Баранникова, С.А. Влияние электролитического наводороживания на механические и акустические свойства нержавеющей стали / С.А. Баранникова, А.М. Никонова. – DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.01 // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2024. – № 6. – С. 5–14.

Perm Polytech Style: Barannikova S.A., Nikonova A.M. Effect of electrolytic hydrogenation on mechanical and acoustic properties of stainless steel. *PNRPU Mechanics Bulletin,* 2024, no. 6, pp. 5-14. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.01

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2024
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2024.6.01
УДК 539.3;620.171.2

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО НАВОДОРОЖИВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ И АКУСТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

С.А. Баранникова, А.М. Никонова

Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 28 августа 2024 г.
Одобрена: 21 сентября 2024 г.
Принята к публикации:
16 декабря 2024 г.

Ключевые слова:

водородное охрупчивание, прочность, пластичность, механические свойства, разрушение, скорость звука, нержавеющая сталь, коэффициент деградации, деформация, AISI 420.

АННОТАЦИЯ

Целью настоящего исследования является изучение влияния водородного охрупчивания на мартенситную нержавеющую сталь марки AISI 420 с использованием акустического метода с целью разработки стандартизированных методов диагностики и унификации измеряемых параметров для различных типов материалов. Была проведена оценка изменения механических характеристик и информативных параметров акустического контроля в процессе нагружения образцов, предварительно насыщенных водородом электролитическим методом. Установлено, что параметры рэлеевских волн зависят от степени водородного охрупчивания как в ненагруженном, так и нагруженном состоянии, начиная с предела текучести и вплоть до разрушения. Исследования показали, что анализ зависимостей скорости распространения рэлеевских волн открывает новые перспективы в области разработки методов для раннего обнаружения и оценки водородного охрупчивания стали. Полученные результаты исследований влияния концентрации водорода на параметры рэлеевских волн служат основой для построения комплексного акустического метода определения физико-механических характеристик конструкционных материалов. Эти данные дают возможность оценить критическую концентрацию водорода, при котором сохраняется 80 % исходных механических свойств. Кроме того, они позволяют сформировать критерий предельного состояния стали при статическом нагружении при использовании параметров акустических волн. Были рассчитаны значения скоростей распространения рэлеевских волн для материалов, находящихся в предельном состоянии при водородном охрупчивании. Обнаружены взаимосвязи между коэффициентами деградации прочности и водородного охрупчивания, зависящие от коэффициента деградации акустических свойств. Эти взаимосвязи могут быть аппроксимированы сигмоидальной функцией Больцмана с высокими коэффициентами корреляции.

© **Баранникова Светлана Александровна** – д. ф.-м. н., в. н. с., e-mail: bsa@ispms.ru, iD: 0000-0001-5010-9969
Никонова Альбина Муратовна – инженер, e-mail: amn@ispms.ru, iD: 0000-0001-5555-114X

Svetlana A. Barannikova – Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
e-mail: bsa@ispms.ru, iD: 0000-0001-5010-9969
Albina M. Nikonova – engineer, e-mail: amn@ispms.ru, iD: 0000-0001-5555-114X

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

EFFECT OF ELECTROLYTIC HYDROGENATION ON MECHANICAL AND ACOUSTIC PROPERTIES OF STAINLESS STEEL

S.A. Barannikova, A.M. Nikonova

Institute of Strength Physics and Material Science SB RAS, Tomsk, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 28 August 2024
Approved: 21 September 2024
Accepted for publication:
16 December 2024

Keywords:

strength, plastic deformation, failure, ultrasound velocity, stainless steel, hydrogen embrittlement, mechanical properties, degradation coefficient, deformation, AISI 420.

ABSTRACT

The work studies the effect of hydrogen embrittlement on AISI 420 martensitic stainless steel using the acoustic method. We evaluate an estimate of changes in mechanical characteristics and informative parameters of acoustic testing by loading the samples pre-saturated with hydrogen using the electrolytic method. It was found that the parameters of Rayleigh waves depend on the degree of hydrogen embrittlement both in the unloaded and loaded states, starting from the yield point and up to the fracture. It was shown that the dependences of the propagation velocity of Rayleigh waves can be used in problems of an early assessment of hydrogen embrittlement in a material. The results of studying the influence of hydrogen concentration on the Rayleigh wave parameters serve as the basis for constructing a comprehensive acoustic method to determine the physical and mechanical characteristics of structural materials. These data make it possible to estimate the critical concentration of hydrogen, at which 80 % of the initial mechanical properties is preserved. In addition, they allow forming a criterion for the limit state of stainless steel under static loading using parameters of acoustic waves. The Rayleigh wave propagation velocities were calculated for materials in the limit state. Dependences of coefficients of the strength degradation and hydrogen embrittlement on the acoustic properties degradation coefficient were found. These relationships can be approximated by a sigmoid Boltzmann function with high correlation coefficients.

Введение

Проблема контроля механических напряжений в элементах конструкций является актуальной для многих отраслей промышленности, в частности, космической, авиационной, энергетической и др. Острота проблемы обусловила разработку многочисленных методов неразрушающего контроля – механических, акустических, магнитных и др. [1–5]. Во многих случаях одним из наиболее перспективных направлений решения проблемы контроля напряженно-деформированного состояния может считаться совокупность методов, основанных на измерении характеристик упругих волн, распространяющихся в среде [6–13].

В настоящее время достаточно полно изучены возможные методы физической акустики в исследовании материалов, акустической структуроскопии и дефектоскопии [14–18]. В литературе встречаются данные об измерении напряженного состояния с помощью ультразвукового контроля в железнодорожных колесах, трубопроводах, рельсах и других стальных изделиях [19–23]. К преимуществам акустических методов относятся: достаточно высокая точность контроля, относительная простота реализации, физическая наглядность, гибкость применения в лабораторных условиях и на различных стадиях производства, эксплуатации и ремонта изделий, возможность автоматизации процесса контроля [8; 10].

Однако ввиду разрозненности частных исследований в разных сферах промышленной деятельности актуальным остается вопрос получения обобщающих закономерностей изменения акустических параметров и их комплексного применения для широкого круга задач. Еще более острая и актуальная проблема настоящего проекта состоит в физическом обосновании наблюдаемых закономерностей, что также будет способствовать обобщению измеряемых величин для разных классов материалов и выработке единых критериев диагностики [10].

