

Механика материалов: прочность, ресурс, безопасность

УДК 620.179.143

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ АКУСТИЧЕСКИМИ И МАГНИТНЫМИ МЕТОДАМИ¹

© М. Р. Тютин², Л. Р. Ботвина², В. П. Левин², А. Г. Ефимов³, Н. Р. Кузелев³

Статья поступила 13 декабря 2016 г.

Исследованы механические свойства конструкционных сталей акустическими и магнитными методами в процессе растяжения плоских образцов с концентратором. Получены зависимости акустических и магнитных параметров, оцениваемых методами неразрушающего контроля, от деформации. Анализ выявленных закономерностей позволил выделить физические параметры, характеризующие достижение предельного состояния, отвечающего пределам текучести и прочности исследуемых материалов.

Ключевые слова: разрушение; поврежденность; неразрушающий контроль; акустическая эмиссия; метод магнитной памяти металла; вихретоковый метод; коэрцитивная сила.

Надежность материала конструкции определяется своевременным выявлением дефектов и оценкой критической поврежденности, после достижения которой может произойти преждевременное разрушение. Для решения этих задач используют методы неразрушающего контроля, основанные на различных физических принципах. Проблема в этой области связана с отсутствием однозначной связи параметров неразрушающего контроля с механическими характеристиками металла.

Проведены многочисленные исследования механических свойств металлических материалов с использованием различных методов неразрушающего контроля — акустической эмиссии (АЭ), магнитной памяти металла (МПМ), вихретокового (ВТ) и измерения коэрцитивной силы (КС).

Метод акустической эмиссии широко применяется для диагностики состояния конструкций в промышленности. Кроме выявления трещин и других дефектов в металлах [1], он позволяет также оценивать поврежденность бетонов [2], горных пород [3], образований из снега [4] при статическом, циклическом и ударном [5] нагружении. Одним из критериев наступления стадии предразрушения является снижение параметра $b_{АЭ}$, используемого как в сейсмологии, так и при исследовании состояния конструкционных материалов методом АЭ.

Метод магнитной памяти металлов основан на магнитоупругом эффекте [6], заключающемся в изме-

нении напряженности собственного магнитного поля при деформировании ферромагнитных материалов [7, 8]. Отличие метода МПМ от других магнитных методов неразрушающего контроля состоит в том, что он не требует приложения к объекту внешнего магнитного поля, поскольку измеряется напряженность собственного магнитного поля нагруженного объекта. Метод МПМ используют в ряде стран для неразрушающего контроля технических устройств, применяемых в промышленности [9]. Параллельно проводят лабораторные исследования эффективности этого метода для определения зон концентрации напряжений [10] при накоплении повреждений на разных стадиях статического нагружения [11].

Одним из самых распространенных методов неразрушающего контроля является вихретоковый. Его широко используют в атомной [12], авиационной [13] и других областях промышленности [14]. Данный метод может быть применен для оценки деградации материала в ходе периодического эксплуатационного контроля [15] трубопроводов.

Одним из наиболее чувствительных магнитных параметров к структурным изменениям в процессе нагружения при статических и циклических нагрузках является коэрцитивная сила H_c . По своей физической природе коэрцитивная сила — это мера сопротивления ферромагнетика размагничиванию, происходящему обычно путем смещения междоменных границ. Исследования, посвященные изучению изменений H_c в деформированном материале, позволили установить зависимости этого параметра неразрушающего контроля от величин статической [16 – 19] и циклической [20] нагрузок.

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 15-19-00237).

² Институт металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН (ИМЕТ РАН), Москва, Россия; e-mail: tyutin@imet.ac.ru

³ НИИИИ МНПО «Спектр», Москва, Россия.

Цель данной работы — оценка механических характеристик и поврежденности материала физическими методами неразрушающего контроля на различных стадиях разрушения при статическом растяжении образцов из трех конструкционных сталей, различных по структуре и прочности (сталь 20, сталь 45 и 12Х18Н9Т). Проведенные исследования позволили выявить чувствительность и пределы применимости методик неразрушающего контроля.

Механические характеристики и химический состав сталей марок 20, 45 и 12Х18Н9Т приведены в таблице.

