

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАЗРУШЕНИЯ СОСУДОВ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА ПОД ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ С ПОМОЩЬЮ ЦКИ И ЭНТРОПИИ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© 2022 г. Цзян Пэн¹, Ли Кайруи^{1*}, Чжан Люинь¹, Ли Вэй¹, Янь Сяовэй¹

¹Северо-восточный нефтяной университет, 199 Фажан Роуд, Дацзин 163318, Китай

*E-mail: xiguarui@foxmail.com

Поступила в редакцию 12.01.2022; после доработки 11.03.2022

Принята к публикации 11.03.2022

Для изучения законов эволюции дефектов в баллонах, используемых для хранения водорода под давлением, при различных условиях нагружения предлагается метод, совмещающий акустическую эмиссию (АЭ) и метод цифровых изображений. При формировании цифровых изображений вводится такой статистический параметр, как среднеквадратическое отклонение (СКО), и СКО при определении деформации на поверхности образца используется для определения параметров закона пластической эволюции материала в состоянии усталости. Более того, СКО объединяется с энтропией Шеннона, основанной на временной области АЭ, оба параметра определяются как для области внутри образца, так и на его поверхности. Результаты показывают, что с помощью метода анализа корреляции цифровых изображений с СКО в качестве ключевого параметра можно точно определить закон эволюции поверхностных напряжений в процессе хрупкого разрушения материала, а полученные результат лучше, чем при традиционном анализе скорости накопления.

Ключевые слова: 4130X, корреляция цифровых изображений, акустическая эмиссия, энтропия Шеннона, напряжение, стандартное отклонение.

DOI: 10.31857/S0130308222060033; **EDN:** BMTICS

1. ВВЕДЕНИЕ

В ответ на глобальное потепление и другие климатические проблемы, вызванные чрезмерными выбросами CO₂, глобальная энергетика переходит к экологически чистой энергетике. В этом контексте водородной энергии отдается предпочтение благодаря ее безуглеродным источникам энергии. В настоящее время водородная энергия широко используется в автомобилях на водородных топливных элементах и в других областях. Решение проблемы безопасного хранения и транспортировки водорода высокого давления является ключом к развитию водородной энергетике [1]. Сталь 4130X широко используется для изготовления стальных бесшовных баллонов большого объема для хранения водорода благодаря своей высокой прочности и низкой стоимости [2, 3]. Газовый баллон эксплуатируется в рабочей среде под давлением и без давления в течение длительного времени, что приводит к образованию и расширению усталостных трещин в баллоне и даже к утечке из корпуса баллона. Поэтому методы неразрушающего контроля используются для своевременного и эффективного мониторинга повреждения материала с целью предотвращения аварий в дальнейшем.

Среди методов неразрушающего контроля акустическая эмиссия (АЭ) обладает высокой чувствительностью к микроповреждениям и может точно отражать тенденцию эволюции микроповреждений в материалах, поэтому она широко применяется для мониторинга усталостных повреждений в различных материалах, таких как металлы, бетон и керамика [4—11]. АЭ не требует внешнего возбуждения, а анализируемые сигналы генерируются в процессе разрушения материала, поэтому важно реализовать эффективное извлечение параметров сигнала повреждения материала. Энтропия Шеннона была использована в области АЭ [12—17]. Cha и др. [18] обнаружили, что по сравнению с традиционными параметрами АЭ, энтропия АЭ не зависит от порога, установленного экспериментально и в большей степени основана на полноте исследования. Формы волн АЭ могут обеспечить точное и эффективное раннее обнаружение дефектов. Более того, зарождение трещин и их распространение имеют значительную корреляцию с энтропией Шеннона. Анализ повреждений, основанный на кумулятивной энтропии АЭ, может предсказать усталостное разрушение [19—21]. Hosseini и др. [22] использовали кумулятивную энтропию Шеннона и кумулятивную относительную энтропию Кульбака—Лейблера для прогнозирования зарождения трещин и также использовали отсчеты для вычисления энтропии; однако результаты зависели от порога и параметров характеристики сигнала (отсчетов).

Цифровая корреляция изображений (ЦКИ) — это технология оптических измерений, которая рассчитывает распределение деформации на объекте по изображениям объекта до и после дефор-

мации. Метод обладает такими преимуществами, как высокая точность, низкие требования к условиям проведения испытаний, простота эксплуатации и сильная помехоустойчивость, поэтому он широко используется для измерения деформации и изучения распространения трещин [23, 24]. Swain и др. [25] использовали АЭ для контроля дефектов в стали 15CDV6 и подтвердили результаты с помощью ЦКИ; характеристики АЭ и ЦКИ показали хорошую корреляцию, поэтому совместное применение АЭ и ЦКИ является более эффективным при анализе степени деградации материала и целостности структуры. Zhang и др. [26] использовали микроскопическое моделирование и статистический анализ для прогнозирования малоциклового усталостного ресурса. Результаты моделирования показали, что критическое значение СКО может диагностировать усталостное разрушение материала, а неравномерность деформации материала может свидетельствовать о повреждении.

На основании вышеупомянутых исследований в настоящей работе с помощью ЦКИ для определения параметров повреждения изделия было определено среднеквадратическое отклонение (СКО) поверхностной деформации образца, чтобы выяснить возможность использования степени неравномерности деформации для количественной оценки усталостного повреждения в стали 4130X. При исследовании образца стали 4130X при трехступенчатом циклическом силовом нагружении на основе полной формы волны АЭ были рассчитаны энтропия Шеннона и относительная энтропия Кульбака—Лейблера. Наконец, энтропия формы волны АЭ и СКО были скомбинированы для анализа механизма повреждения материала, чтобы определить параметры АЭ в процессе повреждения структуры стали в сосудах для хранения водорода под высоким давлением.

2. ПРИНЦИПЫ МЕТОДА

2.1. Определение параметров неравномерности деформации

При ЦКИ для фотографирования поверхностной деформации образца используется ПЗС-камера. Область расчета предварительно задается с помощью анализа деформации, определяется наиболее значимая точка между целевым изображением и опорным снимком и местоположение этой точки. Значение смещения точки получается из смещения координат на целевом и опорном изображениях, а изменение значения смещения применяют для характеристики изменения деформации поверхности. Измерительная система ЦКИ и принцип ее работы показаны на рис. 1.

