

Изменение параметра акустической анизотропии конструкционной стали при усталостном разрушении

© О.А. Сергеева¹, А.В. Гончар²

¹ООО «Волга-Спецгидроэнергомонтаж» — «Камспецэнерго»,
г. Набережные Челны, 423800, Россия

²ИПМ РАН, г. Нижний Новгород, 603024, Россия

Повреждения материала оказывают влияние на его микроструктуру, физические и акустические свойства. В настоящей работе рассмотрены микроструктурные и ультразвуковые исследования стали Ст3сп5 при циклическом одноосном растяжении—сжатии в области малоциклового усталости. Усталостные испытания проводились поэтапно. На каждом этапе циклического деформирования исследовалась структура образцов из стали ультразвуковым эхо-методом и определялось изменение параметра акустической анизотропии. Установлена взаимосвязь между акустическими характеристиками материала и степенью его поврежденности, на основе которой можно спрогнозировать остаточный ресурс. Данный способ определения остаточного ресурса отличается тем, что не требуется определять длину акустического пути, например, толщину стенки исследуемого объекта. Рассмотрено влияние амплитуды деформации цикла на скорость изменения параметра акустической анизотропии. Установлена прямая линейная зависимость между изменением этого параметра и относительным количеством циклов. Предложен алгоритм определения остаточного ресурса материала на основе данных, полученных ультразвуковым методом.

Ключевые слова: малоцикловая усталость, параметр акустической анизотропии, неразрушающий контроль, остаточный ресурс, конструкционная сталь

Введение. Усталостному повреждению подвержены металлические конструкции и оборудование всех промышленных отраслей. Исследование взаимосвязей между усталостным повреждением материала и его остаточным ресурсом представляет большой практический интерес с точки зрения промышленной безопасности. В последнее время разработан ряд неразрушающих оценочных технологий для наблюдения за усталостным поведением материала, включающих в себя оптические, акустические, электрические, магнитные, термические и дифракционные методы [1].

Усталость может быть охарактеризована как комплексный процесс, включающий четыре стадии: инкубацию, возникновение трещины, ее рост и разрушение. Как правило, с помощью неразрушающего контроля можно определить наличие и развитие усталостных трещин. Стадии инкубации и возникновения усталостной трещины, сопровождающиеся накоплением микроструктурных повреждений, достаточно редко исследуют неразрушающим способом. Основные трещины возникают только перед окончательным разрушением

материала, а микродефекты появляются и развиваются на ранней стадии повреждения [2–7]. Поскольку микроструктурные повреждения занимают около 90 % жизненного цикла материала [3–5, 8], их ранняя диагностика очень важна для предупреждения промышленных аварий. Для того чтобы эффективно оценить усталостное микроструктурное повреждение материала неразрушающим способом в целях обеспечения надежности металлической конструкции на протяжении всего срока эксплуатации, требуются методы и средства контроля, обладающие такой чувствительностью, которая позволяет превышать уровень отслеживания на этапе роста трещины.

Разработано несколько технологий для оценки усталостных повреждений микроструктуры металла с использованием ультразвуковых объемных волн [8–14, 22–27]. Параметр акустической анизотропии можно успешно применять при изучении деградации металла в процессе пластической деформации [15–24] и ползучести [16, 17, 21]. Данный подход отличается несколькими преимуществами. Во-первых, не требуется определять толщину металла исследуемого объекта, потому что параметр акустической анизотропии находят эхо-методом путем измерения времени распространения двух поперечных волн взаимноортогональной поляризации. Во-вторых, могут быть использованы и контактные пьезоэлектрические датчики, и бесконтактные акустические преобразователи. В-третьих, поскольку параметр акустической анизотропии не зависит от температуры [20, 21], процесс ультразвуковых замеров может быть легко автоматизирован. Благодаря этим преимуществам параметр акустической анизотропии можно применять для контроля усталости материалов.

Цель данной работы — исследование процесса накопления усталостных микроструктурных повреждений в низкоуглеродистой стали марки СтЗсп5 с помощью ультразвукового эхо-импульсного метода.

