

**Рис. 2.** Диаграммы растяжения систем Fe-H (нижняя кривая) и Fe (верхняя кривая)

### Список литературы

1. Нагорных, Бурнышев, Бесогонов. В печати
2. Chamati H., Papanicolaou N.I., Mishin Y., Papaconstantopoulos D.A. Embedded-atom potential for Fe and its application to self-diffusion on Fe(100) // Surface Science. 2006. № 600(9). P. 1793.
3. Баранов М.А., Дроздов А.Ю., Чудинов В.Г., Баянкин В.Я. Атомные механизмы развития микротрещины в чистых ГЦК и ОЦК металлах и с примесью водорода // Журнал технической физики. 2000. № 70 (4). С. 46
4. Wen M., Xu X-J., Fukuyama S, Yokogawa K. Embedded-atom-method functions for the body-centered-cubic iron and hydrogen// J. Mater. Res.2001, 16, p. 3496-3502.
5. Котречко С.А., Филатов А.В., Овсянников А.В. Атомистика разрушения ОЦК-металлов в нанобъеме // Металлофизика и новейшие технол., 27, 7, с.с. 875-887 (2006)
6. Баранов В.П., Сергеев Н.Н. Кинетика замедленного разрушения высокопрочных сталей в инактивных и водородсодержащих средах // РЖ 19Б-2. Физическая химия (Кристаллохимия. Химия твердого тела. Газы. Жидкости. Аморфные тела. Поверхностные явления. Химия коллоидов), 22, 2006

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УПРУГИХ И МАГНИТОУПРУГИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФЕРРОМАГНИТНЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ НАВОДОРОЖИВАНИЯ

**Ильясов Р. С. , Главатских М. Ю. \*, Бурнышев И. Н. \*\*, Лыс В. Ф. \*\***

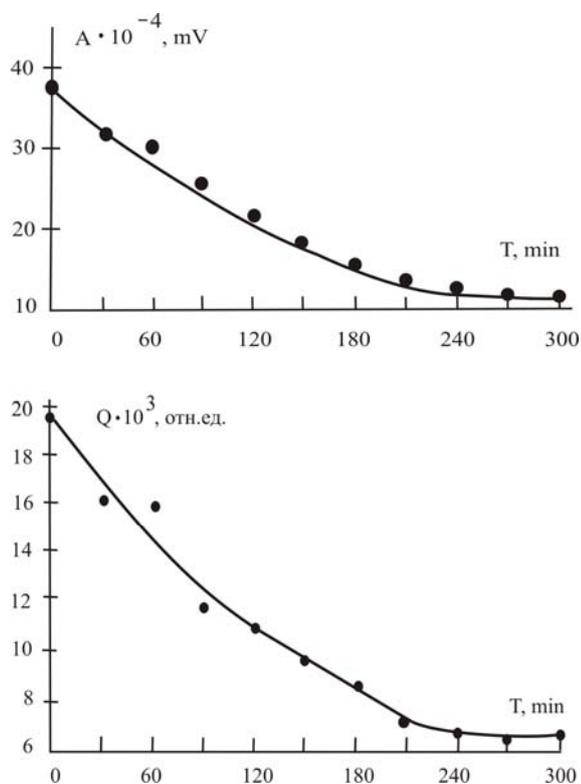
\* Физико-технический институт УрО РАН, г. Ижевск, Россия,  
[emp@fti.udm.ru](mailto:emp@fti.udm.ru)

\*\* Институт прикладной механики УрО РАН, г. Ижевск, Россия,  
[inburn@mail.ru](mailto:inburn@mail.ru)

Разработка неразрушающих методов оценки степени наводороживания конструкционных материалов играет очень важную роль для предотвращения разрушений технических объектов водородной, атомной и ядерной энергетики, транспорта, химической и нефтегазовой промышленности, которые могут привести к техногенным катастрофам со значительными социально – экономическими последствиями. На сегодняшний день нельзя считать, что данная техническая проблема окончательно решена, хотя известно, что водород накапливающийся в металле изменяет целый ряд его физико-механических характеристик [1]. Для решения этой проблемы в данной работе принята попытка использования упругих и магнитоупругих характеристик, формирующих параметры двойного резонансного электромагнитно-акустического преобразо-

вания (ЭМАП). Суть явления ЭМАП заключается в электромагнитной генерации акустических волн в металлах за счет пондермоторных и магнитоэлектрических сил. Методы, основанные на ЭМАП, относятся к бесконтактным методам, позволяющим проводить диагностику в широком диапазоне температур и в процессе движения (сканирования) системы датчиков относительно объекта контроля. Основными параметрами ЭМАП, несущими информацию о структурных изменениях и о напряженно-деформированном состоянии, являются: амплитуда принятого сигнала после двойного преобразования ( $A$ ), прямо пропорциональная динамической магнитоэлектрической чувствительности; частота акустического резонанса ( $f$ ), прямо пропорциональная скорости и акустическая добротность ( $Q$ ).