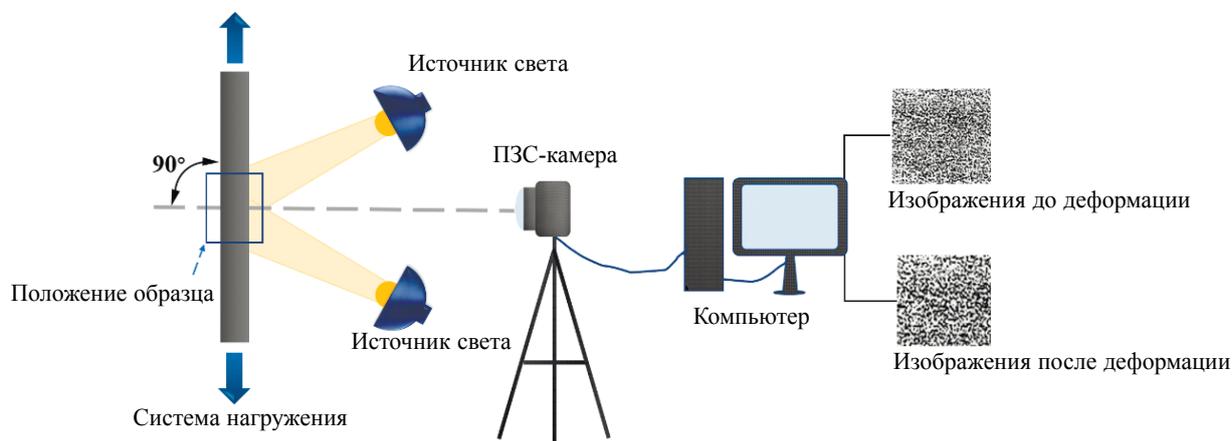


Рис. 1. Система сбора изображений для ЦКИ.

Образец подвергается непрерывному повреждению при нагружении, что в результате приводит к пластической деформации. Поскольку деформация образца неравномерна, для количественной оценки степени неравномерности деформации поверхности образца в данной работе определяли СКО напряжений. Характеристические параметры напряжения и повреждения, которые могут лучше отражать степень дисперсии данных о напряжениях на поверхности образца, выражаются как

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i - \bar{\varepsilon})^2}, \quad (1)$$

где ε_i — величина напряжения в i -ом пикселе; n — количество пикселей; $\bar{\varepsilon}$ — среднее значение напряжения каждого пикселя, определяемое как

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i. \quad (2)$$

2.2. Расчет энтропии Шеннона и относительная энтропия

Полная форма сигнала АЭ получена из экспериментальных данных. Каждая волна сигнала содержит время и соответствующее значение электрического напряжения. Различные значения электрического напряжения для каждого сигнала делятся на блоки в статистической гистограмме в соответствии с энтропией Шеннона и относительной энтропией, рассчитанной с помощью уравнений:

$$H_S = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i), \quad (3)$$

$$H_R = -\sum_{i=1}^n p_i \log_2\left(\frac{p_i}{p_{i+1}}\right), \quad (4)$$

где H_S — энтропия Шеннона; H_R — относительная энтропия Кульбака—Лейблера; n — общее количество интервалов, разделяемых по величине электрического напряжения преобразования сигнала АЭ; p_i — вероятность того, что величина электрического напряжения сигнала АЭ попадет в первый интервал.

Схема расчета энтропии Шеннона и относительной энтропии сигнала АЭ показана на рис. 2.

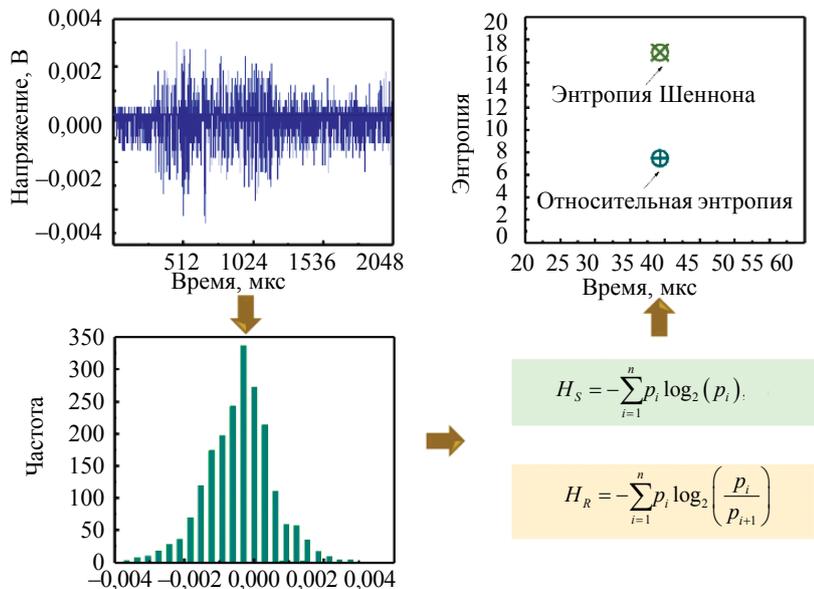


Рис. 2. Схема расчета энтропии Шеннона и относительной энтропии.

2.3. Тестовые образцы и их размеры

Сталь 4130X, которая широко используется в баллонах для хранения водорода, была выбрана в качестве материала для исследования в данной работе. Чтобы облегчить АЭ-контроль, образец был изготовлен в форме пластины. Сам образец и его конкретные размеры показаны на рис. 3.