Известно, что элементы многих стальных конструкций в процессе эксплуатации контактируют с рабочими агрессивными средами и подвергаются коррозионной деструкции [24; 25]. Водородосодержащая среда, проникая в объем элементов конструкции, приводит к значительным ухудшениям механических характеристик материала, что вызывает изменение напряженно деформированного состояния и приводит к значительному уменьшению несущей способности и сокращению долговечности конструкций [25].

Незатухающий интерес к исследованиям роли водорода в металлах объясняется сложностью и разнообразием эффектов, характерных для этой области физики металлов [25–29]. Имеется много сведений о том, как растворенный в металле водород эффективно меняет механические и физико-химические свойства материала, благодаря взаимодействию с дефектами структуры и быстрой диффузии [26]. Экспериментальное и аналитическое системное исследование синергетических закономерностей развития повреждаемости и разрушения структуры стали в условиях активации металла диффузионным движением водорода выполнено в исследованиях [30]. В работе [31] рассмотрены модели для расчета прочности и долговечности элементов конструкций, наводороженных под воздействием агрессивной среды.

Особую роль в задачах оценки степени поврежденности структуры материалов играет диагностика, ключевым элементом которой являются методы неразрушающего контроля. Проблема прогнозирования поведения нагруженных металлических конструкций под влиянием водородного охрупчивания является весьма важной, но далекой до окончательного решения. Поэтому изучение влияния процессов водородного охрупчивания на акустические характеристики конструкционных сплавов представляет собой важную инженерную задачу [28]. Перспективность применения акустических методов для контроля физико-механических свойств металлов и сплавов при исследовании систем «металл – водород», была показана во многих работах [32–35]. Тем не менее, известные работы по разработке современных неразрушающих подходов к оценке наводороженного состояния конструкционных материалов носят несистемный характер и посвящены определенным сплавам [34–39]. В частности, для сплавов на основе Zr, Ti, и Fe, насыщенных водородом, установлены зависимости скорости звука и коэффициента затухания рэлеевской волны от концентрации водорода [32; 36–38]. Сделаны выводы о том, что корреляционные зависимости между скоростями продольных и поперечных волн, а также их соотношениями, и коэффициентом затухания позволяют использовать ультразвуковые методы контроля для оценки содержания водорода в сплавах.

Целью настоящего исследования является поиск фундаментальных закономерностей изменения скорости распространения ультразвука и оценке водородного охрупчивания в нагруженном состоянии.

Материалы и методы исследований

Материал исследований представляет собой мартенситную нержавеющую сталь марки AISI 420 состава 0,44C-0,4Si-0,5Mn-13,2Cr-0,5Ni. Влияние режимов отпуска после закалки от различных температур на механические свойства исследовано в [40], где указаны рекомендуемые режимы термической обработки для сталей типа AISI 420, обеспечивающие хорошую пластичность и удовлетворительную коррозионную стойкость.

В настоящей работе образцы в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 50×10×2 мм были вырезаны электроискровой резкой из горячекатаного листа в состоянии поставки. Закалка образцов проводилась после гомогенизации при T = 1050 °C в течение 3 ч путем быстрого охлаждения на воздухе. После высокого отпуска от температуры 600 °C с выдержкой в течение 3 ч и охлаждением с печью в материале формируется сорбитная структура с размером карбидов $Me_{23}C_6$ ~ 1 мкм [41, 42].

Наводороживание стальных образцов после термообработки осуществлялось электролитическим способом в термостатической трехэлектродной электрохимической ячейке при постоянном катодном потенциале U = -600 мВ в присутствии хлор-серебряного электрода сравнения [42]. Управление величиной потенциала в ходе электрохимической реакции выполнялось с помощью потенциостата-гальваностата IPC-Compact. Образец помещался в 1N раствор серной кислоты с добавлением тиомочевины 20 мг/л при T = 323 К продолжительностью до 24 ч. Плотность тока, проходящего через образец, составляла 10^{-25} А/м^2. Для каждого наводороженного состояния было получено по 5 образцов. Для анализа общей концентрации водорода в образцах (после механических испытаний до разрыва) использовали метод атомно-эмиссионной спектрометрии тлеющего разряда на спектрометре Profiler 2. Зависимость концентрации водорода от времени насыщения показана на рис. 1.

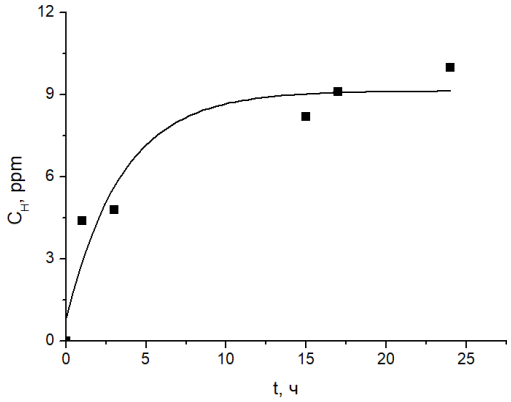


Рис. 1. Зависимость концентрации водорода от времени насыщения электролитическим способом

Fig. 1. Dependence of hydrogen concentration on saturation time by electrolytic method

Механические испытания плоских образцов проводились по схеме одноосного растяжения на испытательной машине Walter+Bai (Швейцария) при комнатной температуре со скоростью $6{,}67 \cdot 10^{-5}$ с$^{-1}$. Одновременно с регистрацией кривых нагружения производилась запись изменения скорости ультразвуковых волн в исследуемом сплаве [43; 44]. Автоциркуляционный метод измерения этой величины описан в [1; 8]. Скорость распространения рэлеевских волн определялась как отношение длины пути волны в образце ко времени задержки прихода сигнала на приемный преобразователь относительно излучающего. Время задержки измерялось по осциллограмме, записанной с помощью цифрового осциллографа Rigol DS-2072A-S с частотой дискретизации 2 ГГц. Высокая частота дискретизации цифрового осциллографа позволяет проводить измерения скорости с точностью ~ $2 \cdot 10^{-4}$. Детали и возможности такой методики описаны в [8; 43].