Материал для исследования. Горячекатаная низкоуглеродистая сталь марки СтЗсп5, выбранная для исследований, характеризуется высокой обрабатываемостью и хорошей свариваемостью, в связи с чем широко распространена в промышленности. Механические свойства стали марки СтЗсп5 приведены ниже:

Предел текучести, МПа	270 ± 5
Предел прочности, МПа	490 ± 5
Удлинение, %	28 ± 1

Химический состав исследуемой стали:

Химический элемент	Fe	C	Si	Mn	S	P
Количество элемента, % (мас.)	98,7	0,176	0,202	0,651	0,008	0,016

Малоцикловые усталостные испытания. Для проведения экспериментов были изготовлены образцы круглого сечения (рис. 1). На их поверхности выполнены две плоскопараллельные площадки для ультразвуковых исследований. Испытания образцов на малоцикловую усталость проведены с использованием сервогидравлической машины BISS Nano UT-01-0025 при следующих условиях: жесткий режим с коэффициентом асимметрии цикла -1 ; частота нагружения 1 Гц; температура окружающей среды 23 °С. Амплитуду деформации цикла контролировали с помощью экстензометра BISS AC-07-1005. Каждый образец подвергался испытаниям с определенной амплитудой деформации цикла. На каждом этапе эксперимента после остановки испытательной машины из нее вынимали образец для проведения ультразвуковых исследований. Испытания проходили до момента образования видимой невооруженным глазом трещины длиной около 1 мм.

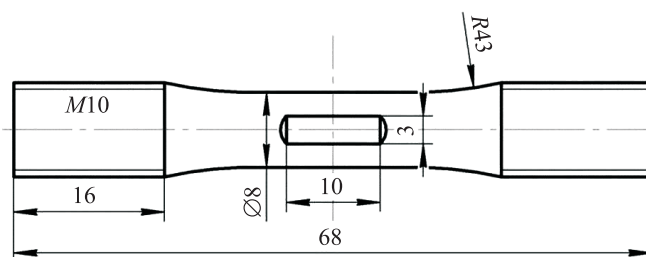


Рис. 1. Образец для испытаний на малоцикловую усталость

Металлографические исследования. Перед усталостными испытаниями проводили металлографические исследования каждого образца. Сначала поверхность металлического образца была механически отполирована, а затем для выявления межзеренных границ протравлена 5%-ным водным раствором азотной кислоты. Наблюдение за микроструктурой образцов велось с помощью оптического микроскопа Altami MET 3M. Для каждого образца была получена серия фотоснимков одной и той же области до усталостных испытаний и после каждого этапа нагружения.

Ультразвуковые измерения. Время распространения двух поперечных волн между двумя плоскопараллельными площадками образцов, испускаемых во взаимно перпендикулярных направлениях вдоль и поперек оси нагружения, измерялось эхо-методом. Возбуждение и распространение объемных упругих волн осуществлялись с помощью пьезоэлектрического датчика поперечных волн V157 Olympus диаметром 3 мм с центральной частотой 5 МГц. Датчик устанавливали на поверхности плоскопараллельной площадки на том участке, в пределах которого проводились измерения. Ультразвуковой дефектоскоп А1212

MASTER (ООО «АКС», Россия) служил генератором электрических импульсов. Цифровой осциллограф LA-n1USB с установленным программным обеспечением ADCLab записывал на ПК амплитудно-временные диаграммы эхо-импульсов от пьезопреобразователя. Частота дискретизации составляла 1 Гц. Время распространения ультразвуковой волны измерялось между первым и вторым эхо-импульсом.

Ультразвуковые измерения выполнялись на образцах, находящихся в свободном ненагруженном состоянии, до усталостных испытаний и после каждого этапа нагружения. Время распространения определялось путем усреднения десятикратно повторенных замеров, высокая точность которых обеспечивалась постоянным контактом и четким позиционированием датчика. Абсолютная погрешность измерения не превышала 1 нс. Более подробное описание прецизионных измерений времени распространения эхо-методом приведено в [25].

Параметр акустической анизотропии A был определен из соотношения времен распространения t_1 и t_2 двух перпендикулярно направленных объемных волн:

$$A = 2 \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_1}.$$

Результаты усталостных испытаний. Для всех образцов были получены петли гистерезиса напряжения — деформации на каждом цикле нагружения. Перераспределения между упругой и пластической составляющими не наблюдалось. Также не произошло ни упрочнения, ни разупрочнения материала образцов, т. е. фактически диапазоны пластической деформации и амплитуды напряжения были постоянными на всем этапе циклического нагружения. Петли гистерезиса напряжения — деформации и кривые циклического упрочнения — разупрочнения для образцов с максимальной (1) и минимальной (2) долговечностью представлены на рис. 2.

Испытания проводили с размахами деформаций ϵ цикла 0,4; 0,5; 0,6 и 0,8 %, амплитуды напряжений σ цикла составили 250, 265, 280 и 300 МПа, значения пластической деформации — 0,076; 0,156; 0,232 и 0,394 % соответственно.

