

# ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СТАЛИ 12Х18Н10Т ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 560 °С

## Сообщение 2. Повреждаемость и прогноз разрушения\*

С. А. НЕДОСЕКА, А. Я. НЕДОСЕКА, А. А. ГРУЗД

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

Изучены акустико-эмиссионные (АЭ) характеристики широко используемой в промышленности стали 12Х18Н10Т в условиях нормальных и высоких (до 560 °С) температур при испытаниях на статическую прочность. Показаны особенности, характерные для процесса накопления повреждений при деформировании и возникновения сопутствующей этому процессу АЭ. Установлено, что для объектов из стали 12Х18Н10Т при высоких температурах (до 560 °С) возможна эффективная оценка накопления повреждений и прогнозирование разрушения с использованием метода АЭ. Библиогр. 5, рис. 7, табл. 2

*Ключевые слова:* акустическая эмиссия, статическая прочность, оценка накопления повреждений, прогнозирование развития разрушений

Исследования в лабораторных условиях акустико-эмиссионных (АЭ) характеристик материалов при высоких температурах требуются для оценки состояния материалов при периодическом и непрерывном АЭ мониторинге потенциально опасных объектов промышленности (в первую очередь химических производств) при АЭ контроле процессов сварки и плавки.

В Сообщении 1 (см. сноску) рассмотрены результаты испытаний на статическую прочность стали 12Х18Н10Т в условиях нормальных и высоких температур [1]. Описан разработанный стенд (рис. 1) для высокотемпературных АЭ испытаний образцов (рис. 2) на основе машины Р-20 и диагностической аппаратуры ЕМА-3. Методика проведения испытаний предусматривала отработку и изготовление специализированных образцов, предназначенных для нагрева, статическое растяжение их до момента разрушения, измерение и запись акустических характеристик исследуемого материала. Был обеспечен комплексный и синхронный контроль параметров, необходимых для получения и анализа высокотемпературных АЭ характеристик испытываемого материала при температурах до 560 °С.

При испытаниях на статическое растяжение регистрировали температуру в рабочей части образца, нагрузку и АЭ, а также проверяли алгоритм прогноза разрушающей нагрузки АЭ системы ЕМА-3 в условиях различной акустической активности.

Полученные результаты испытаний стали 12Х18Н10Т в условиях нормальных и высоких

температур показали особенности, характерные для процесса ее деформирования и разрушения, возникновения сопутствующей этому процессу АЭ. В частности, количественные параметры сигналов АЭ, регистрируемые для разных образцов в аналогичных температурно-силовых условиях нагружения, существенно отличаются и не могут быть однозначно истолкованы при описании процесса накопления повреждений и разрушения. Кроме того, результаты испытаний образцов без концентратора при нормальной температуре показывают крайне незначительную активность АЭ на протяжении всего процесса нагружения.

Испытания образцов с концентраторами (выточкой и сварным швом) показали наличие достаточно большого, по сравнению с гладким образцом, числа событий АЭ. Хотя картина распределения сигналов во времени и их численные характеристики для одинаковых образцов существенно отличаются, полученного объема АЭ данных оказалось достаточно для прогнозирования развития разрушения.

Важным положительным результатом проведенного исследования явилась успешная проверка работоспособности алгоритмов прогнозирования разрушающей нагрузки, выполняемого программой ЕМА-3.5, в условиях высоких температур до 560 °С.

Используемая модификация системы ЕМА-3 с программным обеспечением ЕМА-3.5 позволяют получать в процессе испытаний как прогнозные данные по предполагаемому разрушению, так и

\* Исследование акустико-эмиссионных характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / С. А. Недосека, А. Я. Недосека, А. А. Грузд, М. А. Яременко, Л. Ф. Харченко // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 1. – С. 13–19.