Результаты и обсуждение

Информативным признаком, характеризующим деформируемость металлов и сплавов, является скорость распространения ультразвуковых волн. Синхронная запись диаграмм растяжения σ(ε) и измерений скорости

рэлеевских акустических волн V_R позволяет получить зависимости скорости от величины общей деформации $V_R(\varepsilon)$ и действующего напряжения $V_R(\sigma)$ (рис. 2). Как показано в [43; 44], скорость распространения ультразвука существенно меняется при растяжении металлов и сплавов, а зависимости $V_R(\varepsilon)$ и $V_R(\sigma)$ достаточны сложны. Так, представленная на рис. 2, кривая $V_R(\varepsilon)$ стали AISI 420 в исходном состоянии после термообработки (закалка+отпуск) имеет S-образную форму (трехстадийный характер), которая указывает на различие природы связи скорости ультразвука и деформации в соответствующих интервалах пластической деформации.

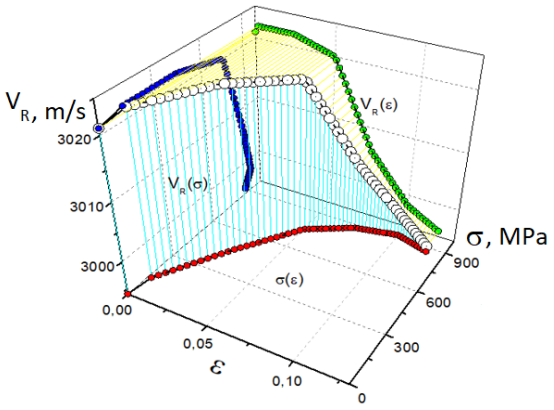


Рис. 2. Зависимость скорости распространения ультразвука от общей деформации $V_R(\varepsilon)$ и действующего напряжения $V_R(\sigma)$

Fig. 2. Dependences of the ultrasound propagation velocity on the total deformation $V_R(\varepsilon)$ and stress $V_R(\sigma)$

На рис. 3 показано влияние концентрации водорода на предел текучести $\sigma_{0,2}$, прочности σ_B и относительное удлинение до разрыва δ, свидетельствующее о сильной деградации механических свойств стали в сравнении с исходным состоянием без водорода. При более низком содержании водорода в материале сначала происходило снижение пластичности, сохраняя при этом показатели прочности. Когда содержание водорода превышало определенное значение, предел прочности также начинал снижаться в процессе водородного охрупчивания. Из зависимостей, представленных на рис. 3, оценивалось значение критической концентрации водорода, при котором сохраняется 80 % исходных механических свойств. Для зависимостей снижения характеристик прочности и пластичности можно получить два различных значения критической концентрации водорода, но при заданных в эксперименте плотности тока и катодного потенциала значения оказались приблизительно равны между собой $C_H^{cr} \approx 5$ ppm.

Анализ деформационных кривых $\sigma(\varepsilon)$ показал, что за пределом текучести стадия линейного деформационного упрочнения (II) зафиксирована как в исходном состоянии после термообработки, так и для всех образцов, предварительно насыщенных водородом. Далее следуют стадии параболического деформационного упрочнения (III) и стадия предразрушения (IV). Однако продолжительность стадий деформационного упрочнения уменьшается с увеличением времени наводороживания (рис. 4).

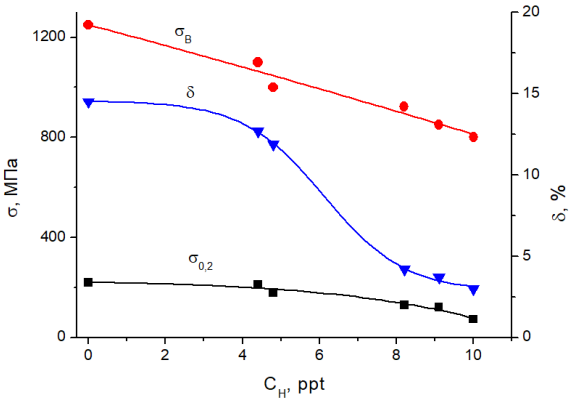


Рис. 3. Влияние водорода на механические характеристики

Fig. 3. The influence of hydrogen on mechanical properties

Для образцов, насыщенных водородом в течение 17 и 24 ч, стадии параболического деформационного упрочнения и предразрушения полностью отсутствовали. Присутствие водорода в мартенситных сталях препятствует поперечному скольжению дислокаций за счет увеличения расстояния между частичными дислокациями, что и способствует образованию локализованных полос сдвига [45]. С ростом концентрации водорода меняется вид разрушения от вязкого к хрупкому.

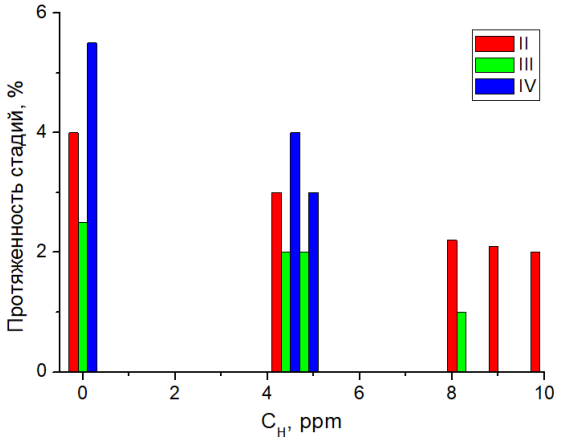


Рис. 4. Влияние водорода на протяженность стадий деформационного упрочнения: линейное упрочнение (II), параболическое упрочнение (III), стадия предразрушения (IV)

Fig.4. The influence of hydrogen on duration of the stages of strain hardening: linear hardening (II), parabolic hardening (III), pre-destruction stage (IV)

Характер изменения скорости релеевских волн с ростом общей деформации во всех исследуемых состояниях оказался качественно подобным. На стадиях линейного деформационного упрочнения отмечено постоянство скорости распространения ультразвука (рис. 2), что может быть эффективно использовано для контроля устойчивости этой стадии процесса деформирования.

Снижение скорости ультразвука в исследуемом материале наблюдается сразу после стадии линейного упрочнения и вплоть до разрушения.