Экспериментальные данные по зависимости пластической деформации от соответствующего числа циклов нагружения (рис. 3) могут быть описаны соотношением Коффина — Мэнсона (коэффициент корреляции составил 0,996):

$$\Delta\epsilon_{pl} = 1,634 N_f^{-0,8}.$$

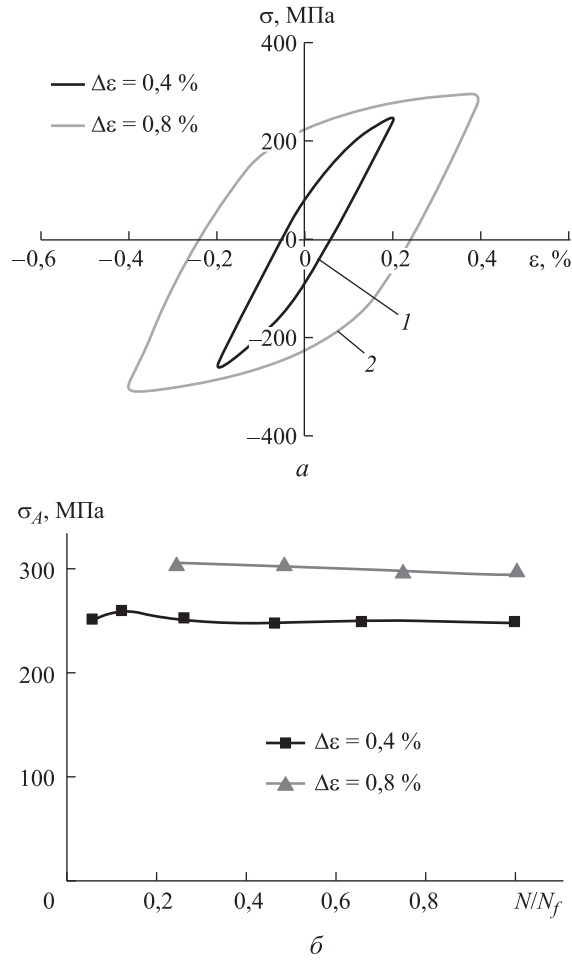


Рис. 2. Петли гистерезиса напряжения — деформации (а) и циклическая кривая упрочнения — разупрочнения (б) для двух образцов с максимальной (1) и минимальной (2) долговечностью

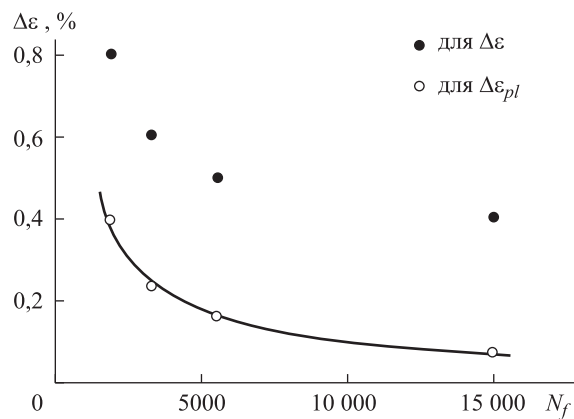


Рис. 3. Изменение пластической деформации $\Delta\varepsilon$ от циклов нагружения N_f

Микроструктурные изменения. Изменения микроструктуры образца в процессе усталостных испытаний в области изменения деформации 0,4 % показаны на рис. 4. Следует отметить, что наблюдаемые изменения микроструктуры данного образца характерны для всей партии исследуемых образцов.

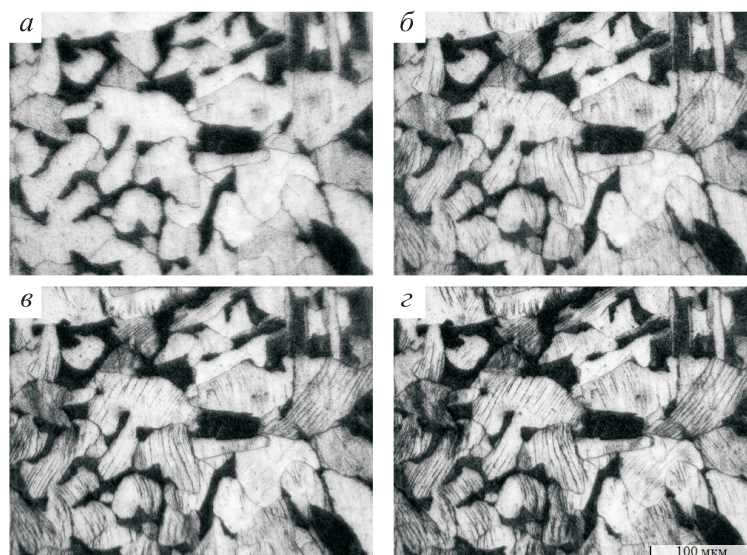


Рис. 4. Оптические снимки металлической поверхности образца в области изменения деформации 0,4 % до испытаний (*а*), после 500 циклов (*б*), после 1000 циклов (*в*), после 2000 циклов (*г*) нагружения

