

УДК 620.179.17

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ И ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ НА РЕЗУЛЬТАТЫ АКУСТИКО-ЭМИССИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ РЕЛЬСОВ

А. Ю. МАРЧЕНКОВ¹, А. П. КРЕНЬ², В. А. БАРАТ¹

¹Национальный исследовательский университет «МЭИ»

Москва, Россия

²Институт прикладной физики НАН Беларуси

Минск, Беларусь

UDC 620.179.17

IMPACT OF MICROSTRUCTURE AND RESIDUAL STRESSES ON THE RESULTS OF ACOUSTIC-EMISSION DIAGNOSIS OF RAILWAYS

A. Y. MARCHENKOV, A. P. KREN, V. A. BARAT

Аннотация. Работа посвящена проблеме диагностики железнодорожных рельсов методом акустической эмиссии (АЭ). Выполнены лабораторные испытания по акустико-эмиссионной диагностике фрагментов рельсов, включающие механическое нагружение, близкое к эксплуатационному. Показано, что структурно-механическое состояние металла рельса оказывает влияние на полученные при АЭ-диагностике результаты – для образцов с различными параметрами микроструктуры и остаточных напряжений характерны разные частотные параметры акустических сигналов и характеры распределения параметров АЭ.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, остаточные напряжения, диагностика, дифрактометрия, термическая обработка, рельс, микроструктура.

Abstract. The paper is devoted to the problem of diagnostics of rails by the acoustic emission (AE) method. Laboratory tests on AE diagnostics of rail fragments were performed, including mechanical loading close to operational. It is shown that the structural and mechanical state of the rail metal affects the results obtained during AE diagnostics - specimens with different microstructure and residual stress parameters are characterized by various frequency parameters of acoustic signals and distribution patterns of AE parameters.

Keywords: acoustic emission, residual stresses, diagnostics, diffractometry, heat treatment, rail, microstructure.

Введение. Усталостные изломы рельсов, колесных пар, цельнокатаных железнодорожных колес, боковых рам тележек вагонов и других ответственных частей подвижного состава часто приводят к значительным авариям на железнодорожных путях. Несмотря на использование таких методов неразрушающего контроля (НК), как вихретоковый, ультразвуковой, магнитный и рентгенографический, повышение достоверности выявления дефектов и изменений структурно-механического состояния металла рельсов является актуальной задачей.

Метод акустической эмиссии (АЭ) используется для выявления дефектов и структурных изменений в деталях и конструкциях, применяемых в различных отраслях промышленности. Со временем расширение функционала метода АЭ привело к возможности использования его для оценки кинетики развития

внутренних повреждений [1]. Известны примеры успешного применения акустико-эмиссионного контроля для обнаружения усталостных трещин и других типов опасных дефектов в элементах железнодорожных конструкций. Использование метода АЭ при контроле состояния рельс описано в [2–4]. Исследования показали возможность обнаружения дефектов сплошности в рельсах при эксплуатационных нагрузках.

Вместе с тем, широкое внедрение метода АЭ для диагностики и мониторинга рельсов сдерживается высокой чувствительностью метода к различным конструктивно-технологическим и эксплуатационным факторам. Среди таких факторов можно выделить структурно-механическое состояние металла рельсов, характеризующееся комплексом механических характеристик и параметров микроструктуры. Известно [5], что метод АЭ чувствителен к микроструктурным изменениям, происходящим под воздействием термомеханической обработки деталей и конструкций при их изготовлении, а также под воздействием эксплуатационных факторов. В [6] показано, что при различных видах термической обработки получаются разные результаты акустико-эмиссионного контроля однотипных изделий. Также известно о влиянии неметаллических включений на результаты АЭ-контроля [7], поскольку морфология включений и их ориентация оказывает влияние на механические свойства и характер разрушения сталей. Остаточные напряжения, возникающие в материале в процессе изготовления, также сказываются на результатах АЭ-диагностики [8].