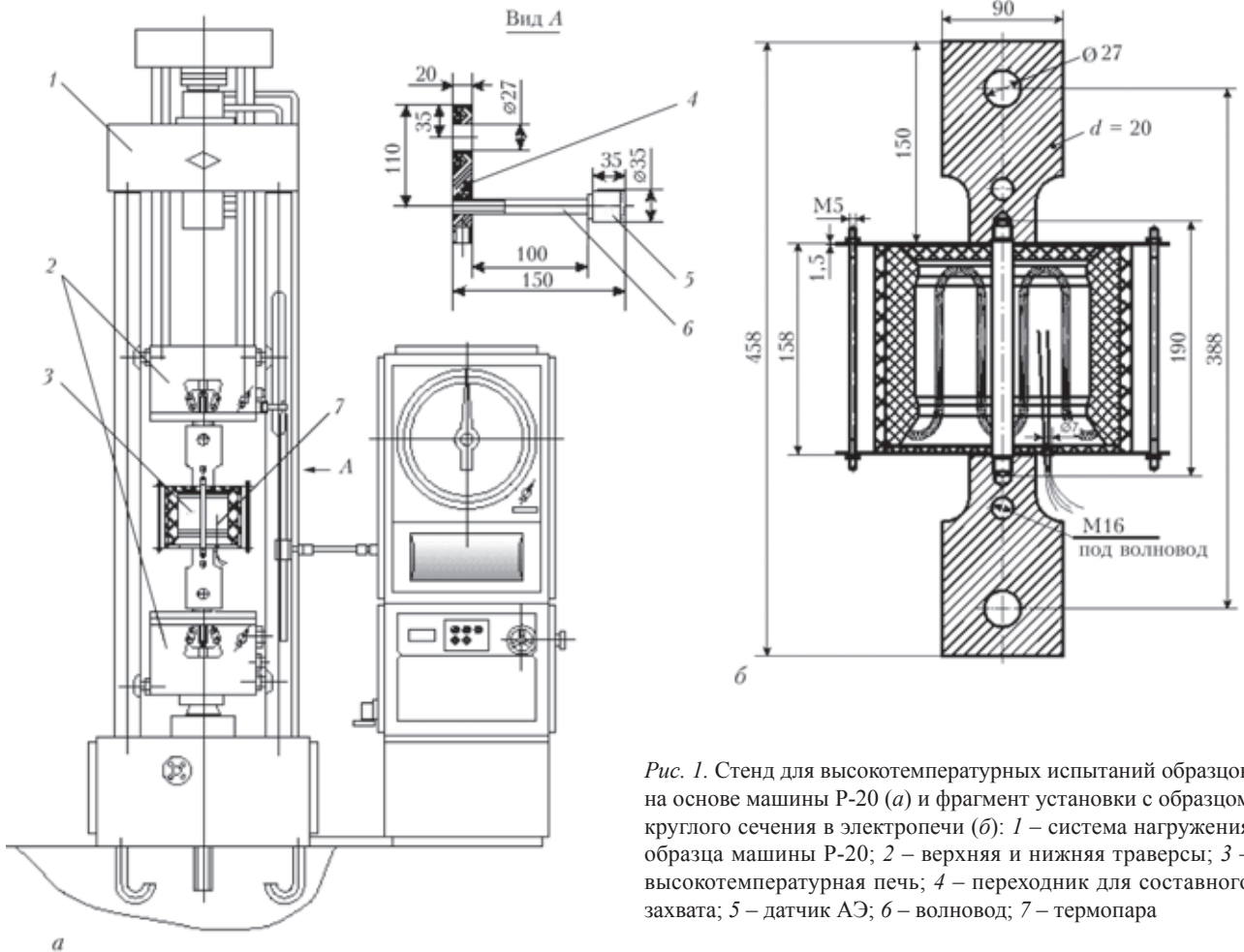


Рис. 1. Стенд для высокотемпературных испытаний образцов на основе машины Р-20 (а) и фрагмент установки с образцом круглого сечения в электропечи (б): 1 – система нагружения образца машины Р-20; 2 – верхняя и нижняя траверсы; 3 – высокотемпературная печь; 4 – переходник для составного захвата; 5 – датчик АЭ; 6 – волновод; 7 – термопара

выводить на экран и в таблицы значения текущей оценочной поврежденности материала, для которой прогноз был выполнен.

В данной серии экспериментов точность определения текущей поврежденности и прогноза разрушающей нагрузки была несколько ниже, чем при испытаниях стандартных образцов в условиях нормальных температур, но соответствовала требуемому Госпотребстандарта Украины для систем ЕМА-3 диапазону погрешностей  $\pm 15\%$  (рис. 3).