Микроструктура стали марки СтЗсп5 однородна, она состоит из зерен феррита и перлита. Средний размер зерен составляет 37 мкм, соотношение феррита к перлиту — 90:10. По результатам наблюдения можно сделать вывод о том, что уже на первых этапах усталостных испытаний появляются устойчивые полосы скольжения в зернах феррита. При последующем нагружении возникают новые полосы скольжения (их количество увеличивается), а существующие полосы скольжения сливаются. Устойчивые полосы скольжения ориентированы преимущественно поперек оси нагружения.

Акустические измерения. В результате акустических исследований образцов, прошедших все этапы усталостных испытаний, были получены линейные зависимости между параметром акустической анизотропии и числом циклов нагружения (рис. 5). Параметр акустической анизотропии уменьшается при усталостном нагружении на всех диапазонах деформации. Для всех образцов величина наименьшего параметра акустической анизотропии (с учетом точности измерений) оказалась одинаковой ($-0,0029$). Кроме того, следует учитывать, что исходное состояние образцов было различным.

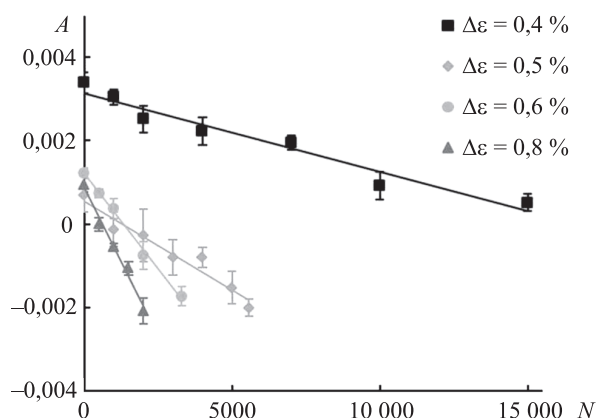


Рис. 5. Изменение параметра акустической анизотропии в процессе усталостных испытаний

Обсуждение. Скорость изменения параметра акустической анизотропии прямо пропорциональна диапазону деформации, так как соотносится с усталостной долговечностью (рис. 6). При контроле процесса усталостного разрушения в качестве характеристического параметра можно использовать соотношение dA/dN .

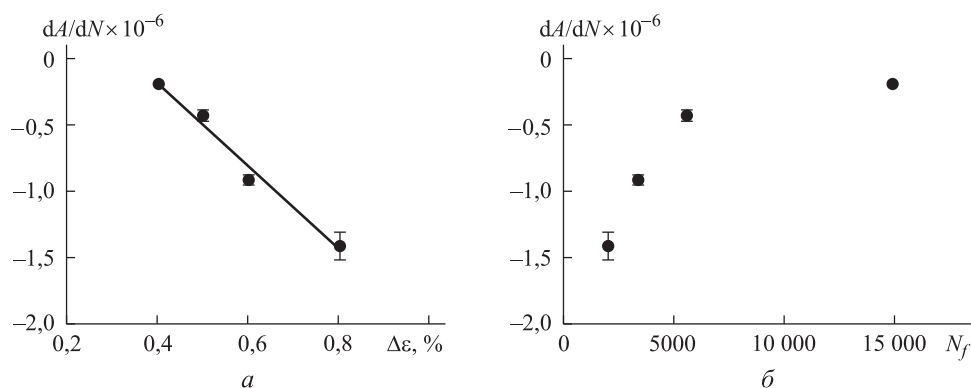


Рис. 6. Скорость изменения параметра акустической анизотропии в зависимости от диапазона деформации (а) и числа циклов нагружений (б)

Изменение параметра акустической анизотропии может быть следствием таких физических явлений, как текстурное изменение из-за пластической деформации [17, 18, 20, 21, 24–28], наличие приложенных или остаточных напряжений [25–28], фазовых превращений [27], образование ориентированных дефектов [17, 28].