По данным механических испытаний образцов оценивали коэффициент водородного охрупчивания (hydrogen embrittlement index, HEI) $K\varepsilon = (\delta_H - \delta_0) / \delta_0$, где δ_0 и δ_H – величины общего удлинения образцов без и с водородом, а также коэффициент деградации прочности $K\sigma = (\sigma_H - \sigma_0) / \sigma_0$, где σ_H и σ_0 – величины пределов прочности образцов без и с водородом, и коэффициент деградации акустических свойств $K_V = (V_H - V_0) / V_0$, где V_H и V_0 – значения скорости распространения рэлеевских волн образцов без и с водородом. На рис. 5 показана концентрационная зависимость коэффициента деградации акустических свойств $K_V(C_H)$, рассчитанная по значениям скорости распространения рэлеевских волн на пределе прочности материала. Резкое падение коэффициента K_V происходит при концентрации водорода, близкой к критическому значению $C_H^{cr} \approx 5$ ppm.

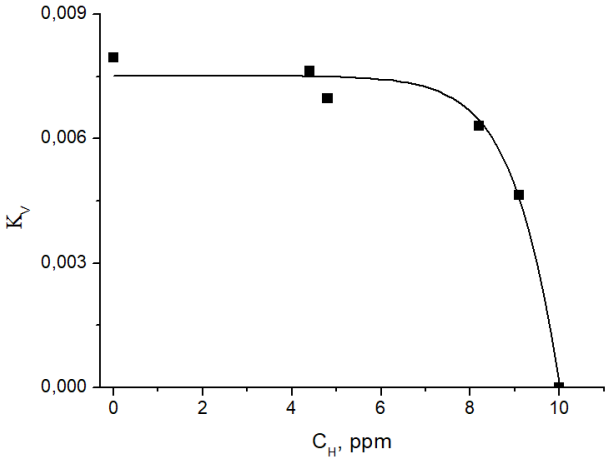


Рис. 5. Концентрационная зависимость коэффициента деградации акустических свойств

Fig. 5. Concentration dependence of the degradation coefficient of acoustic properties

Рисунок 6 демонстрирует связь коэффициентов изменения механических свойств и скорости распространения рэлеевских волн в условиях водородного охрупчивания. Зависимости коэффициентов деградации предела прочности (кривая *1*, рис. 6) и водородного охрупчивания (кривая *2*, рис. 6) от коэффициента деградации акустических свойств аппроксимируются сигмоидальной функцией Больцмана с коэффициентами корреляции 0,98. Следует отметить, что резкое снижение данных параметров также наблюдается при критическом значении концентрации водорода $C_H^{cr} \approx 5$ ppm.

Накопление водорода в металле приводит к росту скорости релеевских волн, что связано с увеличением напряжений первого рода за счет роста интерфазной поверхности раздела «карбид/матрица» и зарождения микротрещин в мартенситных сталях согласно [45]. Анализ изменения скорости распространения ультразвука в зависимости от концентрации водорода C_H показал (рис. 7), что в исследуемом диапазоне зависимости $V_R(C_H)$ имеют экспоненциальный характер как в недеформированном состоянии (кривая *1*), так и при деформациях, соответствующих: пределу текучести (кривая *2*), предельному состоянию (кривая *3*) и пределу прочности (кривая *4*)

$$V_R = V_R^0 + A \cdot \exp\left(\frac{C_H}{B}\right), \qquad (1)$$

где V_R^0, A и B – константы, значения которых приведены в таблице.

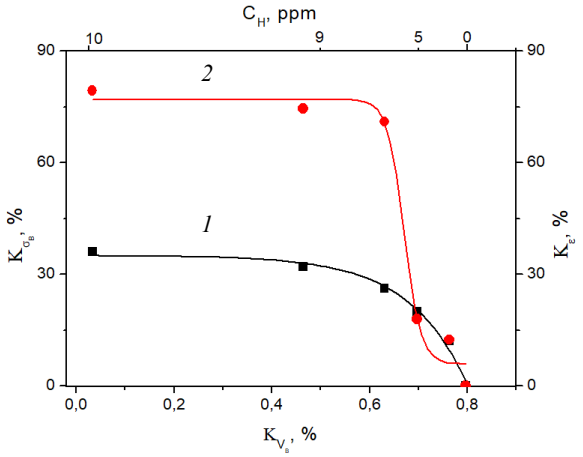


Рис. 6. Зависимости коэффициентов деградации прочности (*1*) и водородного охрупчивания (*2*) от коэффициента деградации акустических свойств

Fig. 6. Dependences of coefficients of the strength degradation (*1*) and hydrogen embrittlement (*2*) on the degradation coefficient of acoustic properties

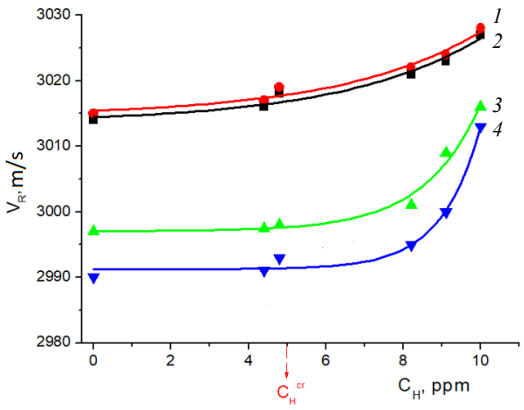


Рис. 7. Влияние водорода на скорость релеевских волн

Fig. 7. The influence of hydrogen on the velocity of Rayleigh waves

Как было отмечено выше (рис. 2), зависимость скорости распространения релеевских волн от величины общей деформации $V_R(\varepsilon)$ имеет сигмоидальную форму (кривая *1*, рис. 8). Значения скоростей релеевских волн для предельного состояния V_R^* всех образцов (кривая *3*,

рис. 7) определялись по величине деформации, соответствующей экстремуму производных $dV_R/d\varepsilon$ (кривая *2*, рис. 8), при которых происходит максимальный спад скорости распространения релеевских волн (кривая *1*, рис. 8).