Учитывая, что наиболее представительными с точки зрения акустической активности являются результаты испытаний образцов со сварными соединениями (например, рис. 4), интересно проанализировать, как АЭ отображает накопление повреждений в образцах такого типа при высокотемпературных испытаниях.

Алгоритм расчета поврежденности и прогноза разрушения [2] системы ЕМА-3 построен на математической модели, которая обновляет результаты расчета по мере накопления данных АЭ. На рис. 5, а показан участок кривой нагружения при испытании того же сварного образца, что и на рис. 4, только в тех характерных точках, в которых система проводила расчет поврежденности материала по результатам накопленной за

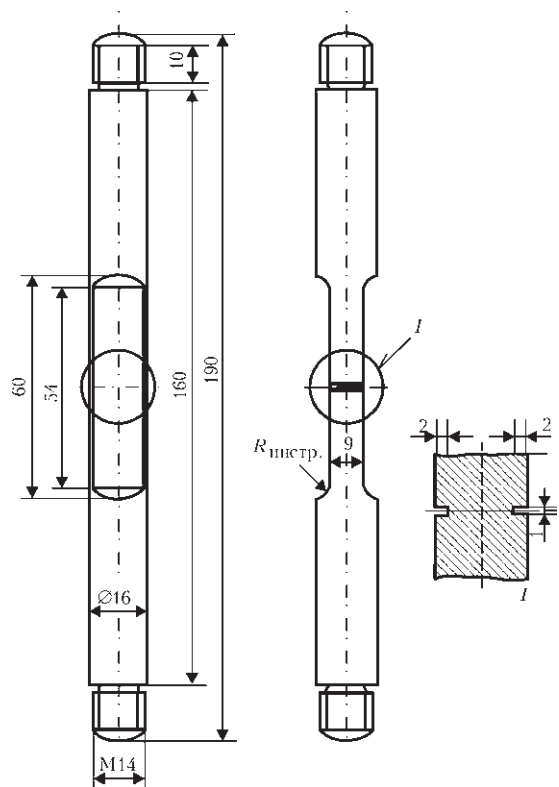


Рис. 2. Круглый образец с головкой диаметром 14 мм и надрезом-концентратором в рабочей части

Индикатор и прогноз состояния			
№ Ант.	Кластер	Прогноз разрушения	Повреждение
1	1: X=357;Y=0	20,5..23,6 кН	67..77 %

*a*

Индикатор и прогноз состояния			
№ Ант.	Кластер	Прогноз разрушения	Повреждение
1	1: X=295;Y=0	41,6..51,4 кН	95..100 %

*б*

Рис. 3. Окно прогноза программы ЕМА-3.5 при высокотемпературных испытаниях двух различных образцов стали 12Х18Н10Т с концентраторами: *a* – предупреждение 2-го уровня, погрешность прогноза составляет ± 15 %; *б* – предупреждение 3-го уровня, погрешность прогноза ± 10 %

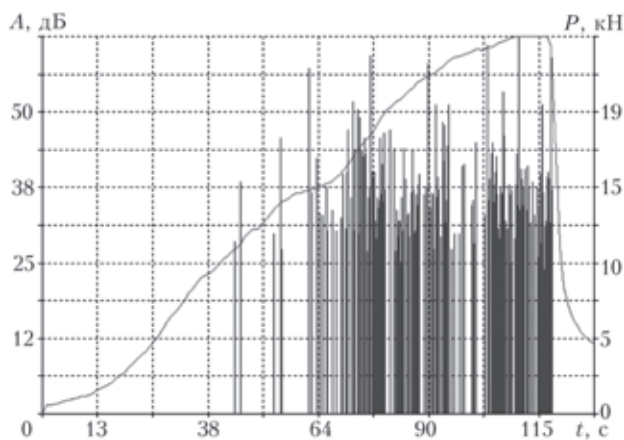


Рис. 4. Результаты испытаний одного из образцов со сварным швом при температуре 560 °С (столбчатый график – амплитуды событий АЭ (*A*); линейный – нагрузка (*P*))

этот период времени информации об акустической активности. Как видим, первые импульсы дискретной АЭ появились на 38-й секунде нагружения, а начиная с 54-й количества АЭ информации, полученной системой, стало достаточно для выполнения расчета поврежденности и прогноза разрушения. На рис. 5, *б* показаны расчетные значения поврежденности, полученные системой. Поврежденность [3] в контексте данного исследования – безразмерная величина, выраженная в процентах. Значению 100 % соответствует такое состояние материала, при котором он считается полностью утратившим свои эксплуатационные свойства и не способным сопротивляться воздействию нагрузок [4].

Перестроив графики, приведенные на рис. 5, в общих координатах, получим наглядное представление о процессе накопления повреждений в данном эксперименте (рис. 6). Отметим, что данный способ представления результатов является удачным, поскольку полученная кривая, в отличие от приведенных на рис. 5, плавная и может быть при необходимости легко описана элементарными функциями. Необходимость такого описания возникает, как правило, при переходе к расчету остаточного ресурса по известной поврежденности, что в свое время было выполнено

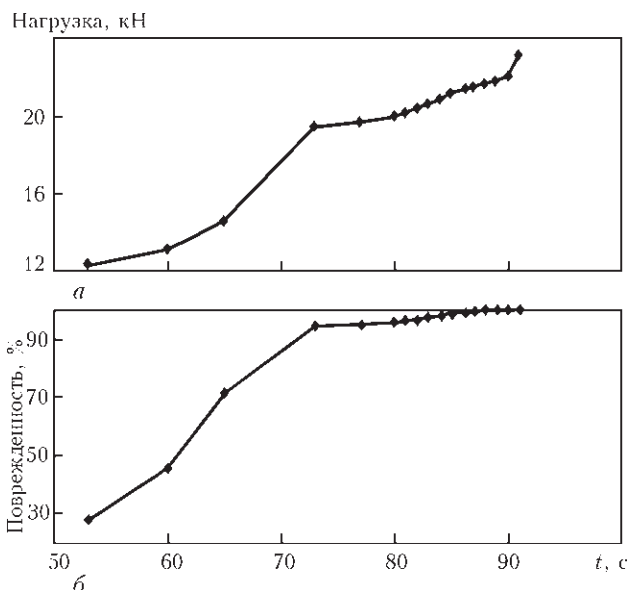


Рис. 5. Кривая нагружения сварного образца на участке расчета поврежденности (*a*) и расчетная поврежденность (*б*)

для материалов труб магистральных газопроводов [5].

В дополнение к сказанному выше интересно проанализировать не только сами результаты прогноза разрушающей нагрузки, но и изменение прогнозных данных в процессе нагружения образцов. На примере результатов испытания одного из образцов, приведенных в табл. 1, видно, что система корректировала прогнозное значение разрушающей нагрузки четыре раза.

При этом наиболее точные значения прогноза получены в первоначальный момент, при генерации системой первого предупреждения об опас-

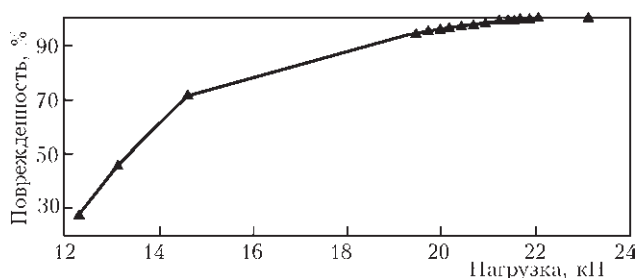


Рис. 6. Накопление повреждений в сварном образце с увеличением нагрузки



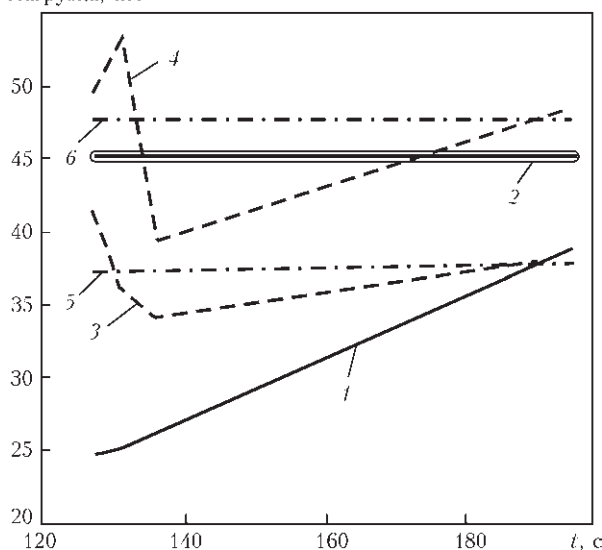
**Таблица 1. Результаты прогноза разрушения одного из образцов с концентратором**