Испытания на растяжение образцов с концентратором (тип IX по ГОСТ 25.502) проводили при комнатной температуре на машине «Инстрон 3382» со скоростью деформирования 0,5 мм/мин. Схема образцов представлена на рис. 1.

Параметры акустической эмиссии (АЭ) оценивали в процессе растяжения образцов с помощью установки Интерюнис Aline32D и широкополосного пьезоэлектрического приемника GT301. Амплитудный порог регистрации устанавливали равным 32 дБ. После проведения испытаний строили временные зависимости скорости накопления ($\dot{N}_{АЭ}$), суммарного числа ($\Sigma N_{АЭ}$) сигналов акустической эмиссии и $b_{АЭ}$ -параметра, связывающего суммарное число сигналов с амплитудой: $20 \log(\Sigma N_{АЭ}) = \text{const} - b_{АЭ} A_{АЭ}$. Преобладание высокоамплитудных сигналов свидетельствует о начале образования и развития микротрещин и сопровождается снижением $b_{АЭ}$ -параметра.

Одновременно с регистрацией АЭ на этом же образце измеряли напряженность собственного магнитного поля по методике работы [21] с использованием магнитометра ИКН-10М-8 и двухкомпонентного датчика, установленного в области концентратора напряжений (см. рис. 1). Далее в каждой точке образца рассчитывали напряженность результирующего поля $H_p = \sqrt{H_x^2 + H_z^2}$, где H_x и H_z — значения напряженности собственного магнитного поля вдоль и поперек направления деформации образца.

Коэрцитивную силу (КС) измеряли (в рабочей зоне) во время остановок при растяжении исследуемых образцов с помощью магнитного структуроскопа МС-10 [22]. Количество точек на диаграмме — 10 – 12.

Для измерения ВТ-параметра [23] использовали вихретоковый дефектоскоп ВД-90НП и накладной вихретоковый преобразователь трансформаторного

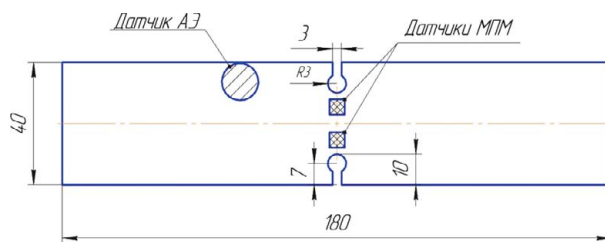


Рис. 1. Геометрия образцов с концентратором (тип IX по ГОСТ 25.502) толщиной 5 мм

типа с эффективным диаметром катушки 2,2 мм. Показания дефектоскопа — условные единицы ($H_{ВТ}^*$), пропорциональные фазе вносимого напряжения вихретокового преобразователя.

По данным измерений построены зависимости физических характеристик, оцениваемых методами АЭ, МПМ, КС и ВТ в функции относительной нормированной деформации δ^* , определяемой как отношение текущей деформации к деформации разрушения образца.

Обнаружено, что динамика изменения оцененных характеристик акустической эмиссии и магнитных параметров неразрушающего контроля существенно зависит от структуры материала.

Анализ данных акустической эмиссии показал, что на зависимости $\dot{N}_{АЭ} - \delta^*$, полученной при растяжении образца из стали 45, в отличие от сталей 20 и 12Х18Н9Т, отсутствует пик активности АЭ в области предела текучести, что связано с затрудненностью движения дислокаций [24] в наименее пластичной стали 45 (рис. 2). На стадии деформационного упрочнения для всех исследуемых сталей наблюдается практически равномерная активность АЭ. После предела прочности и до разрушения образцов из стали 20 и 12Х18Н9Т наблюдается снижение акустической эмиссии, что свидетельствует о локализации деформации в малом объеме. Из деформационных зависимостей $b_{АЭ}$ -параметра следует, что при растяжении стали 45 имеют место несколько участков падения и роста $b_{АЭ}$, в отличие от сталей 20 и 12Х18Н9Т (см. рис. 2, а, в, д). Подобные изменения выявлены ранее при растяжении гладких образцов из стали 45 [25]. Установлено, что они связаны со стадийностью процесса множественного разрушения.