Исследования влияния объемного катодного наводороживания, проведенного по стандартной методике [2] при токе  $15 \text{ mA/cm}^2$ , на параметры ЭМАП проводили на образцах сталей 20, 35 и 45, прошедших закалку и отпуск при температурах  $200^\circ$  и  $400^\circ\text{C}$ . Образцы были изготовлены в виде цилиндров диаметром 9 мм и длиной 96 мм; анализировались параметры двух резонансных частот – вблизи 80000 и 106000 Гц. Возбуждение и прием осуществлялось за счет магнитоэлектрического механизма с помощью проходных индуктивных катушек.



**Рис. 1.** Зависимость амплитуды  $A$  ЭМА сигнала и добротности  $Q$  стали 45 подвергнутой отпуску при  $400^\circ\text{C}$  от времени наводороживания

Обнаружено монотонное уменьшение в процессе наводороживания частоты резонанса, акустической добротности и амплитуды сигнала для всех без исключения сталей и режимов термической обработки. Характерное изменение амплитуды и добротности от времени наводороживания на примере образца стали 45, прошедшего отпуск при температуре  $400^\circ\text{C}$ , продемонстрировано на рис.1. Относительные изменения (в процентах) параметров ЭМАП для всех образцов при шестичасовом наводороживании приведены в сводной таблице.

Изменение частоты резонанса при 6 часовом наводороживании в зависимости от состава и режима термической обработки происходило в пределах  $0,03\text{--}1,7\%$ , амплитуды -  $30\text{--}75\%$ , добротности –  $30\text{--}65\%$ . Как видно из таблицы, наиболее чувствительными параметрами к наводороживанию являются амплитуда сигнала ЭМАП и акустическая добротность. Незначительные изменения скорости, наблюдаемые при наводороживании, могут быть зафиксированы лишь при использовании резонансных методик, обеспечивающих погрешность измерения в рассматриваемом частотном диапазоне порядка  $0,001\%$ . При

реализации импульсных методик, наиболее часто используемых для контроля протяженных изделий, погрешность измерения скорости составляет около  $0,05\%$ , и этот параметр вряд ли может быть использован для диагностики степени наводороживания сталей данного класса. Тем не менее, данный параметр остается привлекательным для исследования физики процессов, происходящих при катодном наводороживании.

**Таблица**

	<b>T<sub>отп</sub></b>	<b>Сталь 20</b>	<b>Сталь 35</b>	<b>Сталь 45</b>
$\Delta f$ (%)	200 <sup>0</sup>	0.035	0.057	0.13
	400 <sup>0</sup>	0.024	0.051	0.036
$\Delta A$ (%)	200 <sup>0</sup>	28	54	50
	400 <sup>0</sup>	45	53	65
$\Delta Q$ (%)	200 <sup>0</sup>	46	32	45
	400 <sup>0</sup>	44	50	63

Как видно из таблицы, наблюдается достаточно уверенная тенденция повышения чувствительности этих параметров к наводороживанию, в особенности для температуры отпуска 400<sup>0</sup>С, с увеличением процентного содержания углерода. К такому же результату, за исключением частоты резонанса, приводит повышение температуры отпуска. С повышением температуры отпуска изменение частоты при наводороживании менее выражено. В образцах, прошедших закалку без последующего отпуска, из-за высокого уровня внутренних напряжений наблюдался очень слабый уровень сигнала, что затруднило проведение всего комплекса измерений в процессе наводороживания. Удалось измерить лишь изменение частоты и амплитуды в стали 35. Эти измерения продемонстрировали наибольшие изменения параметров ЭМАП. для образцов, прошедших закалку. Например, для стали 35 при 6-часовом наводороживании изменение частоты составило 1.7 %, а амплитуды – 75%.

Исследование процессов релаксации после 6-часового наводороживания показало, что такое же время обезводороживания не приводит к полному восстановлению параметров ЭМАП. Примерно через сутки происходит практически полная релаксация этих параметров, что свидетельствует об отсутствии необратимых структурных изменений в процессе наводороживания. Монотонное уменьшение частоты и амплитуды при наводороживании, по аналогии с влиянием на эти параметры температуры отпуска [3], косвенно указывают на то, что основной причиной этих изменений является накопление внутренних напряжений.

#### **Список литературы**

1. Гельд П.В.,Рябов Р.А., Мохрачев Л.П. Водород и физические свойства металлов и сплавов. М.: Наука, 1985. С.155-209.
2. И.Н.Бурнышев, К.А. Абрамов .Об акустической эмиссии при наводороживании малоуглеродистой стали // Письма в ЖТФ.- 2009,- том 35, вып.2.- С. 90-94.
3. Ильясов Р.С., Величко В.В., Бабкин С.Э. Особенности электромагнитно-акустического преобразования в стали 30ХГСА, подвергнутой термической обработке // Дефектоскопия.- 2001, -№9. –С.34-45.

### **ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ УПРОЧНЯЮЩЕЙ ТЕРМОДИФфуЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ**

**Бурнышев И. Н., Тарасов В. В.**

*ИИМ УрО РАН, г. Ижевск, РФ, [inburn@mail.ru](mailto:inburn@mail.ru)*

К недостаткам титановых сплавов следует отнести их невысокие показатели жаро-, износо- и коррозионной стойкости в ряде агрессивных сред. Одним из способов повышения этих характеристик титана и его сплавов является термодиффузионная обработка (ТДО). Анализ свойств химических соединений, образующихся при взаимо-