Константы в уравнении (1)

Constants of equation (1)

Состояние образцов (рис. 7)	V_R^0	A	B	R^2, Коэффициент корреляции
Не деформированное (кривая *1*)	3013±3	0,81	3,6	0,97
Деформация, соответствующая пределу текучести (кривая *2*)	3014±3	0,81	3,6	0,97
Предельная деформация (кривая *3*)	2997±4	0,018	1,44	0,98
Деформация, соответствующая пределу прочности (кривая *4*)	2991±4	0,001	1,01	0,98

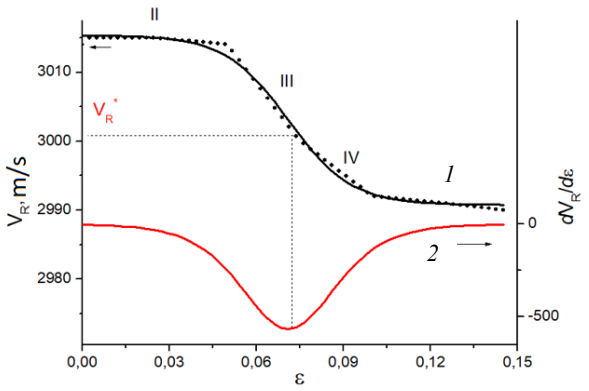


Рис. 8. Изменение скорости релеевских волн V_R (*1*) и производной $dV_R/d\varepsilon$ (*2*) с ростом общей деформации для стадий линейного упрочнения (II), параболического упрочнения (III) и предразрушения (IV)

Fig. 8. Changes in the velocity of Rayleigh waves V_R (*1*) and derivative $dV_R/d\varepsilon$ (*2*) with increasing total deformation for the stages of linear hardening (II), parabolic hardening (III) and pre-fracture (IV)

Данные на рис. 7 можно интерпретировать как карту механизмов деформации при растяжении стали AISI 420 в условиях водородного охрупчивания по данным измерений скорости распространения релеевских волн. Так, область, расположенная выше кривой *2* относится к упругой деформации; область, расположенная между кривой *2* и *4* соответствует области деформаций, выше предела текучести и меньше предела прочностии и относится к пластической деформации; область, расположенная ниже кривой *4* относится к разрушению. Кривая *3* разделяет область пластической деформации на *2* участка, в которых происходит максимальный спад скорости распространения релеевских волн, что соответствует стадии роста микроповреждений.

Как показано во многих работах [15; 22; 32], поврежденность, возникающая при силовом воздействии, интерпретируется как непрерывный процесс образования, роста и взаимодействия микродефектов различного уровня. Для описания поврежденности поликристаллических материалов разработаны различные модели [11; 12], в которых в качестве параметра поврежденности может быть использована критическая плотность дислокаций, концентрация микродефектов, уровень пластической деформации и др. В качестве поврежденности рассматриваются поры, микротрещины, которые приводят к изменению модулей упругости, появлению анизотропии физико-механических свойств первоначально изотропных материалов. Учитывая зависимость скорости упругих волн от модулей упругости и плотности материала, в работах [15; 32] было предложено описывать изменение скорости упругих волн с учетом поврежденности среды.

В настоящей работе на основании полученных данных, по аналогии с [32], был сформулирован акустический критерий предельного состояния деформируемого материала в условиях водородного охрупчивания R:

$$R = \frac{V_0 - V_i}{V_0 - V_p}, \qquad (2)$$

где V_i, V_0, V_p – значения скорости распространения релеевских волн в момент измерений (диагностики), в недеформированном состоянии без водорода и в момент разрушения, соответственно. При R>0,7 металл находится в состоянии, близком к разрушению и достигает предельного состояния. Подстановка в формулу (2) значений V_i, равных величине скоростей релеевских волн, изображенных на рис. 7 (кривая *3*) и соответствующих экстремуму производных $dV_R/d\varepsilon$ (рис. 8, кривая *2*), дает величину R = 0,65 ≈ 0,7, что близко к предельному состоянию.

Таким образом, экспериментально наблюдаемый характер изменения скорости распространения V_R с ростом деформации (или напряжений) указывает на изменение состояния напряженных областей в деформируемом образце в условиях водородного охрупчивания. Вероятно, что смена стадий зависимости $V_R(\varepsilon)$ связана с формированием структурных фрагментов с разным уровнем внутренних напряжений в объеме образца, обусловленных водородным охрупчиванием. Такие же изменения отражаются на характере кривой течения $\sigma(\varepsilon)$.

Как отмечено в работе [45], режим термической обработки – отпуск в интервале температур выделения избыточных фаз (карбидов), приводит к снижению сопротивления стали межкристаллитной коррозии. Это связано с возникновением вокруг карбидов зон, обедненных хромом, которые имеют пониженную коррозионную стойкость. Вызванное водородом разрушение в нагруженных мартенситных сталях может быть объяснено за счет одновременного действия механизма локализованной пластичности (HELP) и механизма декогезии (HEDE), описанных в литературе [28; 45]. Межзеренное разрушение происходит при столкновении дислокационных скоплений с исходными границами зерен аустенита, а квазирасщепле-

ние – при столкновении дислокационных скоплений с высокоугловыми границами блоков в мартенсите. Как показано в [45], водород увеличивает подвижность дислокаций, что приводит к интенсивной пластической деформации в зернах в форме полос скольжения и высокой плотности дислокаций. В свою очередь, рост плотности дислокаций увеличивает локальную концентрацию водорода на границах, что снижает энергию сцепления границ. К факторам, усиливающим процесс разрушения при водородном охрупчивании, можно отнести также и механические напряжения, которые локально усиливаются на высокоугловых границах [45].

Заключение

В статье рассмотрена проблема оценки степени водородного охрупчивания стали акустическим методом в условиях статического нагружения. Проведенные исследования термически обработанных образцов из мартенситной нержавеющей стали марки AISI 420 показали возможность определения вариаций скоростей распространения рэлеевских волн в зависимости от времени электролитического насыщения водородом в процессе механического растяжения.