Применительно к данному исследованию предполагается, что существенных изменений текстуры не произошло по следующим причинам: измерение параметра акустической анизотропии проводилось на образцах в ненапряженном состоянии; исследуемая сталь

не была подвержена фазовым превращениям; отсутствовало одно-стороннее накопление в образцах пластических деформаций.

Как отмечалось ранее, устойчивые полосы скольжения, обнаруженные на металлической поверхности исследуемых образцов, были преимущественно ориентированы поперек оси нагружения. Рельеф поверхности предположительно отражает движение дислокаций в определенных кристаллографических направлениях внутри объема материала. Следовательно, такие дефекты, образующиеся в объеме материала, как дислокации, дисклинации, мезодефекты и другие им подобные, ориентированы преимущественно поперек оси нагружения и влияют на скорость распространения объемных волн [24]. В связи с этим можно предположить, что развитие таких дефектов вызывало монотонное уменьшение параметра акустической анизотропии.

Ранее измерения параметра акустической анизотропии проводились на образце, изготовленном из исследуемой марки стали, который подвергался одноосному растяжению при температуре окружающей среды [25]. Было получено, что после удлинения образца на 12 % параметр акустической анизотропии увеличился на 0,0048. Из этого можно заключить, что параметр акустической анизотропии больше возрастает вследствие пластической деформации при одноосном растяжении, чем при циклической нагрузке на растяжение — сжатие. Кроме того, уменьшение параметра акустической анизотропии, вызванное акустоупругим эффектом, составило бы $-0,0009$ на каждые 100 МПа напряжения, что эквивалентно усталостному изменению при $N/N_f = 0,31$. Таким образом, напряжение и пластическая деформация накладывают ограничения при использовании параметра акустической анизотропии для анализа усталостного поведения материала.

Экспериментальные данные для всей партии исследуемых образцов, представленные на рис. 7 в координатах $\{N/N_f, \Delta A\}$, могут быть описаны прямой линейной зависимостью

$$N/N_f = -340\Delta A.$$

Это соотношение можно применять для определения остаточного ресурса материала на основе ультразвуковых данных, что целесообразно использовать на практике.

Несмотря на то что предложенный алгоритм имеет некоторые ограничения для применения на практике, прогнозирование остаточного ресурса материала на основе ультразвукового метода следует рассматривать как направление, которое имеет смысл разрабатывать. Возможность использования данного алгоритма в значительной степени зависит от развития устойчивых полос скольжения и изменения параметра акустической анизотропии.

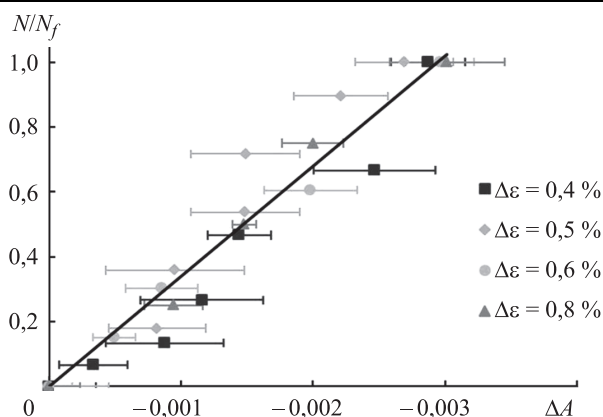


Рис. 7. Зависимость относительного числа циклов нагружения от изменения параметра акустической анизотропии

Следует отметить, что для всей партии исследуемых образцов скорость изменения ультразвуковых параметров линейно связана с диапазоном деформации:

$$\Delta\varepsilon = -3106(dA/dN) + 0,0035.$$

Из изложенного выше следует, что при изменении деформации в области 0,35 % информативные параметры остаются постоянными. С практической точки зрения вполне вероятно, что при уменьшении диапазона деформации до критического значения соотношение dA/dN уменьшится до нуля, т. е. произойдет смена механизма разрушения. Предположительно смена механизмов разрушения возникает при переходе от малоциклового усталости к многоциклового. Таким образом, экспериментальное исследование зависимости $dA/dN(\Delta\varepsilon)$ в широком диапазоне деформаций дает возможность найти физическую границу между малоциклового и многоциклового усталостью.