Указанные особенности изменения параметров АЭ для стали 45 связаны с ее большей прочностью и меньшей пластичностью по сравнению с другими ис-

Химический состав и механические свойства исследуемых сталей

Марка стали	Химический состав, % масс.						Механические свойства		
	C	Si	Mn	Ni	Cu	Cr	δ , %	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа
20	0,17	0,21	0,36	0,04	0,07	0,05	37,0 ± 2,5	283 ± 4,7	435,3 ± 4,2
45	0,43	0,25	0,55	0,05	0,11	0,11	24,7 ± 2,7	342 ± 12,5	641,7 ± 22
12Х18Н9Т	0,07	0,28	0,91	9,52	0,36	18,00	69,6 ± 3,0	211,7 ± 4,6	593 ± 6,1

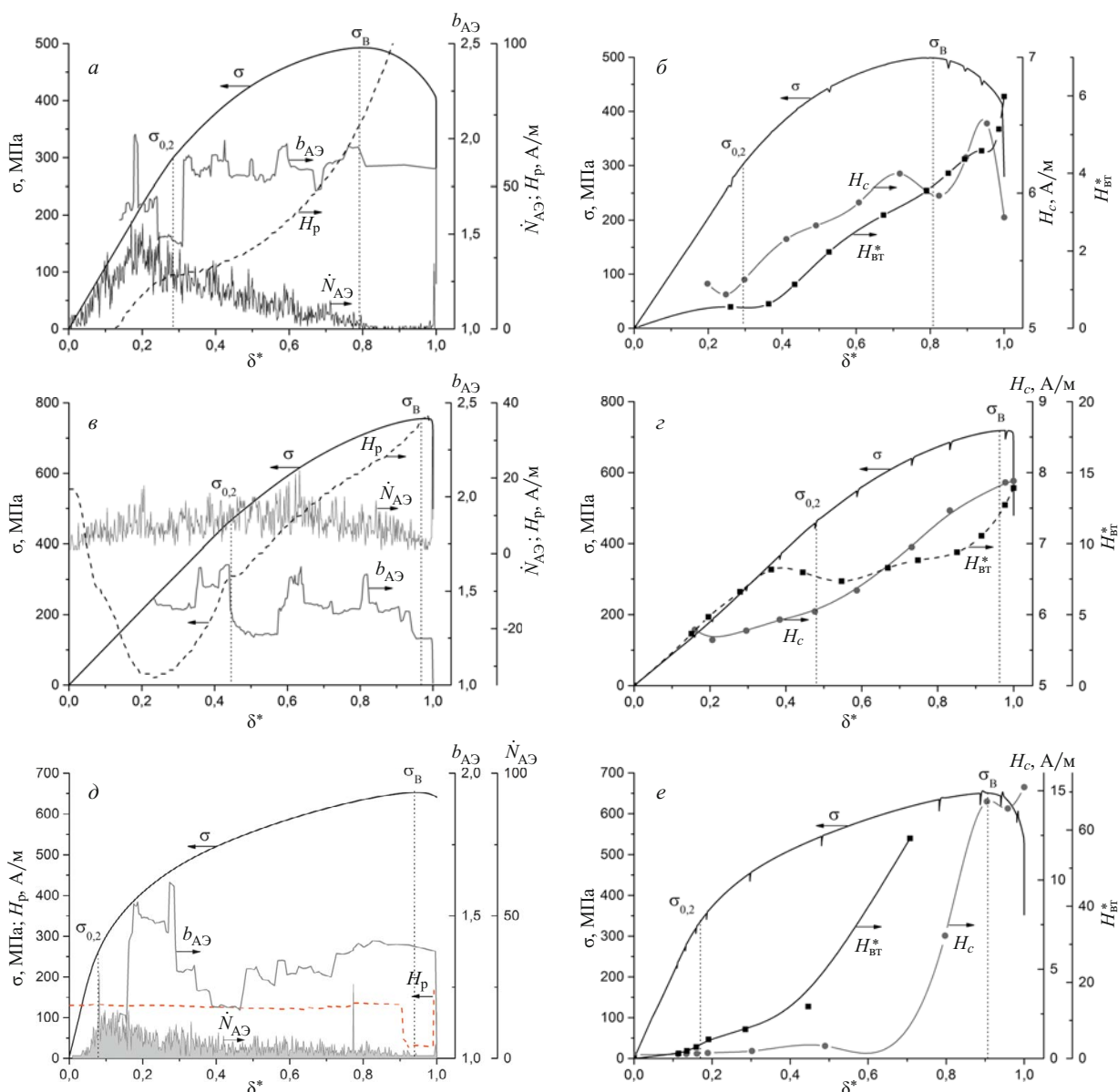


Рис. 2. Диаграммы растяжения образцов из исследуемых сталей 20 (*а, б*), 45 (*в, з*), 12X18H9Т (*д, е*) и зависимости акустических и магнитных параметров в функции относительной деформации δ^* : *а, в, д* — акустической эмиссии ($N_{АЭ}$ и $b_{АЭ}$) и напряженности собственного магнитного поля (H_p); *б, з, е* — напряженности магнитного поля, определенного методами КС (H_c) и ВТ ($H_{ВТ}^*$)

следуемыми сталями и могут быть проанализированы путем изучения картин микротрещин на разных стадиях разрушения.

При растяжении образцов из рассматриваемых сталей наблюдается преимущественный рост напряженности магнитного поля (см. рис. 2), оцениваемой методами МПМ (H_p), ВТ ($H_{ВТ}^*$) и КС (H_c). В отличие от деформационных зависимостей параметров акустической эмиссии, графики магнитных характеристик имеют более монотонный характер. Это обусловлено тем, что материал в ходе деформации накапливает изменения магнитных свойств, в то время как характеристики АЭ показывают отклик материала на нагрузку в данный момент времени/деформации. Как видно из рис. 2, *а, в*, перегибы на зависимостях H_p при нагрузке, близкой к пределу текучести, сопровождаются

падением $b_{АЭ}$ -параметра для сталей 20 и 45. Можно также наблюдать, что при этих деформациях происходит рост $H_{ВТ}^*$ и H_c (см. рис. 2, *б, з, е*).

Необходимо отметить, что в стали 12X18H9Т с нестабильной аустенитной структурой, изначально не имеющей магнитных свойств, напряженность собственного магнитного поля H_p с деформацией не изменяется на начальной стадии и резко падает перед достижением предела прочности (см. рис. 2, *д*). Параметры же ВТ и КС для этой стали значительно выше (в 70 и 12 раз соответственно), чем для сталей 20 и 45. Таким образом, методы ВТ и КС оказались значительно чувствительней при деформировании образцов из стали 12X18H9Т, чем образцов из других исследуемых сталей.

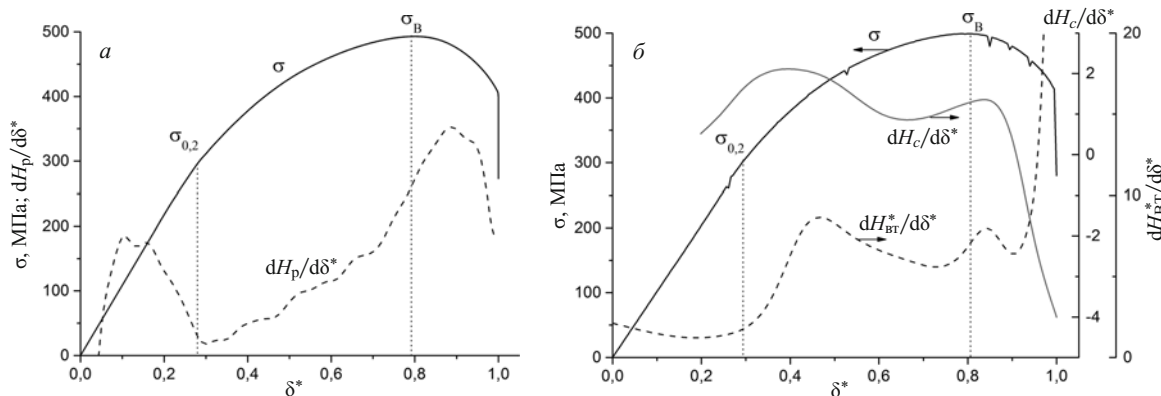


Рис. 3. Диаграммы растяжения образцов из стали 20 и зависимости производных напряженности магнитного поля в функции относительной деформации δ^* : а — метод МПМ ($dH_p/d\delta^*$); б — методы КС ($dH_c/d\delta^*$) и ВТ ($dH_{BT}^*/d\delta^*$)

Установлено, что измеренная в данной работе напряженность собственного магнитного поля H_p увеличивается вплоть до разрушения исследуемого образца, тогда как для гладких образцов, изготовленных из аналогичных сталей, наблюдается падение H_p после предела прочности [25].