Таким образом, с учётом высокой чувствительности метода АЭ к описанным выше факторам, даже для бездефектных материалов достаточно трудно выявить универсальные диагностические критерии для обнаружения дефектов. Такие критерии могут быть разработаны для однотипных конструкций, изготавливаемых из ограниченного перечня материалов. В этом случае за счет одинаковой геометрии и учёта специфических особенностей отклика АЭ на параметры структурно-механического состояния конкретного материала диагностические критерии могут быть определены достаточно точно. В этом плане железнодорожные рельсы являются удачным объектом для исследования. Однако для того чтобы качественно применить АЭ-мониторинг на рельсах, необходимо провести предварительные исследования по выявлению технологических факторов, влияющих на результаты контроля.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния структурно-механического состояния металла железнодорожных рельсов на параметры акустико-эмиссионной диагностики. Исследовано влияние микроструктуры и остаточных напряжений на параметры акустических сигналов, регистрируемых в процессе нагружения рельсов нагрузкой, близкой к эксплуатационной. Результаты исследования являются первым необходимым шагом к формированию диагностических критериев, позволяющих производить дефектоскопию рельсов в процессе их эксплуатации.

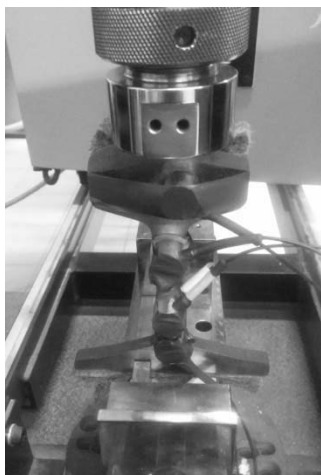
Материалы и методы исследования. Все эксперименты проводили на фрагментах рельсов толщиной 10 мм (рис. 1, *a*). Всего исследовали 12 фрагментов, которые разделили на три партии. Партия 1 – рельсы в исходном состоянии; партия 2 – рельсы после дополнительной термической обработки

(ТО) по режиму «отпуск 450 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе»; партия 3 – рельсы после дополнительной термической обработки (ТО) по режиму «отжиг 850 °С, выдержка 2 ч, охлаждение с печью + закалка 820 °С, выдержка 1 ч, охлаждение в масле + отпуск 450 °С, выдержка 2 ч, охлаждение на воздухе».

а)



б)



в)

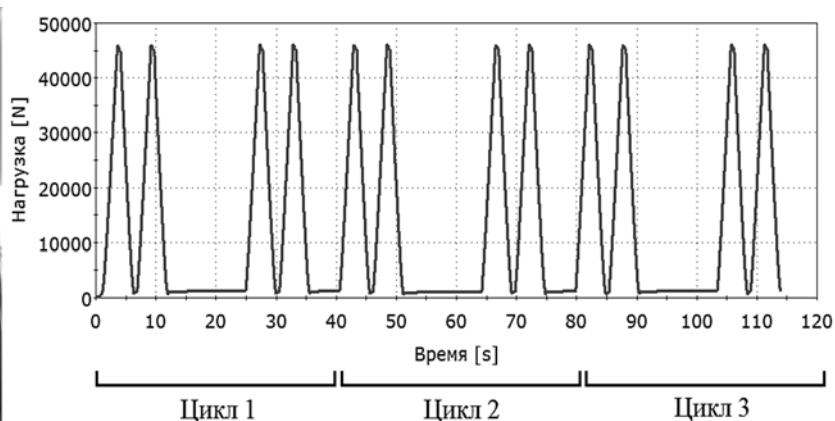


Рис. 1. Фрагменты рельсов для исследований (а), нагружение фрагмента сжатием на испытательной машине (б) и циклограмма нагружения (в)

После ТО один из фрагментов из каждой партии разрезали для металлографического анализа, который проводили на микрошлифах методом оптической микроскопии.

Анализ распределения остаточных напряжений проводили на поверхности одного из фрагментов рельсов из каждой партии методом рентгеновской дифрактометрии (дифрактометр GNR STRESS X). На каждом фрагменте измерения проводили в 13–15 различных точках сечения.