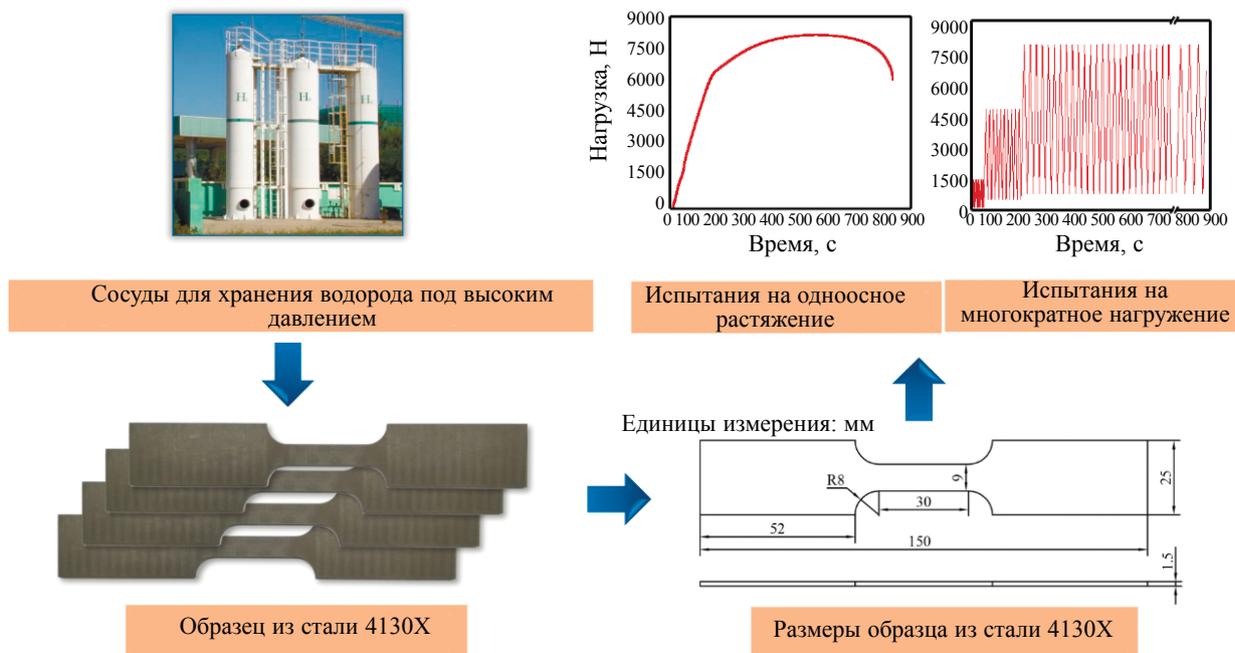


Рис. 3. Образцы из стали 4130X и их размеры.

2.4. Система и процесс контроля

Образцы были разделены на две группы в зависимости от режима нагружения: группа испытаний на разрушение при одноосном растяжении и группа испытаний на многократное нагружение. В каждую группу входило по четыре образца. Образцы из обеих групп были испытаны на универсальной испытательной машине Shimadzu AGS-X. У группы, подверженной разрушению при одноосном растяжении, при растяжении управляли скоростью растяжения, которая составляла 0,5 мм/мин. Принимая за основу результаты испытаний на одноосное растяжение, силы в 1500, 5000 и 8000 Н, соответствующие упругой фазе, фазе текучести и фазе упрочненного упрочнения образца соответственно, были выбраны в качестве трех уровней сил (1500 Н — 1 уровень, 5000 Н — 2 уровень, 8000 Н — 3 уровень) для испытания с контрольным циклом нагружения. Силы в 1500 и 5000 Н прикладывали в течение 10 циклов. Силу в 8000 Н применяли до тех пор, пока образец не разрушался и не ломался. Коэффициент циклического напряжения составлял $R = 0,1$. Весь процесс контролировался с помощью ЦКИ и АЭ.

Для АЭ-контроля использовалась система PCI-8 от PAC с порогом 30 дБ, коэффициентом усиления предусилителя — 40 дБ, временем определения пика — 300 с, временем определения всплеска — 600 с и временем записи всплеска — 1000 с, верхняя и нижняя границы диапазона аналогового фильтра равны 20 и 400 кГц соответственно, а частота дискретизации — 2000000 отсчетов в секунду. Два датчика Nano30 с частотным диапазоном 150—400 кГц располагали симметрично по центральной линии образца на расстоянии 60 мм друг от друга. Экспериментальная установка показана на рис. 4.

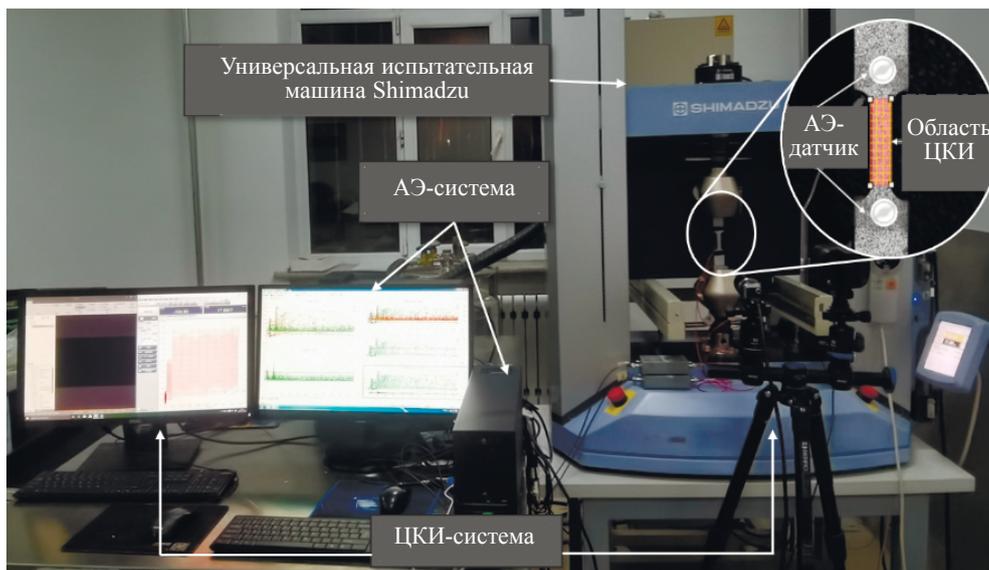


Рис. 4. Экспериментальная установка.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ И ИХ АНАЛИЗ

3.1. Анализ повреждений при растяжении стали 4130X, основанный на цифровой корреляции изображений

После обработки изображений, собранных с помощью ЦКИ-системы, был определен эволюционный процесс поверхностных напряжений образца стали 4130X в процессе растяжения (как показано на рис. 5). Испытуемый образец изучался в условиях одноосного растяжения и многократного нагружения. Поверхность испытуемого образца постепенно менялась от равномерно деформированной к неравномерно деформированной. Неравномерность деформации этой поверхности постепенно увеличивается до конкретной величины. По схеме можно предварительно определить критическую область повреждения образца.