В исходном состоянии в структуре сорбита, полученного закалкой с высоким отпуском, скорость распространения рэлеевских волн имеет минимальное значение. Последующее насыщение водородом до 24 ч в электролитической ячейке при постоянном катодном потенциале приводит к увеличению скорости ультразвуковых волн как в недеформированном, так и в деформированном состоянии. Найдены связи коэффициентов деградации прочности и водородного охрупчивания от коэффициента деградации акустических свойств, которые аппроксимируются сигмоидальной функцией Больцмана с высокими коэффициентами корреляции. Проведена оценка критической концентрации водорода, при которой сохраняется 80 % исходных механических свойств. Определены значения скоростей распространения рэлеевских волн, характерных для предельного состояния деформируемого материала в условиях водородного охрупчивания.

Библиографический список

1. Труэлл, Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик. – М.: Мир, 1972. – 307 с.
2. Механическая спектроскопия металлических материалов / М.С. Блантер [и др.]. – М.: МИА, 1994. – 254 с.
3. Исследование выявляемости поверхностных объемных дефектов при ультразвуковом контроле с применением волн Рэлея, генерируемых электромагнитно-акустическим преобразователем / Н.П. Алешин [и др.] // Дефектоскопия. – 2021. – № 5. – С. 22–30. DOI: 10.31857/S0130308221050031
4. Горкунов, Э.С. Использование метода электромагнитно-акустического преобразования для оценки микронапряжений в сталях / Э.С. Горкунов, С.М. Задворкин, М.Н. Соломеин // Дефектоскопия. – 2004. – № 7. – С. 26–33.
5. Wang, P. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostrictive EMAT characteristic parameters / P. Wang, Y. Zhang, E. Yao // Measurement. – 2021. – Vol. 168. – P. 108187. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108187
6. Guz, A.N. The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids / A.N. Guz, F.G. Makhort // International Applied Mechanics. – 2000. – Vol. 36, no. 9. – P. 1119–1149. DOI: 10.1023/A:1009442132064
7. Зуев, Л.Б. Малые изменения скорости ультразвука после отпуска закаленной стали / Л.Б. Зуев, В.В. Муравьев // Перспективные материалы. – 1996. – № 3. – С. 84–87.
8. Муравьев, В.В. Скорость звука и структура сталей и сплавов / В.В. Муравьев, Л.Б. Зуев, К.Л. Комаров. – Новосибирск: Наука, 1996. – 184 с.
9. Зуев, Л.Б. О возможности оценки прочности металлов и сплавов неразрушающим ультразвуковым методом / Л.Б. Зуев, Б.С. Семухин, А.Г. Лунев // Прикладная механика и техническая физика. – 2002. – Т. 43, № 1(251). – С. 202–204.
10. Муравьев, В.В. Структурно-чувствительные акустические параметры конструкционных сталей / В.В. Муравьев, О.В. Муравьева, А.В. Байтеряков. – Ижевск: Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, 2020. – 152 с.
11. Махутов, Н.А. Спектральный акусто-эмиссионный анализ процесса деформирования и повреждения / Н.А. Махутов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2018. – Т. 84, № 10. – С. 53–58. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58
12. Исследование кинетики разрушения сплава Д16ч методами акустической эмиссии, корреляции цифровых изображений и изучения реальной поврежденности / Л.Р. Ботвина [и др.] // Металлы. – 2022. – № 4. – С. 15–23.
13. Метод ультразвукового зондирования при оценке предельного состояния металлоконструкций, связанного с появлением пластических деформаций / В.И. Ерофеев [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 3. – С. 65–70. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-13007
14. Sheng, H. Evaluation of pipeline steel mechanical property distribution based on multi-micromagnetic NDT method / H. Sheng, P. Wang // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2023. – Vol. 72. – P. 6001715. DOI: 10.1109/TIM.2023.3241060
15. Хлыбов, А.А. Об использовании параметров структурного шума при контроле поверхностными акустическими волнами Рэлея стали 20ГЛ в процессе упругопластического деформирования / А.А. Хлыбов, А.Л. Углов // Дефектоскопия. – 2021. – № 7. – С. 3–10. DOI: 10.31857/S0130308221070010
16. The Influence of the Hardness of the Tested Material and the Surface Preparation Method on the Results of Ultrasonic Testing / J. Kowalczyk [et al.] // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, no. 17. – P. 9904. DOI: 10.3390/app13179904
17. Dixon S., Edwards C., Palmer S.B. Texture measurements of metal sheets using wideband Electromagnetic Acoustic Transducers // Journal of Physics D Applied Physics. – 2002. – Vol. 35, no. 8. – P. 816–824. DOI: 10.1088/0022-3727/35/8/314
18. Исследование влияния пластического деформирования на кристаллографическую текстуру и ультразвуковые характеристики низколегированной стали / В.В. Мишакин [и др.] // Проблемы прочности и пластичности. – 2021. – Т. 83, № 3. – С. 255–264. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264

19. Анализ сравнительной достоверности акустических методов контроля пруткового проката из рессорно-пружинных сталей / В.В. Муравьев [и др.] // Дефектоскопия. – 2014. – № 8. – С. 3–12.

20. Акустический волноводный контроль линейно-протяженных объектов / О.В. Муравьева [и др.]. – Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2017. – 234 с.

21. Смирнов, А.Н. Эволюция структурно-фазового состояния теплоустойчивых сталей и акустический критерий работоспособности металла / А.Н. Смирнов // Сварка и диагностика. – 2007. – № 6. – С. 13–17.

22. Березин, А.В. Акустическая эмиссия и деструкция пластически деформированного металла / А.В. Березин, А.И. Козинкина, Л.М. Рыбакова // Дефектоскопия. – 2004. – № 3. – С. 9–14.

23. О чувствительности вихретокового контроля деталей железнодорожного подвижного состава / Г. . Дымкин [и др.] // Дефектоскопия. – 2019. – № 8. – С. 47–53. DOI: 10.1134/S0130308219080062

24. Acoustic guided wave techniques for detecting corrosion damage of electrical grounding rods / J. Zhao [et al.] // Measurement. – 2019. – Vol. 147. – P. 106858. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106858

25. Нечаев, Ю.С. Актуальные проблемы старения, водородного охрупчивания и стресс-коррозионного поражения сталей и эффективные пути их решения / Ю.С. Нечаев // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2007. – № 11(55). – P. 108–117.

26. Колачев, Б.А. Водородная хрупкость металлов / Б.А. Колачев. – М.: Наука, 1985. – 216 с.