Далее на подготовленных фрагментах рельсов проводили исследования по их АЭ-диагностике с нагружением, близким к эксплуатационному. Для этого фрагмент рельса с закреплёнными на его торцевых поверхностях преобразователями акустической эмиссии (ПАЭ) устанавливали на испытательную машину Instron 5982 (рис. 1, б) и производили циклическое нагружение сжатием (рис. 1, в). Регистрация акустических сигналов в процессе испытаний осуществ-

лялась при помощи промышленной системы A-Line 32D. Измерительный тракт состоял из резонансных преобразователей и предварительных усилителей электрического сигнала ПАЭФ-014. Уровень акустического шума после установки образца в испытательную машину составил 34 дБ. В соответствии с рекомендациями ПБ 03-593-03 порог дискриминации акустических сигналов был установлен равным 40 дБ.

Результаты исследований. Результаты металлографических исследований показаны на рис. 2. Структура всех образцов рельсов – феррито-перлитная механическая смесь с разной степенью дисперсности. В исходном состоянии и после отпуска структура перлитная крупнозернистая с ферритом, выделившимся по границам исходным аустенитных зёрен (см. рис. 2, *а*, *б*). В образце, подвергнутом обработке по режиму «отжиг + закалка + отпуск», за счёт двойной фазовой перекристаллизации размер зёрен перлита существенно снизился (см. рис. 2, *в*).

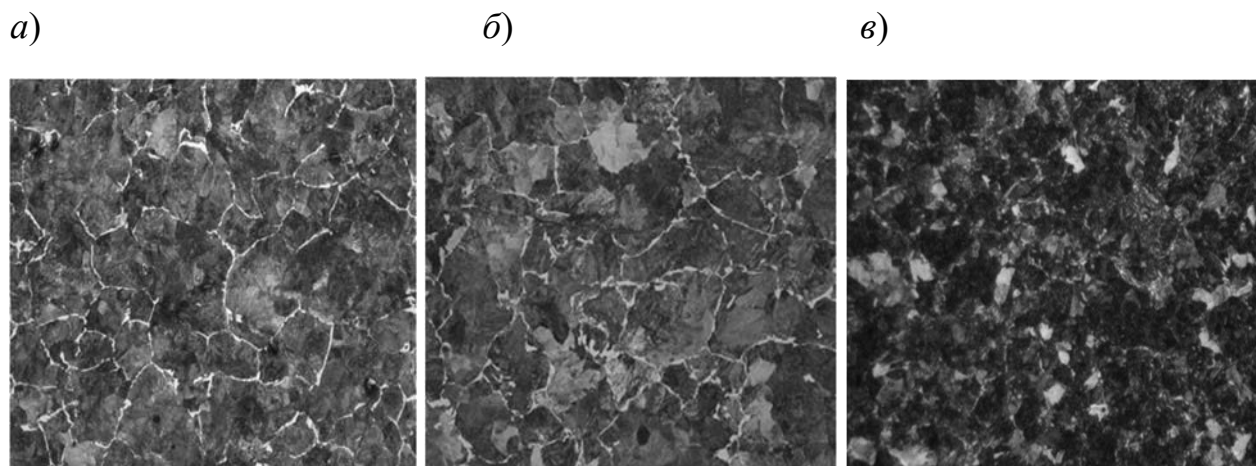


Рис. 2. Микроструктура фрагментов рельсов в исходном состоянии (*а*) и после ТО по режиму «отпуск» (*б*) и «отжиг + закалка + отпуск» (*в*) (все – 200х)

Фрагменты рельсов в исходном состоянии характеризуются высокими остаточными напряжениями (рис. 3, *а*). После отпуска средний уровень напряжений оказался несколько снижен (рис. 3, *б*), после обработки по режиму «отжиг + закалка + отпуск» уровень внутренних напряжений стал минимальным относительно всех фрагментов (рис. 3, *в*).

Результаты АЭ-диагностики представлены в виде распределений активности АЭ и амплитуд АЭ-сигналов на рис. 4.

Проведенные экспериментальные исследования показывают, что результаты акустико-эмиссионной диагностики фрагментов рельсов при их циклическом нагружении сжатием, близком к эксплуатационному, зависят от структурно-механического состояния металла рельсов. Различие параметров микроструктуры и уровня остаточных напряжений приводит к изменению распределений активности и амплитуд, а также спектральных параметров зарегистрированных АЭ-сигналов.