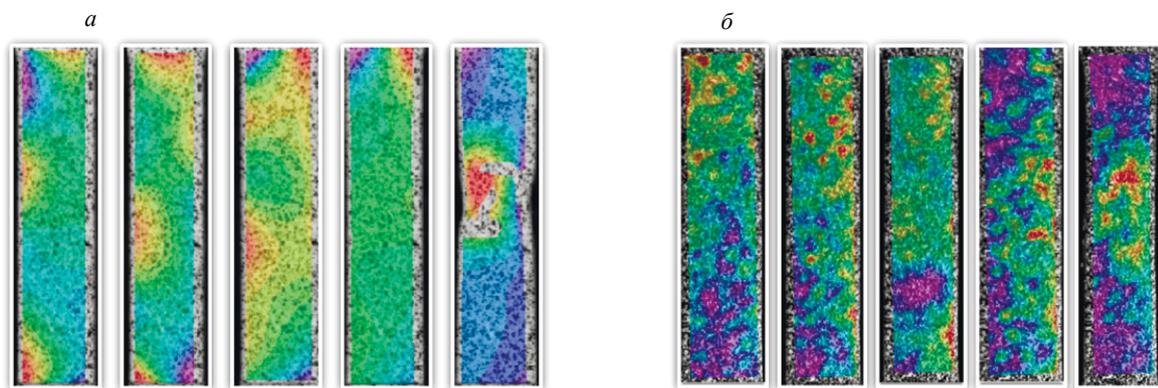


Рис. 5. Схема распределения поверхностных напряжений образца: образец при одноосном растяжении (а); многократное нагружение контролируемых участков (б).

На рис. 6 показаны кривые отклика максимальной деформации ϵ_{\max} , минимальной деформации ϵ_{\min} и средней деформации ϵ_{mean} на поверхности образца при испытании на разрушение при однонаправленном растяжении в нагрузке 3 уровня. Кривая отклика поверхностной деформации была разделена на четыре стадии в соответствии со скоростью роста и механической кривой: стадия

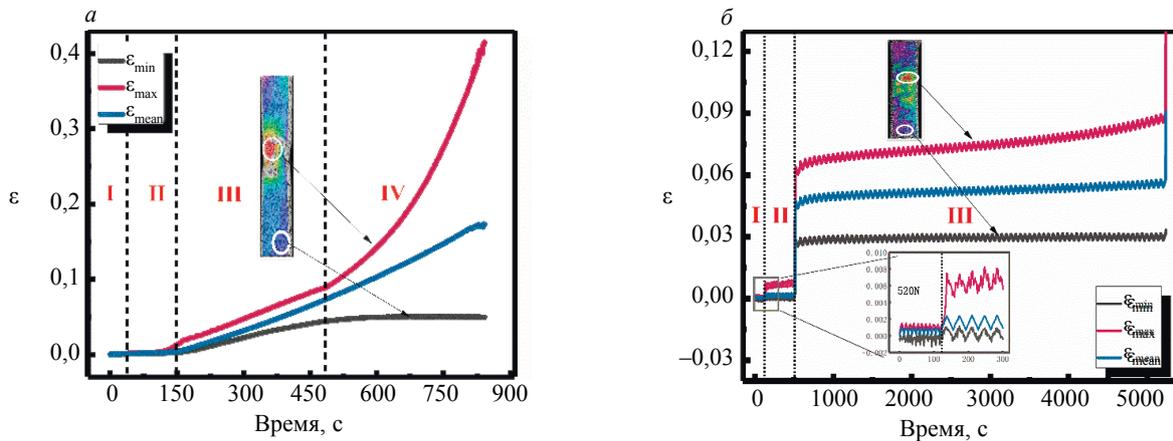


Рис. 6. Кривые отклика максимальной, минимальной и средней деформации на поверхности образца: образец при одноосном растяжении (а); многократное нагружение контролируемых участков (б).

упругости, стадия текучести, стадия упрочнения и стадия сужения. Более того, кривая отклика поверхностной деформации образца в условии многократного нагружения была разделена на три стадии (рис. 6б), соответствующие стадии цикла управления силой 3 уровня. На рис. 6б красная кривая соответствует точке, где напряжение на поверхности образца наибольшее (т.е. где напряжение сконцентрировано), а черная кривая соответствует точке, где напряжение на поверхности образца наименьшее. Максимальная деформация на поверхности образца увеличивалась с ростом нагрузки в разрывной машине из-за дефектов в микроструктуре образца. При дальнейшем увеличении нагрузки микрповреждения в образце продолжали накапливаться, что приводило к образованию микротрещин. Когда нагрузка достигала определенного значения, образец терял свою прочность и разрушался. При постоянном увеличении нагрузки и времени цикла степень неравномерности поверхностной деформации образца продолжала увеличиваться. В дальнейшем продолжится изучение закона эволюции неравномерной деформации на поверхности образца.

На рис. 7 показана кривая отклика СКО поверхностной деформации образца. Кривая отклика СКО поверхностной деформации образца при одноосном нагружении при растяжении до разрушения, показанная на рис. 7а, была условно разделена на три этапа в соответствии со скоростью роста кривой. На каждом этапе СКО увеличивался в одно и то же время ($T = 10$ с) в средней части каждого этапа. Результаты показали, что увеличение СКО на трех стадиях при $T = 10$ с составило 0,000012, 0,00036 и 0,0024, что свидетельствует об экспоненциальном увеличении СКО на трех стадиях. Повреждения продолжали накапливаться, а пластическая деформация продолжала накапливаться до разрушения образца.

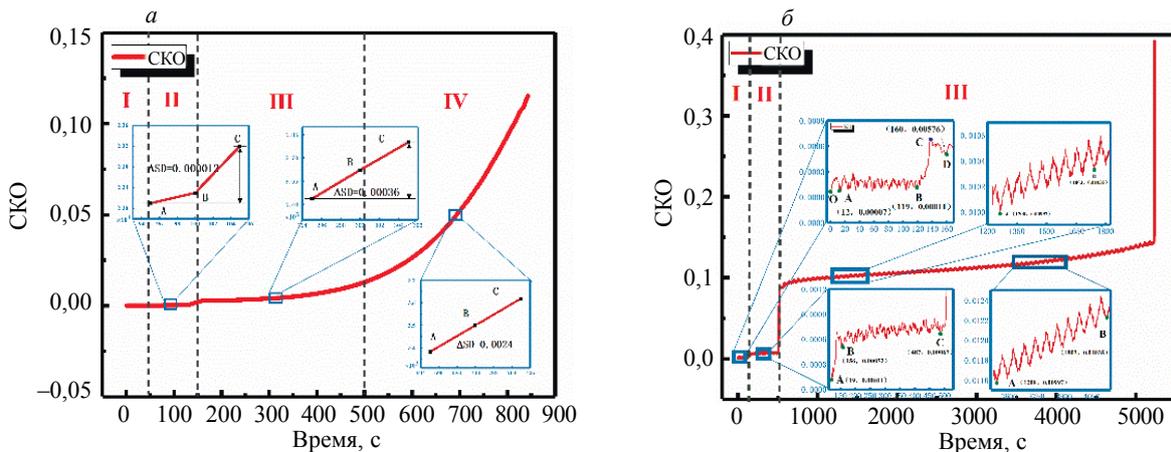


Рис. 7. Кривая отклика СКО поверхностной деформации образца: образец при одноосном растяжении (а); многократное нагружение контролируемых участков (б).