27. Ткачев, В.И. Проблемы водородной деградации металлов / В.И. Ткачев // Физико-химическая механика материалов. – 2000. – Т. 36, № 4. – С. 7–14.

28. Водородная хрупкость как результат поверхностных явлений при деформации металлов / В.А. Полянский [и др.] // Физическая мезомеханика. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 27-37. DOI: 10.55652/1683-805X_2022_25_3_27

29. Связь механических характеристик стали 35Г2 с содержанием водорода и параметрами акустической эмиссии / Д.Л. Мерсон [и др.]// Заводская Лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 2. – С. 57–60.

30. Шашкова, Л.В. О методическом подходе к изучению кинетики водородного охрупчивания сталей / Л.В. Шашкова // Международный научно-исследовательский журнал. – 2012. – № 5 (5). – С. 30–36.

31. Belyaev, A.K. Stresses in pipeline affected by hydrogen / A.K. Belyaev, V.A. Polyanskiy, Yu.A. Yakovlev // Acta Mechanica. – 2012. – Vol. 223, no. 3–4. – P. 1611–1619. DOI: 10.1007/s00707-012-0670-8

32. Применение методов физической акустики для оценки водородного охрупчивания титанового сплава ПТ-7М / А.А. Хлыбов [и др.] // Материаловедение. – 2022. – № 7. – С. 7–14. DOI: 10.31044/1684-579X-2022-0-7-7-14

33. Бурнышев, И.Н. Об акустической эмиссии при наводороживании малоуглеродистой стали / И.Н. Бурнышев, К.А. Абрамов // Письма в Журнал технической физики. – 2009. – Т. 35, № 2. – С. 90–94.

34. Скальский, В.Р. Водородная деградация стали 12Х1МФ и ее оценка методом акустической эмиссии / В.Р. Скальский, Д.В. Рудавский, Т.В. Селивончик // Дефектоскопия. – 2009. – № 9. – С. 56–69.

35. Исследование стадийности процесса разрушения высокоуглеродистой стали, охрупченной водородом, с применением метода акустической эмиссии / Е.Д. Мерсон [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2012. – № 9. – С. 41–48.

36. Characterization of hydrogen concentration in Zircaloy-4 using ultrasonic techniques / P.M. Gomes [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 2006. – Vol. 353. – P. 167–176. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.01.024

37. Experimental study of hydrogen embrittlement on AISI 304 stainless steels and Rayleigh wave characterization / Y. Chunjie [et al.] // Engineering Failure Analysis. – 2013. – Vol. 34. – P. 228–234. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.021

38. Assessment of hydrogen levels in Zircaloy-2 by non-destructive testing / P.K. Dea [et al.] // Journal of Nuclear Materials. – 1998. – Vol. 252. – P. 43–54. DOI: 10.1016/S0022-3115(97)00315-2

39. Водородное охрупчивание сталей. I. Анализ кинетики процесса по измерениям акустической эмиссии / В.Г. Ханжин [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2011. – № 8. – С. 44–48.

40. Обзор исследований коррозионностойких сталей на основе Fe – ~13 % Cr: термическая обработка, коррозионная- и износостойкость / М.В. Костина [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная Металлургия. – 2023. – Т. 66, № 1. – С. 8–26. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-1-8-26

41. Изменение скорости ультразвука при пластической деформации высокохромистой стали / С.А. Баранникова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2016. – Т. 59, № 8. – С. 558–564. DOI: 10.17073/0368-0797-2016-8-558-564

42. О возможности оценки водородного охрупчивания высокохромистой стали ультразвуковым методом / С.А. Баранникова [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 1. – С. 41–45.

43. Зуев, Л.Б. От макро к микро. Масштабы пластической деформации / Л.Б. Зуев, С.А. Баранникова, А.Г. Лунев. – Новосибирск: Наука, 2018. – 132 с.

44. Баранникова, С.А. Исследование механических и акустических свойств деформируемых сплавов / С.А. Баранникова, М.В. Надежкин, П.В. Исхакова // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2023. – Т. 66, № 2. – С. 162–167. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-2-162-167

45. Петров, А.И. Анализ влияния предела текучести на коррозионное растрескивание под напряжением мартенситных и ферритных сталей в кислых средах / А.И. Петров, М.В. Разуваева // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92, № 10. – С. 1588–1594. DOI: 10.21883/JTF.2022.10.53251.154-22

References

1. Truell R., Elbaum C., Chick B.B. Ultrasonic Methods in Solid State Physics. Academic Press, 1969, 464 p.

2. Blanter M.S., et al. Mekhanicheskaia spektroskopiia metallicheskikh materialov [Mechanical spectroscopy of metallic materials]. Moscow, MIA, 1994, 254 p.

3. Aleshin N.P., et al. Investigating the Detectability of Surface Volumetric Defects in Ultrasonic Testing with the Use of Rayleigh Waves Generated by an Electromagnetic-Acoustic Transducer. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2021, vol. 57, pp. 361-368. DOI: 10.1134/S1061830921050028

4. Gorkunov E.S., Zadvorkin S.M., Solomein M.N. Utilization of electromagnetic acoustic conversion to estimate microstress in steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2004, vol. 40, pp. 449-454. DOI: 10.1007/s11181-005-0003-2

5. Wang P., Zhang Y., Yao E. Method of measuring the mechanical properties of ferromagnetic materials based on magnetostrictive EMAT characteristic parameters. *Measurement,* 2021, vol. 168, p. 108187. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108187

6. Guz A.N., Makhort F.G. The physical fundamentals of the ultrasonic nondestructive stress analysis of solids. *International Applied Mechanics,* 2000, vol. 36, no. 9, pp. 1119-1149. DOI: 10.1023/A:1009442132064

7. Zuev L.B., Murav'ev V.V. Malye izmeneniia skorosti ul'trazvuka posle otpuska zakalennoi stali [Small changes in ultrasonic velocity after tempering of hardened steel]. *Perspektivnye materialy – Promising materials*, 1996, no. 3, pp. 84-87.

8. Murav'ev V.V., et al. Skorost' zvuka i struktura stalei i splavov [Speed of sound and structure of steels and alloys]. Novosibirsk, Nauka, 1996, 184 p.