Заключение. Во время усталостных испытаний были экспериментально определены изменения микроструктуры и параметра акустической анизотропии в объеме образцов из горячекатаной низкоуглеродистой стали. На поверхности поврежденных образцов возникали устойчивые полосы скольжения. По результатам проведенных исследований было установлено, что параметр акустической анизотропии уменьшается прямо пропорционально числу циклов нагружения со скоростью, зависящей от диапазона изменения деформации. Можно предположить, что уменьшение параметра акустической анизотропии связано с развитием микротрещин в направлении, которое проходит преимущественно поперек оси нагружения. Для всех образцов с разными амплитудами деформации цикла нагружения была получена линейная зависимость изменения параметра

акустической анизотропии от относительного числа этих циклов. На основании результатов ультразвуковых исследований была разработана и предложена методика оценки усталостной поврежденности материала.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ
в рамках научного проекта № 20-38-70051.*

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wisner B., Mazur K., Kontsos A. The use of nondestructive evaluation methods in fatigue: A review. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2020, vol. 43, pp. 859–878.
- [2] Suh C.M., Yuuki R., Kitagawa H. Fatigue microcracks in low carbon steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1985, vol. 8, pp. 193–203.
- [3] Chen E.Y., Sauer S., Meshii M., Tucker W.T. Fatigue microcrack distributions and the reliability of a nickel base superalloy. *Int. J. Fatigue*, 1997, vol. 19, pp. 75–82.
- [4] Lindstedt U., Karlsson B., Nystr M. Small fatigue cracks in an austenitic stainless steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 1998, vol. 21, pp. 85–98.
- [5] Besel M., Brueckner-Foit A. Surface damage evolution of engineering steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2008, vol. 31, pp. 885–891.
- [6] Kabatova M., Dudrova E., Wronski As. Microcrack nucleation, growth, coalescence and propagation in the fatigue failure of a powder metallurgy steel. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 2009, vol. 32, pp. 214–222.
- [7] Pan S., Yu G., He X., Li S., Zhang Y., Li Q. Collective evolution of surface microcrack for compacted graphite iron under thermal fatigue with variable amplitude. *Int. J. Fatigue*, 2019, vol. 118, pp. 139–149.
- [8] Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V., Kachanov M. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring. *Int. J. Eng. Sci.*, 2019, vol. 135, pp. 17–22.
- [9] Cantrell J.H., Yost W.T. Nonlinear ultrasonic characterization of fatigue microstructures. *Int. J. Fatigue*, 2001, vol. 23, pp. 487–490.
- [10] Gupta S., Ray A., Keller E. Online fatigue damage monitoring by ultrasonic measurements: A symbolic dynamics approach. *Int. J. Fatigue*, 2007, vol. 29, pp. 1100–1114.
- [11] Straka L., Yagodzinskyy Y., Landa M., Hänninen H. Detection of structural damage of aluminum alloy 6082 using elastic wave modulation spectroscopy. *NDT E. Int.*, 2008, vol. 41, pp. 554–563.
- [12] Mishakin V.V., Mitenkov F.M., Klyushnikov V.A., Danilova N. The use of ultrasonic signals and optical method to estimate the damage of materials after fatigue loading. *Nondestruct. Test Eval.*, 2010, vol. 25, pp. 279–288.
- [13] Mishakin V., Klyushnikov V., Gonchar A., Kachanov M. Estimating fatigue damage of austenitic steel by combining the ultrasonic with eddy current monitoring. *J. Nondestruct. Eval.*, 2019, vol. 38, p. 4.
- [14] Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M. Prediction of fatigue life of metastable austenitic steel by a combination of acoustic and eddy current data. *Int. J. Fatigue*, 2020, vol. 141, art. no. 105846.
- [15] Mishakin V.V., Naumov M.Y., Mishakin S.V., Kassina N.V. Development of an acoustic method for assessing the damage to metal alloys before formation of a macrocrack. *Russ. J. Nondestruct. Test.*, 2007, vol. 43, pp. 677–682.