Кривая отклика поверхностной деформации СКО образца при повторном нагружении с трехуровневым контролем силы (рис. 7б) была разделена на три стадии в соответствии со скоростью роста кривой. Значение СКО наиболее быстро увеличивалось в начале каждого этапа, а циклическая силовая нагрузка колебалась; на первом и втором этапах было 10 циклов, а на третьем этапе значение СКО вначале постепенно увеличивалось и затем быстро, а время эволюции этого этапа было больше. Были рассчитаны первая стадия и первая половина третьего этапа, а также каждый из 10 циклов в средней области. Поскольку СКО периодически колеблется, для расчета скорости роста СКО была выбрана самая низкая точка каждого периода. Средние скорости роста СКО на первой и второй стадиях были рассчитаны и составили $0,37 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ и $0,64 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Средняя скорость роста СКО в первой и второй половинах третьей стадии были $0,45 \times 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ и $0,11 \times 10^{-6} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Кроме того, при увеличении силы общее СКО показывает тенденцию к увеличению, а скорость накопления повреждений увеличивается.

На рис. 8 показана микроструктура образца при разрушении при одноосном растяжении и многократном нагружении. Излом представляет собой типичное вязкое растрескивание, вызванное пластической деформацией, с многочисленными распределенными впадинами. По сравнению с образцами в условиях повторного нагружения, образцы, подверженные одноосному растяжению, имеют изломы с более крупными и глубокими впадинами, поскольку пластичность образцов при одноосном растяжении намного больше, чем у образцов в условиях повторного нагружения, то есть деформация образцов при одноосном растяжении намного больше, чем деформация образца при повторных нагружениях. Этот вывод совпадает с кривой СКО значений ЦКИ.

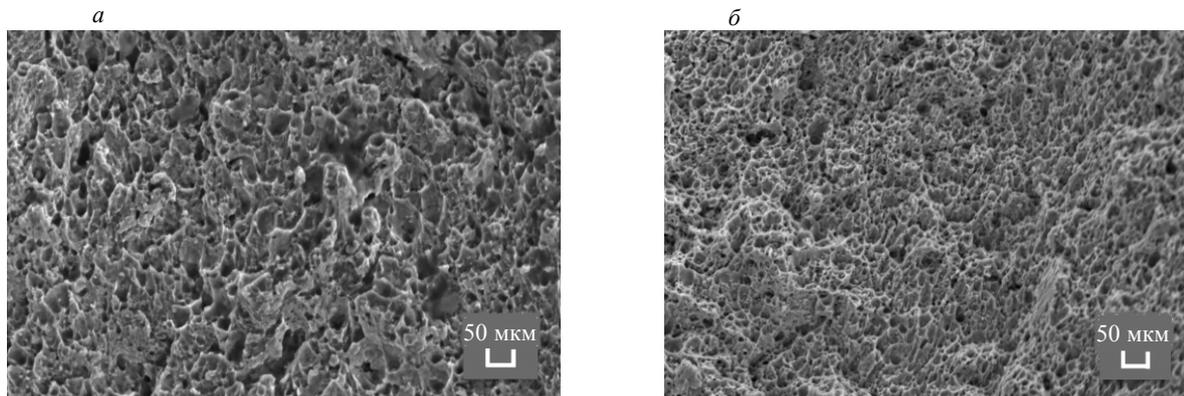


Рис. 8. Микроструктура поверхности излома образца: образец при одноосном растяжении (а); многократное нагружение контролируемых участков (б).

Таким образом, общее увеличение СКО образца, подверженного однонаправленному растяжению, намного больше, чем у образца, подверженного многократному нагружению. Кроме того, тип разрушения образца при однонаправленном растяжении представляет собой в основном пластическую деформацию, и пластичность в этом случае намного выше, чем у образца при многократном нагружении. Следовательно, кривую СКО можно использовать для разделения различных стадий повреждения независимо от того, подвергается ли образец однонаправленному растяжению или многократному нагружению. В результате метод анализа ЦКИ с использованием СКО в качестве параметра оценки может более точно характеризовать тенденцию к изменению разрушению материала.

3.2. Анализ разрушения стали 4130X, основанный на параметрах АЭ

Хотя значение СКО может быть использовано для определения закона эволюции неравномерной степени деформации на поверхности образца, значение СКО в основном контролируется путем наблюдения за поверхностью образца, и результаты, полученные для конкретного уровня силы, должны быть сопоставлены со значением, определенным внутри образца. Поэтому метод АЭ применяли в эксперименте на образце для осуществления динамического мониторинга и определения параметров разрушения при растяжении. Как видно на рис. 9а, в образце для испытания на одноосное растяжение в упругой стадии появилось небольшое количество низкоамплитудного

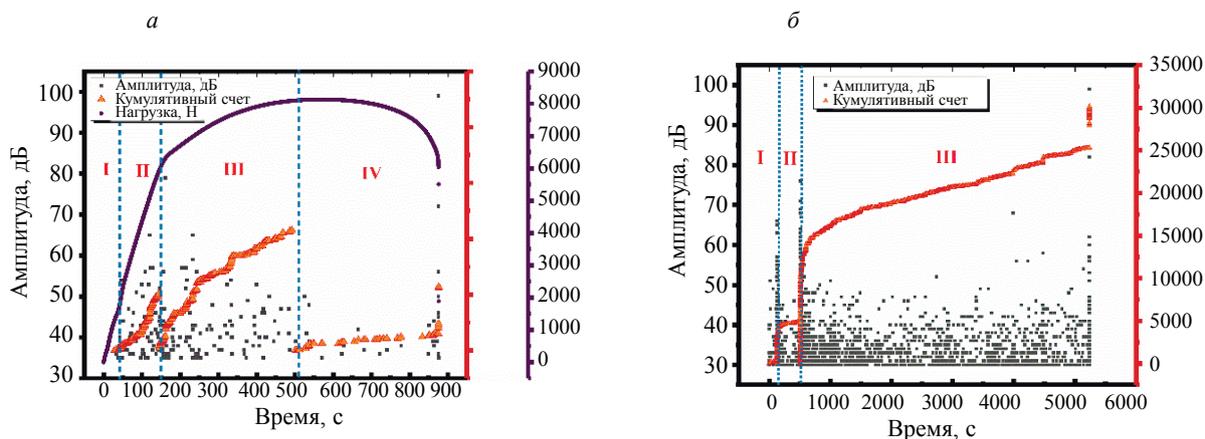


Рис. 9. Диаграмма параметров акустической эмиссии: образец при одноосном растяжении (а); многократное нагружение контролируемых участков (б).

сигнала, в основном сконцентрированного на уровне 30—40 дБ. Это объясняется главным образом малым количеством дефектов в образце и присутствием небольшого количества сигналов от дефектов в процессе растяжения, что приводит к равномерной деформации. На стадии пластической деформации генерировалось множество сигналов АЭ, амплитуда которых в основном была сосредоточена на уровне 40—50 дБ. На этой стадии, по мере увеличения нагрузки, внутренние дислокации образца постепенно увеличивались, и в образце начали происходить пластические деформации, что привело к медленному увеличению значения суммарной неоднородной деформации. На стадии упрочнения интенсивная пластическая деформация вызвала более быстрый рост величины неравномерной деформации, материал начал упрочняться, степень свободы дислокаций уменьшилась, подвижность уменьшилась, интенсивность сигнала АЭ постепенно уменьшалась, а амплитуда в основном была сосредоточена на уровне 50—60 дБ. Распространение трещины было сосредоточено в основном при 55—65 дБ, а тренд кумулятивного счета на каждом этапе был приблизительно линейным, подобно тренду СКО.

Амплитуда и кумулятивный счет для образца при многократном нагружении быстро увеличивались в начале каждого этапа (рис. 9б). Это связано с приложением осевого растягивающего напряжения, быстрым накоплением неравномерной деформации и увеличением внутреннего повреждения. По сравнению с образцом, подверженному одноосному растяжению, мощность сигнала распространения трещины увеличилась, в основном на 55—70 дБ. Кроме того, кумулятивный счет демонстрировал медленный рост в сравнении и приблизительно соответствовал тренду значения СКО.

3.3. Анализ разрушения стали 4130X при использовании информационной энтропии

Поскольку традиционный метод анализа АЭ во временной области может быть использован только для качественного анализа, визуальный контроль состояния повреждения с помощью одного параметра невозможен. На рис. 10 показана эволюция кумулятивной энтропии АЭ, кумулятивного счета и кумулятивной энергии образцов, полученных при одноосном растяжении и многократном нагружении, а также график сравнения СКО. Счет — это количество раз, когда сигнала превышает порог. Энергия отражает площадь под огибающей сигнала. Кумулятивный счет и кумулятивная энергия использовались для количественной оценки повреждения материала. Кумулятивная энтропия, кумулятивный счет и кумулятивная энергия образца при однонаправленном растяжении показали аналогичные тенденции развития. Повреждение материала можно разделить на четыре стадии на основе кумулятивной энтропии, что соответствует стадии деления СКО, и эти две стадии коррелируют друг с другом.

Для образцов, подвергавшихся повторному нагружению, кумулятивная энтропия Шеннона, кумулятивный счет и кумулятивная энергия также демонстрировали аналогичные тенденции эволюции. Кривая кумулятивной энтропии и СКО может быть четко разделена на три стадии в соответствии с тенденцией эволюции. Поэтому испытание на повторное нагружение стали 4130X может быть использовано для количественной оценки кумулятивной энтропии. Резкое увеличение

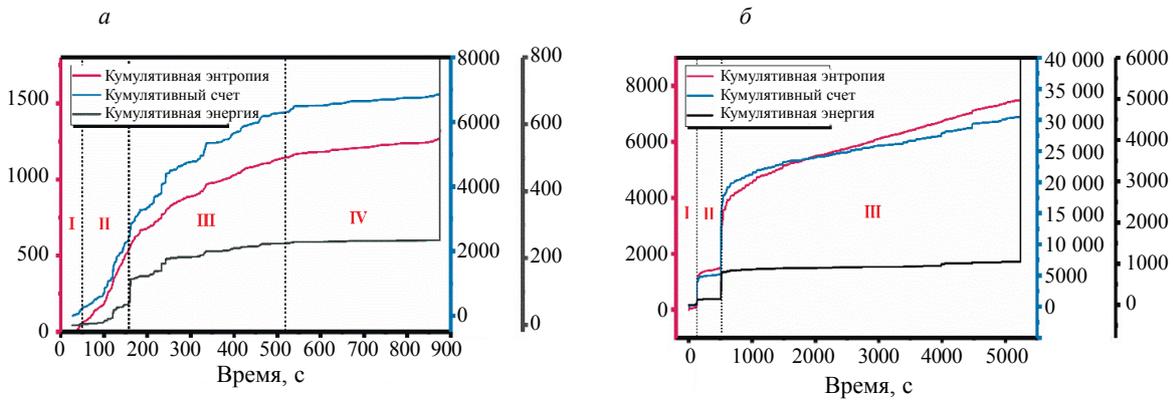


Рис. 10. Эволюция кумулятивной энтропии, кумулятивного счета, энергии и СКО образцов: образец при одноосном растяжении (а); многократное нагружение контролируемых участков (б).

было отмечено в первом цикле каждой стадии цикла, а кумулятивная энтропия Шеннона была приблизительно линейной на третьей стадии. По сравнению с кривой СКО, которая показала более высокую чувствительность, кривая значений СКО показала лучшую периодичность.

На рис. 11 показана эволюция кумулятивной энтропии Шеннона и кумулятивной относительной энтропии при разрушении образца при одноосном растяжении и многократном нагружении. Кумулятивная энтропия Шеннона и кумулятивная относительная энтропия для двух методов нагружения показывают схожие тенденции. Для образца, подвергнутого одноосному растяжению, процесс разрушения можно разделить на четыре стадии. По сравнению с кумулятивной относительной энтропией, кумулятивная энтропия Шеннона оказалась более чувствительным к повреждениям параметром.

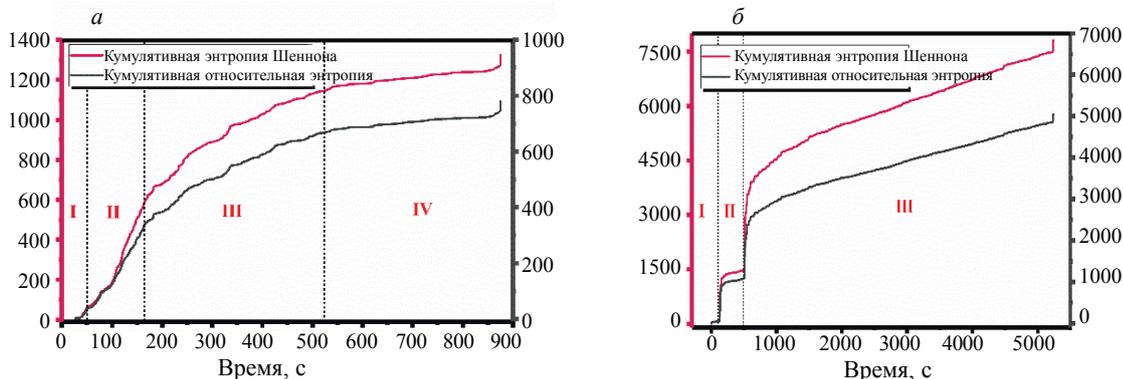


Рис. 11. Зависимости изменения кумулятивной энтропии Шеннона и кумулятивной относительной энтропии образца от времени: образец при одноосном растяжении (а); многократное нагружение контролируемых участков (б).

Для дальнейшего изучения наклона кривой кумулятивной энтропии Шеннона и кумулятивной относительной энтропии и кривой эволюции СКО для расчета был выбран один и тот же временной интервал для испытуемых образцов при одноосном растяжении и многократном нагружении для каждого периода цикла. На первом и втором этапах неравномерная деформация материала была меньше, а энтропия быстро возрастала. В начале третьей стадии неравномерная деформация постепенно увеличивалась, а энтропия уменьшалась; наклон кривой разрушения был близок к 0. Для образца при многократном нагружении кривую изменения энтропии можно четко разделить на три стадии, и в начале каждой стадии скорость увеличения неравномерной деформации внутри материала была медленной, а скорость увеличения энтропии — высокой; после неравномерная деформация увеличивалась. Скорость постепенно увеличивалась, скорость роста энтропии постепенно уменьшалась, и наклон кривой энтропии постепенно уменьшался. В образце при повторном нагружении общая пластическая деформация была меньше, чем в процессе одноосного растяжения, а наклон кривой энтропии был больше, чем в случае образца с одноосным растяжением.

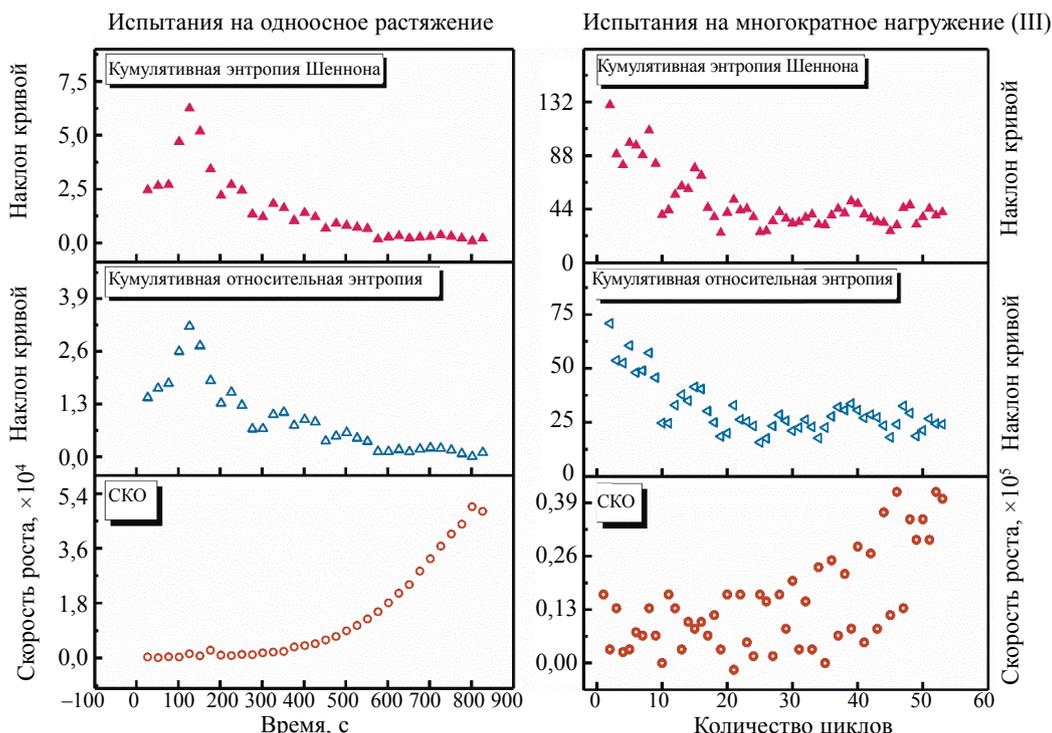


Рис. 12. Сравнение наклона кривой кумулятивной энтропии Шеннона, наклона кривой кумулятивной относительной энтропии и скорости роста кривой СКО для образца, подверженного одноосному растяжению и многократному нагружению (стадия III).

В общем, наклон кривой энтропии связан со скоростью роста кумулятивной СКО неравномерной деформации материала. Если кумулятивная скорость роста СКО неравномерной деформации больше, то наклон кривой энтропии будет меньше, т.е. если скорость роста энтропии медленнее, то образец близок к разрушению. Более того, значение СКО показывает чувствительность на стадии упрочнения в случае одноосного растяжения образцов, и наблюдается значительный всплеск.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе были проведены АЭ-контроль и контроль с применением ЦКИ на образцах стали 4130X, подверженных одноосному растяжению и многократному нагружению, и были получены следующие выводы:

1. Экспериментальные результаты показывают, что как методика АЭ-контроля для поиска внутренних повреждений материала, так и методика ЦКИ для контроля внешней поверхностной деформации материала являются надежными и могут эффективно устанавливать законы усталостного разрушения в стали 4130X.

2. Наклон кривой энтропии связан с кумулятивной скоростью роста неравномерной деформации (величина СКО) материала. Чем выше кумулятивная скорость роста величины СКО, тем меньше наклон кривой энтропии, т.е. чем ниже скорость роста величины энтропии, тем ближе образец к разрушению. Поскольку степень пластической деформации образца, подверженного одноосному растяжению, много больше, чем степень пластической деформации образца, подверженного многократному нагружению, скорость роста величины полного СКО выше, чем скорость роста величины полного СКО у образца, подверженного многократному нагружению. Следовательно, наклон кривой энтропии в состоянии, близкому разрушению образца, подверженного одноосному растяжению, много меньше (близок к 0), чем наклон кривой энтропии образца, подверженного многократному нагружению. Таким образом, совместное использование величин СКО и энтропии АЭ может лучше обнаруживать и оценивать развитие повреждений при растяжении в стали 4130X.