9. Zuev L.B., Semukhin B.S., Lunev A.G. O vozmozhnosti otsenki prochnosti metallov i splavov nerazrushaiushchim ul'trazvukovym metodom [On the possibility of assessing the strength of metals and alloys using non-destructive ultrasonic methods]. Prikladnaia mekhanika i tekhnicheskaia fizika. *Applied mechanics and technical physics,* 2002, vol. 43, no. 1(251), pp. 202-204.

10. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Baiteriakov A.V. Strukturno-chuvstvitel'nye akusticheskie parametry konstruktsionnykh stalei [Structural-sensitive acoustic parameters of structural steels]. Izhevsk: Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 2020, 152 c.

11. Makhutov N.A. Acoustic-emission analysis of the processes of deformation and damage. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials,* 2018, vol. 84, no. 10, pp. 53-58. DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-10-53-58

12. Botvina L.R., et al. Investigation of D16ch alloy fracture kinetics by acoustic emission, digital image correlation, and real damage analysis. *Russian metallurgy (Metally),* 2022, no. 7, pp. 719-726. DOI: 10.1134/s0036029522070023

13. Erofeev V.I., Iliakhinskii A.V., Nikitina E.A. et al. Metod ul'trazvukovogo zondirovaniia pri otsenke predel'nogo sostoianiia metallokonstruktsii, sviazannogo s poiavleniem plasticheskikh deformatsii [Ultrasonic probing method for assessing the ultimate state of metal structures associated with the occurrence of plastic deformations]. Fizicheskaia mezomekhanika. *Physical mesomechanics,* 2019, vol. 22, no. 3, pp. 65-70. DOI: 10.24411/1683-805X-2019-13007

14. Sheng H., Wang P. Evaluation of pipeline steel mechanical property distribution based on multi-micromagnetic NDT method. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,* 2023, vol. 72, p. 6001715. DOI: 10.1109/TIM.2023.3241060

15. Khlybov A.A., Uglov A.L. On the use of structural noise parameters in testing 20GL steel with Rayleigh surface waves under elastoplastic deformation. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2021, no. 7, pp. 517-524. DOI: 10.1134/S1061830921070081

16. Kowalczyk J., et al. The Influence of the Hardness of the Tested Material and the Surface Preparation Method on the Results of Ultrasonic Testing. *Applied Sciences,* 2023, vol. 13, no. 17, p. 9904. DOI: 10.3390/app13179904

17. Dixon S., Edwards C., Palmer S.B. Texture measurements of metal sheets using wideband Electromagnetic Acoustic Transducers. *Journal of Physics D Applied Physics,* 2002, vol. 35, no. 8, pp. 816-824. DOI: 10.1088/0022-3727/35/8/314

18. Mishakin V.V., et al. Study of the effect of plastic deformation on the crystallographic texture and acoustic characteristics of low-alloy steel. Problemy prochnosti i plastichnosti. *Problems of Strength and Plasticity,* 2021, vol. 83, no. 3, pp. 255-264. DOI: 10.32326/1814-9146-2021-83-3-255-264

19. Murav'ev V.V., et al. An analysis of the comparative reliability of acoustic testing methods of bar stock from spring steels. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2014, vol. 50, no. 8, pp. 435-442. DOI: 10.1134/S1061830914080063

20. Murav'eva O.V., et al. Akusticheskii volnovodnyi kontrol' lineino-protiazhennykh ob"ektov [Acoustic waveguide control of linearly extended objects]. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the RAS, 2017, 234 p.

21. Smirnov A.N. Evoliutsiia strukturno-fazovogo sostoianiia teploustoichivykh stalei i akusticheskii kriterii rabotosposobnosti metalla [Evolution of the structural-phase state of heat-resistant steels and the acoustic criterion of metal performance*]. Svarka i diagnostika – Welding and diagnostics*, 2007, no. 6, pp. 13-17.

22. Berezin A.V., Kozinkina A.I., Rybakova L.M. Acoustic emission and destruction of inelastically strained metal. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2004, vol. 40, no. 3, pp. 152-156. DOI: 10.1023/B:RUNT.0000040172.94110.64

23. Dymkin G.Y., et al. On the sensitivity of eddy current testing of parts of railway rolling stock. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2019, vol. 55, no. 8, pp. 610-616. DOI: 10.1134/S1061830919080059

24. Zhao J., et al. Acoustic guided wave techniques for detecting corrosion damage of electrical grounding rods. *Measurement*, 2019, vol. 147. p. 106858. DOI: 10.1016/j.measurement.2019.106858

25. Nechaev Yu.S. Vital problems of aging, embrittlement and stress-corrosion damage of steels vs their effective solutions. *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology*, 2007, no. 11, pp. 108-117.

26. Kolachev B.A. Vodorodnaia khrupkost' metallov [Hydrogen embrittlement of metals]. Moscow, Nauka, 1985, 216 p.

27. Tkachov V.I. Problems of Hydrogen Degradation of Metals. *Materials Science,* 2000, vol. 36, pp. 481-488. DOI: 10.1023/A:1011385317508

28. Polyanskiy V.A., et al. Hydrogen Embrittlement as a Surface Phenomenon in Deformed Metals. *Physical Mesomechanics,* 2022, vol. 25, pp. 404-412. DOI: 10.1134/S1029959922050034

29. Merson D.L., et al. Correlation of the mechanic parameters of steel 35G2 with hydrogen content and parameters of acoustic emission. *Industrial Laboratory. Materials Diagnostics,* 2008, vol. 74, no. 2, pp. 57-60.

30. Shashkova, L.V. O metodicheskom podkhode k izucheniiu kinetiki vodorodnogo okhrupchivaniia stalei [On a methodical approach to studying the kinetics of hydrogen embrittlement of steels]. Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal. *International Research Journal,* 2012, no. 5 (5), pp. 30-36.

31. Belyaev A.K., Polyanskiy V.A., Yakovlev Yu.A. Stresses in pipeline affected by hydrogen. *Acta Mechanica,* 2012, vol. 223, no. 3-4, pp. 1611-1619. DOI: 10.1007/s00707-012-0670-8

32. Khlybov A.A., et al. