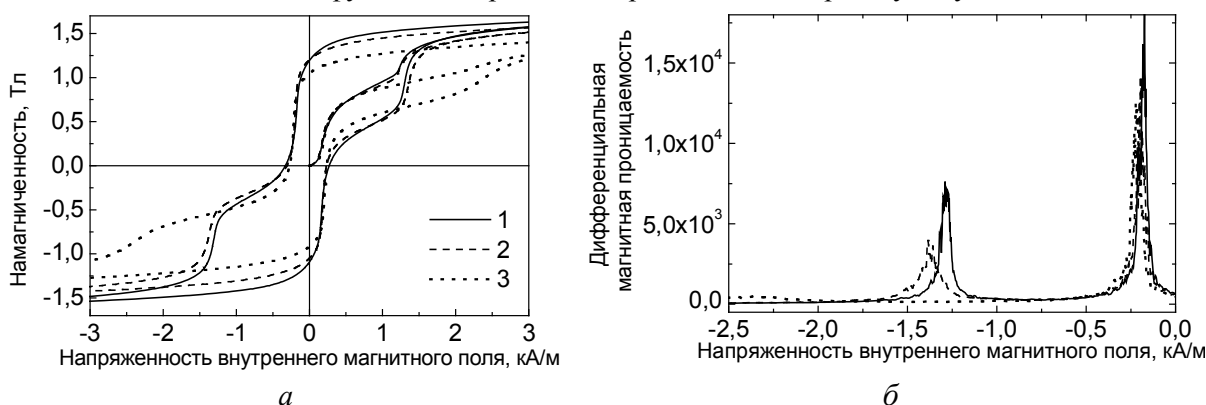
**Оценка величины микронапряжений в сталях по параметрам электромагнитно-акустического преобразования.** Акустические методы, наряду с магнитными, представляют большой интерес для контроля напряженно-деформированного состояния деталей машин и механизмов. Но их применение часто затруднительно из-за необходимости контакта излучателя и приемника упругих волн с исследуемым объектом. Для практической реализации более удобным является метод электромагнитно-акустического преобразования, в котором достоинства акустических способов исследования и контроля материалов дополняются возможностью бесконтактного возбуждения и регистрации упругих волн в изучаемом объекте, имеющем заметную электропроводность или ферромагнитные свойства.

Амплитуда сигнала ЭМАП в углеродистых, низколегированных и быстрорежущей сталях практически линейно уменьшается с увеличением микроискажений кристаллической решетки, обусловленных термической обработкой (рис. 5). Исключение составляет высоколегированная коррозионностойкая сталь аустенитно-мартенситного класса 13X15H5AM3Ш, где вследствие протекающих при отпуске фазовых превращений, в частности, обратного ( $\alpha \rightarrow \gamma$ )-превращения, наблюдается неоднозначная зависимость амплитуды сигнала ЭМАП от микроискажений. В отличие от амплитуды сигнала ЭМАП, все исследованные стали, включая 13X15H5AM3Ш, имеют однозначную зависимость скорости распространения нормальных упругих волн от микроискажений кристаллической решетки, обусловленных термической обработкой. Таким образом, представляется возможным использовать эти параметры для оценки микронапряжений, вызванных термической обработкой сталей. Зависимости амплитуды сигнала ЭМАП от микроискажений для деформированных сталей отличаются от линейных. Однако отклонения от линейности этих зависимостей происходит при микроискажениях решетки более 0,2%, то есть превышающих величину микроискажений в термически обработанных углеродистых и низколегированных сталях. При меньших значениях микроискажений амплитуда сигнала ЭМАП в деформированных сталях так же, как и в большинстве термически обработанных сталей, линейно уменьшается с ростом микроискажений кристаллической решетки.

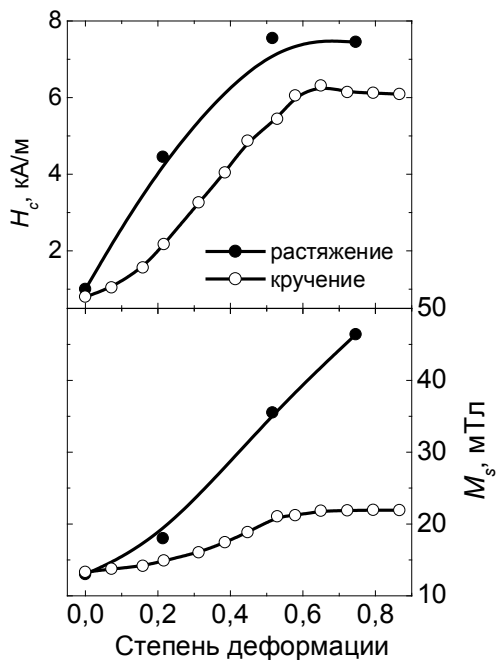
Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ 09-08-01091 и междисциплинарного проекта УрО РАН № 09-М-13-2001.



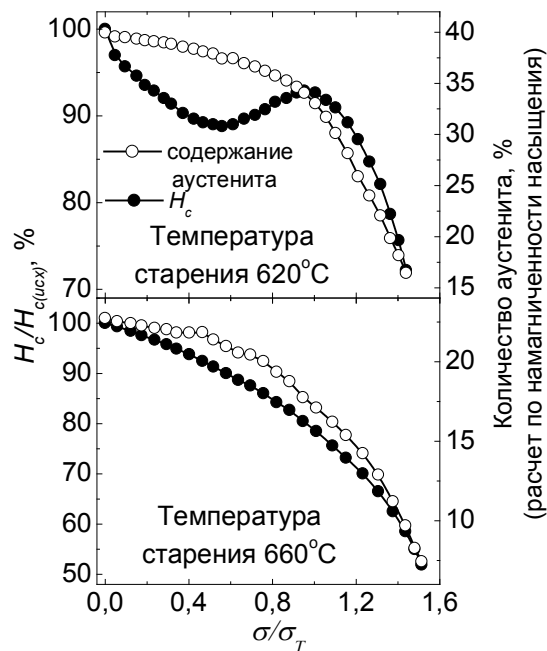
**Рис. 1.** Диаграммы «напряжение- относительное удлинение» и изменение магнитных характеристик трубной стали 12ГБ при одноосном растяжении: а – как функция степени деформации; б – как функция напряжений, приведенных к пределу текучести.



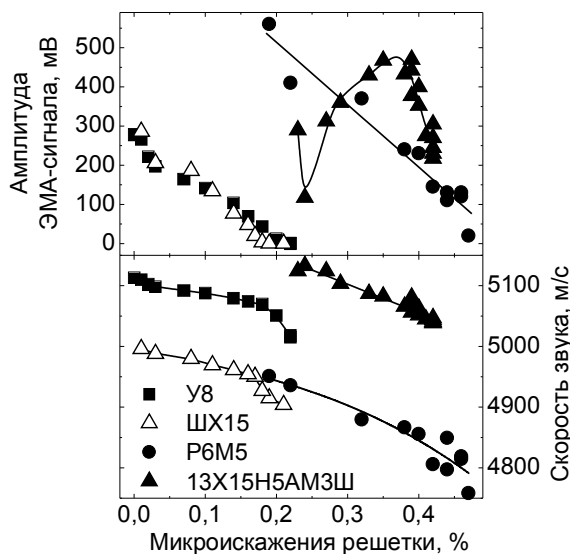
**Рис.2.** Предельные петли магнитного гистерезиса (а) и полевые зависимости максимальной магнитной проницаемости (б) образца стали 45 после поверхностного термоупрочнения лазерным излучением до нагружения (1), при внешних напряжениях, составляющих 0,5 от напряжения разрушения упрочненного слоя (2) и непосредственно перед разрушением упрочненного слоя (3)



**Рис. 3.** Влияние деформации растяжения и кручения на коэрцитивную силу  $H_c$  (а) и намагниченность насыщения  $M_s$  (б) стали 03Г21Х13 со структурой метастабильного аустенита



**Рис.4.** Относительные изменения коэрцитивной силы  $H_c$  и рассчитанное по намагниченности насыщения содержание аустенита как функции напряжений, приведенных к пределу текучести, для закаленной и состаренной мартенситностающей стали ЭП678



**Рис. 5.** Зависимости амплитуды сигнала ЭМАП при резонансе и скорости распространения упругих волн от микроискажений кристаллической решетки закаленных и отпущенных сталей.

Поступила: 04.04.10.