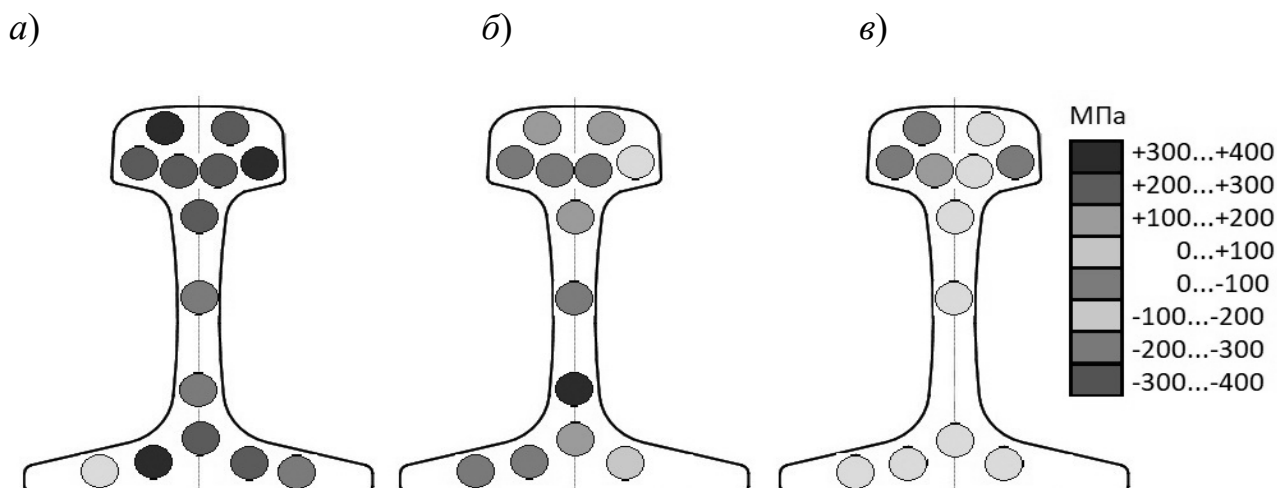


Рис. 3. Распределение остаточных напряжений в фрагментах рельсов

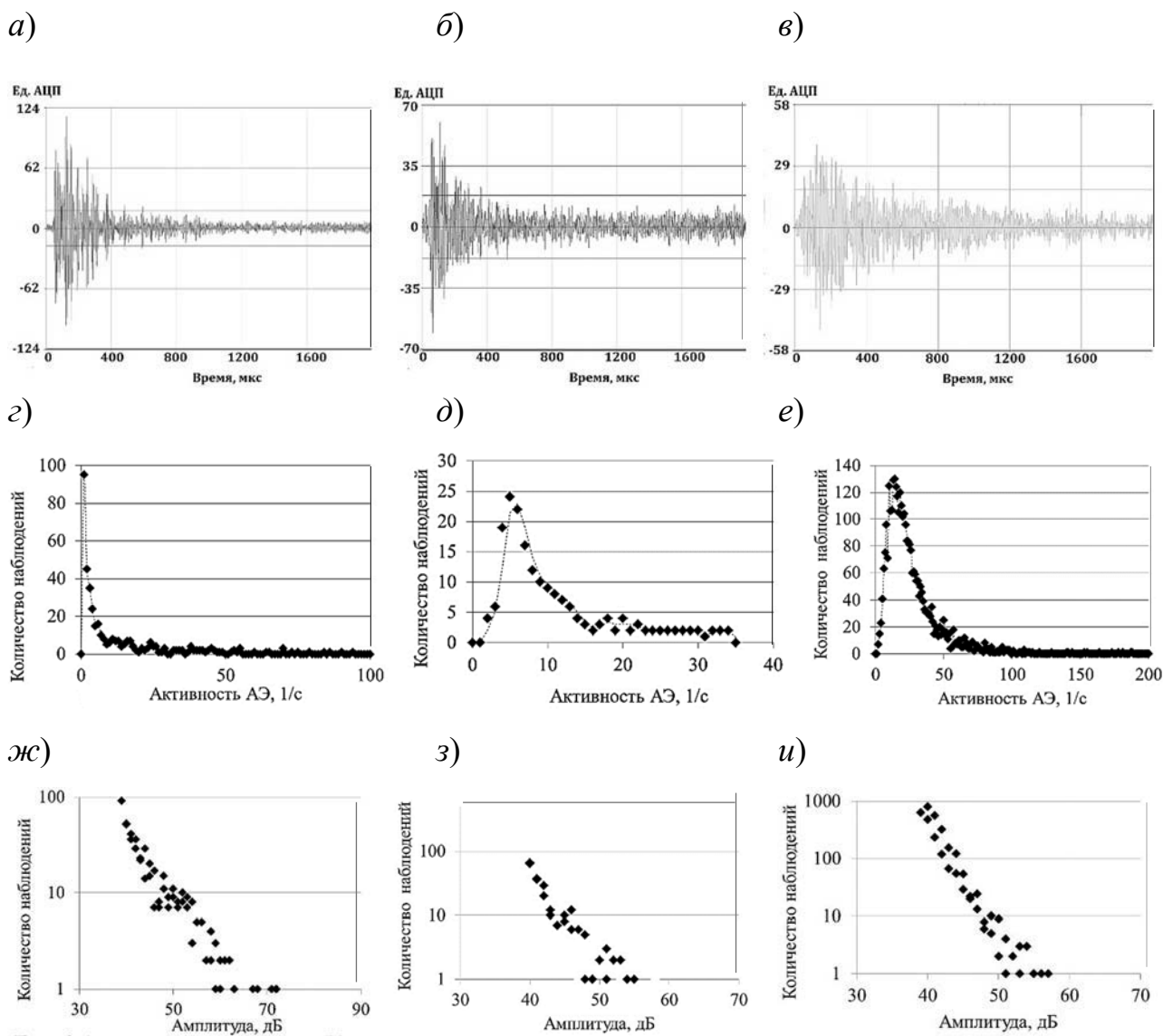


Рис. 4. Осциллограммы АЭ-сигналов (а–в), распределения активности АЭ (г–е) и амплитуд АЭ-сигналов (ж–и) для трёх рельсов: а, г, ж – в исходном состоянии; б, д, з – после ТО по режиму «отпуск»; в, е, и – после ТО по режиму «отжиг + закалка + отпуск»

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Научно-технического университета «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного фонда «Талант и успех» (проект 20-38-51019).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ono, K.** Review on Structural Health Evaluation with Acoustic Emission / K. Ono // Applied Science. – 2018. – Vol. 8, № 958.
2. **Bruzelius, K.** An initial investigation on the potential applicability of Acoustic Emission to rail track fault detection / K. Bruzelius, D. Mba // NDT&E International. – 2004. – Vol. 37. – P. 507–516.
3. **Bassim, M. N.** Detection of the onset of fatigue crack growth in rail steel using acoustic emission / M. N. Bassim, S. St. Lawrence, C. D. Liu // Engineering Fracture Mechanics. – 1994. – Vol. 41, № 2. – P. 207–214.
4. **Suwansin, W.** Deep Learning-Based Acoustic Emission Scheme for Nondestructive Localization of Cracks in Train Rails under a Load / W. Suwansin, P. Phasukkit // Sensors. – 2021. – Vol. 21, № 272.
5. The use of acoustic emission techniques to monitor fracture processes in high strength precipitation hardened aluminum alloys / A. Arieli [et al.] // Mechanics of Materials. – 1983. – Vol. 2, № 1. – P. 1–7.
6. **Houssny-Emam, M.** Study of the effect of heat treatment on low cycle fatigue in AISI4340 steel by acoustic emission / M. Houssny-Emam, M. N. Bassim // Materials Science and Engineering. – 1983. – Vol. 61, № 1. – P. 79–88.
7. **Scruby, C. B.** Effect of inclusion orientation upon acoustic emission-microstructural relationships in ferritic steels / C. B. Scruby, H. N. G. Wadley // Journal of materials science. – 1994. – Vol. 29, № 16. – P. 4167–4176.
8. Residual stress evaluation in friction stir welding of aluminum plates by means of acoustic emission and ultrasonic waves / S. Sadeghi [et al.] // FME Transactions. – 2018. – Vol. 46, № 2. – P. 230–237.

E-mail: art-marchenkov@yandex.ru.