Авторы заявляют о том, что у них нет конфликта интересов и личной заинтересованности, которые могли бы повлиять на исследование, представленное в данной статье.

Работа выполнена в рамках проекта Фонда постдокловских исследований провинции Хэйлунцзян LBH-Q21083.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hua Z., Zhang X., Zheng J., Gu C., Cui T., Zhao Y. et al. Hydrogen-enhanced fatigue life analysis of Cr–Mo steel high-pressure vessels // *Int. J. Hydrogen. Energy*. 2017. V. 42. P. 12005—14.
2. Tsuda K., Kimura S., Takaki T., Toyofuku Y., Adaniya K., Shinto K. et al. Design proposal for hydrogen refueling infrastructure deployment in the Northeastern United States // *Int. J. Hydrogen. Energy*. 2014. V. 39. P. e7459.
3. Alazemi J., Andrews J. Automotive hydrogen fuelling stations: An international review // *Renew. Sust. Energy Rev.* 2015. V. 48. P. 483—99.
4. Seleznev M., Weidner A., Biermann H., Vinogradov A. Novel method for in situ damage monitoring during ultrasonic fatigue testing by the advanced acoustic emission technique // *Int. J. Fatigue*. 2021. V. 142. P. 105918.
5. Wadley H., Mehrabian R. Acoustic emission for materials processing: a review // *Mater. Sci. Eng.* 1984. V. 65. P. 245—63.
6. Song Z., Frühwirt T., Konietzky H. Fatigue characteristics of concrete subjected to indirect cyclic tensile loading: insights from deformation behavior, acoustic emissions and ultrasonic wave propagation // *Construct. Build. Mater.* 2021. V. 302. P. 124386.
7. Zhou Y., Lin L., Wang D., He M., He D. A new method to classify railway vehicle axle fatigue crack AE signal // *Appl Acoust.* 2018. V. 131. P. 174—85.
8. Dong X., Yang G., Liu S. Experimental study on AE response and damage evolution characteristics of frozen sandstone under uniaxial compression // *Cold Regions Sci. Technol.* 2022. V. 193. P. 103424.
9. Grosse C.U., Ohtsu M. Acoustic emission testing: Springer Science & Business Media, 2008.
10. Sakaki S., Horibe S., Yoshida M. Effect of stacking fault energy on pulsating fatigue behavior for fcc metals under the fully repeated loading // *Materials Science & Engineering, A. Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*. 2014.
11. Adibi H., Ashtiani A.S., Rahimi A. In-Process Monitoring of Nickel-Based Super Alloy Grinding Using the Acoustic Emission Method // *Russian Journal of Nondestructive Testing*. 2019. V. 55. No. 12. P. 909—917.
12. Hao Q., Zhang X., Wang Y., Shen Y., Makis V. A novel rail defect detection method based on undecimated lifting wavelet packet transform and Shannon entropy-improved adaptive line enhancer // *J. Sound. Vib.* 2018. V. 425. P. 208—20.
13. He K., Xia Z., Si Y., Liang J., Yong J., Shi W. Detection of arc characteristics and weld forming quality of aluminum alloy DP-MIG welding using AE signal through resonance demodulation // *Measurement*. 2021. P. 110427.
14. Sun F., Xiao B., Zhang Y. Quantitative damage evaluation of LY225 steel under monotonic tensile loading based on acoustic emission entropy // *J. Construct. Steel. Res.* 2021. V. 185. P. 106860.
15. Karimian S.F., Modarres M. Acoustic emission signal clustering in CFRP laminates using a new feature set based on waveform analysis and information entropy analysis // *Compos Struct.* 2021. V. 268. P. 113987.
16. Sauerbrunn C.M., Kahirdeh A., Yun H., Modarres M. Damage assessment using information entropy of individual acoustic emission waveforms during cyclic fatigue loading // *Appl. Sci.* 2017. V. 7. P. 562.
17. Kahirdeh A., Yun H., Modarres M. Degradation entropy: an acoustic emission based approach to structural health assessment / In: *Structural Health Monitoring*. 2017. P. 2213—9.
18. Chai M., Zhang Z., Duan Q. A new qualitative acoustic emission parameter based on Shannon's entropy for damage monitoring // *Mech. Syst. Signal. Proces.* 2018. V. 100. P. 617—29.
19. D'Angela D., Ercolino M. Acoustic Emission Entropy as a fracture-sensitive feature for real-time assessment of metal plates under fatigue loading // *Procedia. Struct. Integr.* 2019. V. 18. P. 570—6.
20. Karimian S.F., Modarres M., Bruck H.A. A new method for detecting fatigue crack initiation in aluminum alloy using acoustic emission waveform information entropy // *Eng. Fract. Mech.* 2020. V. 223. P. 106771. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106771>
21. Chai M., Zhang Z., Duan Q., Song Y. Assessment of fatigue crack growth in 316LN stainless steel based on acoustic emission entropy // *Int. J. Fatigue*. 2018. V. 109. P.145—56.
22. Hosseini S.M., Ghasemi-Ghalebahman A., Azadi M., Jafari S.M. Crack initiation detection in crankshaft ductile cast iron based on information entropy of acoustic emission signals under tensile loading // *Eng. Fail. Anal.* 2021. P. 105547. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105547>
23. Zeng L., Wang L., Hua P., He Z., Zhang G. In-situ investigation of dwell fatigue damage mechanism of pure Ti using digital image correlation technique // *Mater Charact.* 2021. V. 181. P. 111466. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.111466>
24. Baktheer A., Becks H. Fracture mechanics based interpretation of the load sequence effect in the flexural fatigue behavior of concrete using digital image correlation // *Construct. Build. Mater.* 2021. V. 307. P. 124817. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124817>
25. Swain D., Binu B., Purushothaman K., Rao G., Thomas B.P., Kurian T. et al. Use of full-field measurements for understanding acoustic emission (AE) signals from 15CDV6 ESR steel specimens // *Procedia Struct. Integr.* 2019. V. 14. P. 207—14.
26. Zhang K.S., Shi Y.K., Ju J.W. Grain-level statistical plasticity analysis on strain cycle fatigue of a FCC metal // *Mech. Mater.* 2013. V. 64. P. 76—90. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.05.001>