Для анализа стадийности процесса разрушения были построены зависимости производных напряженности магнитного поля, оцениваемых методами МПМ, ВТ и КС (рис. 3). При достижении пределов текучести и прочности на зависимостях происходят резкие изменения, свидетельствующие об изменении механизма разрушения стали 20.

Таким образом, с ростом относительной деформации напряженность собственного (метод магнитной памяти металла) и наведенного (метод коэрцитивной силы) магнитного поля, а также значения вихревого параметра увеличиваются. Наибольшее изменение магнитного поля выявлено при испытании стали 12Х18Н9Т методами коэрцитивной силы и вихревым методом. Динамика напряженности магнитного поля согласуется с изменением $b_{AЭ}$ -параметра. Момент достижения пределов текучести и прочности при растяжении образцов из стали 20 более точно оценен по графикам производных соответствующих величин.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ботвина Л. Р. и др. О временных зависимостях характеристик акустических сигналов при разрушении металлических образцов / Докл. РАН. 2015. Т. 462. № 1. С. 91 – 94.
2. Carpinteri A., Lacidogna G., Puzzi S. From criticality to final collapse: evolution of the «b-value» from 1.5 to 1.0 / Chaos, Solitons & Fractals. 2009. Vol. 41. N 2. P. 843 – 853.
3. Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring / Eng. Fract. Mech. 2007. Vol. 74. N 1. P. 273 – 289.
4. Datt P., Kapil J. C., Kumar A. Acoustic emission characteristics and b-value estimate in relation to waveform analysis for damage response of snow / Cold Reg. Sci. Technol. 2015. Vol. 119. P. 170 – 182.
5. Prosser W. H., Gorman M. R., Humes D. H. Acoustic emission signals in thin plates produced by impact damage / J. Acoust. Emission. 1999. Vol. 17. N 1 – 2. P. 29 – 36.
6. Вонсовский С. В. Магнетизм. Магнитные свойства диа-, пара-, ферро-, антиферро- и ферримангнетиков. — М.: Наука, 1971. — 1032 с.
7. Bozorth R., Williams H. Effect of small stresses on magnetic properties / Rev. Modern Phys. 1945. Vol. 17. N 1. P. 72.
8. Yao K. et al. Experimental research on metal magnetic memory method / Exp. Mech. 2012. Vol. 52. N 3. P. 305 – 314.
9. Wang Z., Gu Y., Wang Y. A review of three magnetic NDT technologies / J. Magnetism Magnetic Mater. 2012. Vol. 324. N 4. P. 382 – 388.
10. Huang H. et al. Stress concentration impact on the magnetic memory signal of ferromagnetic structural steel / Nondestr. Testing Eval. 2014. Vol. 29. N 4. P. 377 – 390.
11. Pengju G. et al. Effect of tensile stress on the variation of magnetic field of low-alloy steel / J. Magnetism Magnetic Mater. 2011. Vol. 323. N 20. P. 2474 – 2477.
12. Kobayashi N. et al. Remote field eddy current testing for steam generator inspection of fast reactor / Nucl. Eng. Design. 2011. Vol. 241. N 12. P. 4643 – 4648.
13. Spencer F. W. Detection Reliability for Small Cracks Beneath Rivet Heads Using Eddy-Current Nondestructive Inspection Techniques: U.S. Department of Transportation. DTIC Document, 1998.
14. Бакунов А. С., Ефимов А. Г., Шубочкин А. Е. Применение современных средств вихревой дефектоскопии для контроля различных промышленных объектов / Контроль. Диагностика. 2011. № 4. С. 13 – 16.
15. Erhard A., Schuler X., Otremba F. A new concept for steam generator tube integrity assessment / Nucl. Eng. Design. 2012. Vol. 249. P. 297 – 303.
16. Горкунов Э. С. и др. Влияние предварительной пластической деформации на поведение магнитных характеристик высокопрочной трубной стали контролируемой прокатки при упругом одноосном растяжении (сжатии) / Дефектоскопия. 2015. № 9. С. 49 – 60.
17. Теплинский Ю. А. и др. Исследование особенностей изменения магнитных параметров стали марки 17Г1С в условиях одноосной растягивающей нагрузки / Контроль. Диагностика. 2004. № 12. С. 6 – 8.
18. Гордиенко В. Е., Овчинников Н. В., Бакшеев А. О. Зависимость напряженности магнитного поля рассеяния малоуглеродистых и низколегированных сталей от одноосных напряжений растяжения и сжатия / Контроль. Диагностика. 2007. № 2. С. 60 – 69.
19. Гордиенко В. Е. Магнитный контроль и оценка напряженно-деформированного состояния металла при упругопластическом деформировании. — СПб.: Санкт-Петербургский гос. архитектурно-строит. ун-т, 2008. — 114 с.
20. Горкунов Э. С. и др. Магнитный контроль усталостной деградации высокоуглеродистой перлитной стали / Дефектоскопия. 2011. № 12. С. 27 – 35.
21. Дубов А. А., Дубов А. А., Колокольников С. М. Метод магнитной памяти металла и приборы контроля. Вып. 5. — М.: Спектр, 2012. — 395 с.
22. Клюев В. В. Неразрушающий контроль: Справочник. Изд. 2-е, перераб. Т. 1. — М.: Машиностроение, 2006. — 832 с.
23. Клюев В. В. Неразрушающий контроль: Справочник. Изд. 2-е, перераб. Т. 2, кн. 2. — М.: Машиностроение, 2006. — 688 с.
24. Красовский А. Я., Новиков Н. В., Надедин Г. М. Корреляция между акустической эмиссией, пластическим течением и разруше-

нием железа при статическом нагружении в широком интервале температур и скоростей деформирования / Проблемы прочности. 1976. № 10. С. 3 – 11.

25. Ботвина Л. Р. и др. О взаимосвязи поврежденности конструкционных сталей с характеристиками акустической эмиссии и магнитной памяти / Металлы. 2017. № 1. С. 13 – 21.

Materials Mechanics: Strength, Durability, Safety

UDC 620.179.143

STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF STRUCTURAL STEELS BY ACOUSTIC AND MAGNETIC METHODS

© M. R. Tyutin, L. R. Botvina, V. P. Levin, A. G. Efimov, and N. R. Kuzelev

Submitted December 13, 2016.

Mechanical properties of structural steels are studied using acoustic and magnetic methods tensile tests of flat specimens with stress concentrator. Strain dependences of acoustic and magnetic parameters assessed by several nondestructive testing techniques are obtained. Analysis of revealed regularities provides identification of the physical parameters which characterize attaining of the critical state corresponding to the yield strength and ultimate strength of the materials under studied.

Keywords: fracture; damage; nondestructive testing; acoustic emission; magnetic memory of the metal; eddy current method; coercive force.

REFERENCES

1. Botvina L. R. et al. About the time dependencies of the characteristics of acoustic signals during the fracture of metal specimens / Dokl. RAN. 2015. Vol. 462. N 1. P. 91 – 94 [in Russian].
2. Carpinteri A., Lacidogna G., Puzzi S. From criticality to final collapse: evolution of the «b-value» from 1.5 to 1.0 / Chaos, Solitons & Fractals. 2009. Vol. 41. N 2. P. 843 – 853.
3. Carpinteri A., Lacidogna G., Pugno N. Structural damage diagnosis and life-time assessment by acoustic emission monitoring / Eng. Fract. Mech. 2007. Vol. 74. N 1. P. 273 – 289.
4. Datt P., Kapil J. C., Kumar A. Acoustic emission characteristics and b-value estimate in relation to waveform analysis for damage response of snow / Cold Reg. Sci. Technol. 2015. Vol. 119. P. 170 – 182.
5. Prosser W. H., Gorman M. R., Humes D. H. Acoustic emission signals in thin plates produced by impact damage / J. Acoust. Emission. 1999. Vol. 17. N 1 – 2. P. 29 – 36.
6. Vonsovskii S. V. Magnetic properties of dia-, para-, ferro-, antiferro- and ferrimagnetics. — Moscow: Nauka, 1971. — 1032 p. [in Russian].
7. Bozorth R., Williams H. Effect of small stresses on magnetic properties / Rev. Modern Phys. 1945. Vol. 17. N 1. P. 72.
8. Yao K. et al. Experimental research on metal magnetic memory method / Exp. Mech. 2012. Vol. 52. N 3. P. 305 – 314.
9. Wang Z., Gu Y., Wang Y. A review of three magnetic NDT technologies / J. Magnetism Magnetic Mater. 2012. Vol. 324. N 4. P. 382 – 388.
10. Huang H. et al. Stress concentration impact on the magnetic memory signal of ferromagnetic structural steel / Nondestr. Testing Eval. 2014. Vol. 29. N 4. P. 377 – 390.
11. Pengju G. et al. Effect of tensile stress on the variation of magnetic field of low-alloy steel / J. Magnetism Magnetic Mater. 2011. Vol. 323. N 20. P. 2474 – 2477.
12. Kobayashi N. et al. Remote field eddy current testing for steam generator inspection of fast reactor / Nucl. Eng. Design. 2011. Vol. 241. N 12. P. 4643 – 4648.
13. Spencer F. W. Detection Reliability for Small Cracks Beneath Rivet Heads Using Eddy-Current Nondestructive Inspection Techniques: U.S. Department of Transportation. DTIC Document, 1998.
14. Bakunov A. S., Efimov A. G., Shubochkin A. E. Application of modern eddy current flaw detectors to control various industrial objects / Kontr. Diagn. 2011. N 4. P. 13 – 16 [in Russian].
15. Erhard A., Schuler X., Otremba F. A new concept for steam generator tube integrity assessment / Nucl. Eng. Design. 2012. Vol. 249. P. 297 – 303.
16. Gorkunov É. S. et al. Effect of preliminary plastic deformation on the behavior of the magnetic characteristics of high strength controlled rolling pipe steel in elastic uniaxial tension (compression) / Defektoskopiya. 2015. N 9. P. 49 – 60 [in Russian].
17. Teplinskii Yu. A. et al. Investigation of the features of change in the magnetic parameters of steel 17G1S under uniaxial tensile load / Kontr. Diagn. 2004. N 12. P. 6 – 8 [in Russian].
18. Gordienko V. E., Ovchinnikov N. V., Baksheev A. O. The dependence of the magnetic stray field of low-carbon and low-alloy steels by uniaxial tensile and compressive stresses / Kontr. Diagn. 2007. N 2. P. 60 – 69 [in Russian].
19. Gordienko V. E. Magnetic control and evaluation of the stress-strain state of the metal under the elastic-plastic deformation. — St. Petersburg: Izd. Sankt-Peterburg. Gos. Arkhitekt.-Stroit. Univ., 2008. — 114 p. [in Russian].
20. Gorkunov É. S. et al. Magnetic control of fatigue degradation of high-carbon pearlite steel / Defektoskopiya. 2011. N 12. P. 27 – 35 [in Russian].
21. Dubov A. A., Dubov A. A., Kolokol'nikov S. M. Metal magnetic memory method and control devices. Issue 5. — Moscow: Spektr, 2012. — 395 p. [in Russian].
22. Klyuev V. V. Nondestructive evaluation: reference book. 2nd Edition. Vol. 1. — Moscow: Mashinostroenie, 2006. — 832 p. [in Russian].
23. Klyuev V. V. Nondestructive evaluation: reference book. 2nd Edition. Vol. 2. Book 2. — Moscow: Mashinostroenie, 2006. — 688 p. [in Russian].
24. Krasovskii A. Ya., Novikov N. V., Nadezhdin G. M. Correlation between the acoustic emission, plastic flow and fracture of iron under static loading in a wide range of temperatures and strain rates / Probl. Prochn. 1976. N 10. P. 3 – 11 [in Russian].
25. Botvina L. R. et al. On the relationship between the damage of structural steel with the characteristics of acoustic emission and magnetic memory / Metally. 2017. N 1. P. 13 – 21 [in Russian].