Номер п/п	Время, с	Событие АЭ	Текущее значение нагрузки, кН	% от разрушающей нагрузки	Уровень предупреждения об опасности	Прогноз-минимум, кН	Прогноз-максимум, кН
1	127	15	24,76	55	1	41,27	49,53
2	131	17	25,19	56	2	36,02	53,23
3	136	18	26,23	58	3	34,09	39,34
4	195	22	38,73	86	3	38,34	48,41

*Примечание.* Реальное разрушение произошло при 45,02 кН.

ности (55 % разрушающей нагрузки), и в момент, когда уже после генерации третьего предупреждения (86 % разрушающей нагрузки) значение прогноза было последний раз скорректировано. Представленный результат хорошо иллюстрируется графически (рис. 7). Наиболее интересным является то, что несмотря на изменения в значениях прогноза на разных этапах нагружения (показаны пунктиром), линии тренда, проведенные для минимальных и максимальных значений прогноза (показаны штрих-пунктиром), фактически параллельны оси абсцисс и четко показывают, что реальная разрушающая нагрузка лежит в заданном диапазоне прогнозных величин.

Нагрузка, кН



**Рис. 7.** Корректировка системой ЕМА-3 данных прогноза разрушения в процессе испытания образца с концентратором: 1 – нагрузка на образец; 2 – нагрузка, при которой разрушился образец; 3, 4 – нижнее и верхнее значение прогнозной разрушающей нагрузки; 5, 6 – линии тренда, построенные для кривых 3 и 4 соответственно

Аналогичная ситуация наблюдается и для остальных образцов, данные для некоторых из них сведены в табл. 2. Прогнозные значения разрушающей нагрузки попадают в требуемый сертификатом Госпотребстандарта Украины на системы ЕМА-3 диапазон погрешностей  $\pm 15\%$ , что свидетельствует о принципиальной возможности прогнозирования разрушения данного материала при температурах до 560 °С при условии наличия концентраторов напряжений.

Очевидно, что при в целом положительных результатах прогноза алгоритм прогнозирования разрушения при высоких температурах работает с худшей точностью, чем при нормальных. Это можно заметить, в частности, для данных табл. 1 и для двух приведенных в табл. 2 образцов, где результаты прогноза занижены даже по верхнему пределу.

Для обеспечения работоспособности материала и своевременного предупреждения об опасности это является приемлемым, поскольку дает дополнительный запас надежности и время для принятия решения. Тем не менее, желательным был бы набор дальнейших статистических данных по высокотемпературным АЭ свойствам данной стали и соответствующая коррекция параметров прогноза или, при необходимости, самого алгоритма применительно к АЭ испытаниям в условиях высоких температур как в лабораторных, так и в промышленных условиях.

В целом же результаты проведенного исследования можно охарактеризовать как положительные, поскольку полученные данные подтвердили работоспособность для данной стали алгоритмов прогноза системы ЕМА-3 в условиях высоких температур, возможность отслеживать повреждаемость материала в процессе эксплуатации и своевременно предупреждать о наступлении его опасного состояния.

**Таблица 2. Результаты прогноза разрушения для некоторых образцов с концентратором, кН**

Номер п/п	Разрушающая нагрузка	Первоначальный прогноз-минимум	Первоначальный прогноз-максимум	Окончательный прогноз-минимум	Окончательный прогноз-максимум
1	45,02	41,27	49,53	38,34	48,41
2	49,47	40,36	48,43	40,36	48,43
3	42,21	53,92	62,22	34,3	43,31
4	47,21	28,77	43,53	36,17	45,93





**Выводы**

Модернизированный испытательный стенд, выбранные образцы и методика испытаний обеспечивают получение АЭ данных, необходимых для прогнозирования состояния образцов из стали 12Х18Н10Т, работающих при высоких температурах (до 560 °С).

Эффективным способом анализа результатов проведенных испытаний представляется их графическая интерпретация в координатах «нагрузка – поврежденность», которая позволяет указать зависимость плавной кривой.

Система ЕМА-3 выполняет для стали 12Х18Н10Т прогноз разрушающей нагрузки по данным АЭ при температурах до 560 °С, но его точность зависит от объема получаемой АЭ информации. Это вполне соответствует необходимости прогнозирования состояния наиболее

поврежденных, а следовательно, и наиболее АЭ активных участков конструкций, но требует дальнейших исследований по возможности прогнозирования состояния неповрежденных участков.

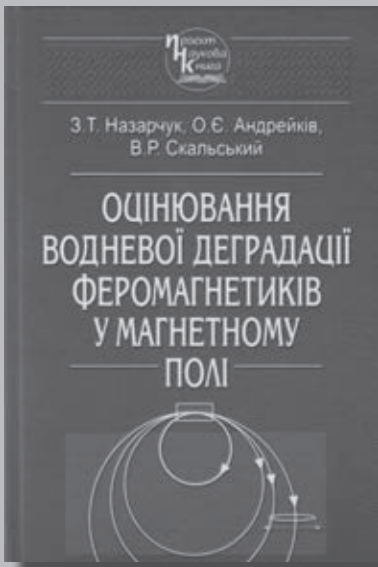
1. *Исследование акустико-эмиссионных характеристик стали 12Х18Н10Т при температуре 560 °С. Сообщение 1. Методика и некоторые результаты / А. Я Недосека, С. А. Недосека, А. А. Грузд и др. // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2011. – № 1. – С. 13–19.*
2. *Недосека С. А. Прогноз разрушения по данным акустической эмиссии // Там же. – 2007. – № 2. – С. 3–9.*
3. *Модель накопления повреждений в металлических материалах при статическом растяжении / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, С. А. Недосека, И. О. Богинич / Пробл. прочности. – 1995. – № 7. – С. 31–40.*
4. *Комплексная оценка поврежденности материала при пластическом деформировании / А. А. Лебедев, Н. Г. Чаусов, И. О. Богинич, С. А. Недосека // Там же. – 1996. – № 5. – С. 23–30.*
5. *Недосека С. А., Недосека А. Я. Комплексная оценка поврежденности и остаточного ресурса металлов с эксплуатационной наработкой // Техн. диагностика и неразруш. контроль. – 2010. – № 1. – С. 9–16.*

Acoustic-emission (AE) characteristics of 12Kh18N10T steel widely applied in industry under the conditions of normal and high (up to 560 C) temperatures at static strength testing were studied. Features characteristic of the process of damage accumulation at deformation and initiation of AE accompanying this process are shown. It is established that for objects from 12Kh18N10T steel at high temperatures (up to 560 C) effective evaluation of damage accumulation and fracture prediction with application of AE method is possible. 5 References, 7 Figures, 2 Tables.

*Keywords: acoustic emission, static strength; assessment of damage accumulation, prediction of fracture propagation*

*Поступила в редакцию  
09.10.2012*

**НОВА КНИГА**



**Назарчук З. Т., Андрейків О. Є., Скальський В. Р.**  
Оцінювання водневої деградації феромагнетиків у магнетному полі. – Київ: Наукова думка, 2013. – 320 с.

Проведено теоретичні дослідження для встановлення взаємозв'язку між об'ємним стрибком стінки домена у феромагнетному матеріалі та величиною зумовленого ним переміщення його поверхні (магнетострикційний ефект). Запропоновано алгоритм оцінки коефіцієнта інтенсивності напружень феромагнетного матеріалу під впливом зовнішнього магнетного поля.

На підставі теоретико-експериментальних досліджень встановлено вплив водневого деградування феромагнетиків на генерування сигналів магнетопружної акустичної емісії. Показано особливості їх генерування за наявності пластичної деформації, структурних змін та об'ємної пошкодженості у таких конструкційних матеріалах.

Приведено результати експериментальних досліджень щодо встановлення зміни залишкової намагненості та магнетної в'язкості під впливом деформування та водневого деградування феромагнетиків.

Для наукових працівників та інженерів-дослідників, а також аспірантів і студентів вищих навчальних закладів зі спеціальностей: діагностика матеріалів і конструкцій; неруйнівний контроль; фізична акустика; механіка руйнування тощо.