- [16] Kowalewski ZI., Mackiewicz S., Szelażek J., Pietrzak K., Augustyniak B. Evaluation of damage in steels subjected to exploitation loading - destructive and non-destructive methods. *Int. J. Mod. Phys. B.*, 2008, vol. 22, pp. 5533–5538.
- [17] Szelażek J., Mackiewicz S., Kowalewski ZI. New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep. *NDT E. Int.*, 2009, vol. 42, pp. 150–156.
- [18] Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Kassina N.V. Research on the fracture process of steels by the acoustic method and the pitch net method. *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2009, vol. 38, pp.443–447.
- [19] Belyaev A.K., Lobachev A.M., Modestov V.S., et al. Estimating the plastic strain with the use of acoustic anisotropy. *Mech. Solids*, 2016, vol. 51, pp. 606–611.
- [20] Kurashkin K.V., Gonchar A.V. Variation of acoustic characteristics of an aluminum alloy during plastic deformation at room and subzero temperatures. In: *AIP Conf. Proc.*, 2018, vol. 2053 (1), art. no. 030030. DOI: 10.1063/1.5084391
- [21] Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z.L. Prediction of the mechanical properties of P91 steel by means of magneto-acoustic emission and acoustic birefringence. *J. Nondestruct. Eval.*, 2017, vol. 36, p. 43.
- [22] Krysztofik J., Kukla D., Manaj W., Socha G. Evaluation of damage degree of inconel 718 alloy with the use of non-destructive methods. *Russ. J. Nondestruct. Test*, 2019, vol. 55, pp. 299–307.
- [23] Tretyakov D., Belyaev A., Shaposhnikov N. Acoustic anisotropy and localization of plastic deformation in aluminum alloys. *Mater. Today Proc.*, 2020, vol. 30, pp. 413–416.
- [24] Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kirikov S.V., Klyushnikov V.A. Evaluation of condition of low-carbon steels experiencing plastic deformation using the effect of acoustic birefringence. *Nondestruct. Test Eval.*, 2021, vol. 36, pp. 225–235.
- [25] Kurashkin K.V. Study of the acoustoelastic effect in an anisotropic plastically deformed material. *Acoust. Phys.*, 2019, vol. 65, pp. 316–321.
- [26] Hirao M., Pao Y.H. Dependence of acoustoelastic birefringence on plastic strains in a beam. *J. Acoust. Soc. Am.*, 1985, vol. 77, pp. 1659–1664.
- [27] Pao Y.H., Wu T.T., Gamer U. Acoustoelastic birefringences in plastically deformed solids: Part I — Theory. *J. Appl. Mech.*, 1991, vol. 58, pp. 11–17.
- [28] Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A. Investigation of the correlation between acoustic anisotropy, damage and measures of the stress-strain state. *Procedia Struct. Int.*, 2017, vol. 6, pp. 201–207.

Статья поступила в редакцию 12.10.2021

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Сергеева О.А., Гончар А.В. Изменение параметра акустической анизотропии конструкционной стали при усталостном разрушении. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2021-11-2125>



Сергеева Ольга Александровна — старший инженер технико-экономического отдела, соискатель, ООО «Волга-Спецгидроэнергомонтаж» — «Камспецэнерго». Область деятельности и научных интересов: промышленное оборудование, усталость, пластическое деформирование, анизотропия упругих свойств, микроструктура. e-mail: sergeeva_oa_kse@mail.ru



Гончар Александр Викторович — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Институт проблем машиностроения РАН — филиал Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной физики Российской академии наук». Область научных интересов: ультразвуковой эхо-импульсный метод, неразрушающий контроль, усталость, пластическое деформирование, анизотропия упругих свойств, микроструктура.
e-mail: avg-ndt@mail.ru

Change in the acoustic anisotropy parameter of structural steel during fatigue failure

© O.A. Sergeeva¹, A.V. Gonchar²

¹LLC Volga-Spetsgidroenergmontazh — Kampspeenergo,
Naberezhnye Chelny, 423800, Russia

²Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Science —
branch of the Federal Research Center Institute of Applied Physics
of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, 603024, Russia

Material damages affect its microstructure, physical and acoustic properties. The article considers microstructural and ultrasonic studies of the St3sp5 steel carried out under cyclic uniaxial tension-compression in the low-cycle fatigue area. The fatigue tests were performed in stages. At each stage of cyclic deforming, the structure of steel samples was studied by the ultrasonic method and the change in the acoustic anisotropy parameter was determined. The relationship between the acoustic characteristics of the material and the degree of its damage is found. Based on the relationship the residual life can be predicted. The advantage of this method for determining the residual resource using the acoustic anisotropy parameter is that it is not required to determine the length of the acoustic path, for example, the wall thickness of the object under study. The influence of the deformation range of the cycle on the rate of the acoustic anisotropy parameter change is investigated. A direct linear relationship was established between the relative number of cycles and acoustic anisotropy parameter. An algorithm for determining the residual life of a material based on studies of microstructural changes and ultrasonic data is proposed.

Keywords: *low-cycle fatigue, acoustic anisotropy parameter, non-destructive testing, residual life, structural steel*

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 20-38-70051.

REFERENCES

- [1] Wisner B., Mazur K., Kontsos A. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2020, vol. 43 (5), pp. 859–878. DOI: 10.1111/ffe.13208
- [2] Suh C.M., Yuuki R., Kitagawa H. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1985, vol. 8, pp. 193–203.
- [3] Chen E.Y., Sauer S., Meshii M., Tucker W.T. *International Journal of Fatigue*, 1997, vol. 19, pp. 75–82.
- [4] Lindstedt U., Karlsson B., Nystr M. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 1998, vol. 21, pp. 85–98.
- [5] Besel M., Brueckner-Foit A. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2008, vol. 31, pp. 885–891.
- [6] Kabatova M., Dudrova E., Wronski As. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 2009, vol. 32, pp. 214–222.
- [7] Pan S., Yu G., He X., Li S., Zhang Y., Li Q. *International Journal of Fatigue*, 2019, vol. 118, pp. 139–149.
- [8] Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Gonchar A.V., Kachanov M. On assessing damage in austenitic steel based on combination of the acoustic and eddy current monitoring. *Int. J. Eng. Sci.*, 2019, vol. 135, pp. 17–22.

- [9] Cantrell J.H., Yost W.T. *International Journal of Fatigue*, 2001, vol. 23, pp. 487–490.
- [10] Gupta S., Ray A., Keller E. *International Journal of Fatigue*, 2007, vol. 29, pp. 1100–1114.
- [11] Straka L., Yagodzinsky Y., Landa M., Hänninen H. *NDT and E International*, 2008, vol. 41, pp. 554–563.
- [12] Mishakin V.V., Mitenkov F.M., Klyushnikov V.A., Danilova N. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2010, vol. 25, pp. 279–288.
- [13] Mishakin V., Klyushnikov V., Gonchar A., Kachanov M. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2019, vol. 38, p. 4.
- [14] Mishakin V., Gonchar A., Kurashkin K., Kachanov M. *International Journal of Fatigue*, 2020, vol. 141, art. no. 105846.
- [15] Mishakin V.V., Naumov M.Y., Mishakin S.V., Kassina N.V. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2007, vol. 43, pp. 677–682.
- [16] Kowalewski Z.L., Mackiewicz S., Szelażek J., Pietrzak K., Augustyniak B. *International Journal of Modern Physics B*, 2008, vol. 22, pp. 5533–5538.
- [17] Szelażek J., Mackiewicz S., Kowalewski Z.L. *NDT and E International*, 2009, vol. 42, pp. 150–156.
- [18] Mishakin V.V., Klyushnikov V.A., Kassina N.V. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2009, vol. 38, pp.443–447.
- [19] Belyaev A.K., Lobachev A.M., Modestov V.S., Pivkov A.V. *Mechanics of Solids*, 2016, vol. 51, pp. 606–611.
- [20] Kurashkin K.V., Gonchar A.V. Variation of acoustic characteristics of an aluminum alloy during plastic deformation at room and subzero temperatures. Proceedings of the 12th International Conference on Mechanics, Resource and Diagnostics of Materials and Structures. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 2053 (1), art. ID 030030. DOI: 10.1063/1.5084391
- [21] Makowska K., Piotrowski L., Kowalewski Z.L. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2017, vol. 36, p. 43. DOI: 10.1007/S10921-017-0421-9
- [22] Krysztofik J., Kukla D., Manaj W., Socha G. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, pp. 299–307.
- [23] Tretyakov D., Belyaev A., Shaposhnikov N. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 30, pp. 413–416.
- [24] Mishakin V.V., Gonchar A.V., Kirikov S.V., Klyushnikov V.A. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 2021, vol. 36, pp. 225–235.
- [25] Kurashkin K.V. *Acoustical Physics*, 2019, vol. 65, pp. 316–321.
- [26] Hirao M., Pao Y.H. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1985, vol. 77, pp. 1659–1664.
- [27] Pao Y.H., Wu T.T., Gamer U. *Journal of Applied Mechanics*, 1991, vol. 58, pp. 11–17.
- [28] Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Semenov A.S., Tretyakov D.A., Yakovlev Y.A. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 6, pp. 201–207.

Sergeeva O.A., Senior Engineer, Technical and Economic Department, Applicant, LLC Volga-Spetsgidroenergmontazh—Kampetsenergo. Research interests: industrial equipment, fatigue, plastic deformation, anisotropy of elastic properties, microstructure. e-mail: sergeevaoa_kse@mail.ru

Gonchar A.V., Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Institute of Mechanical Engineering Problems of the Russian Academy of Science — branch of the Federal Research Center Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences. Research interests: ultrasonic pulse echo method, non-destructive testing, fatigue, plastic deformation, anisotropy of elastic properties, microstructure. e-mail: avg-ndt@mail.ru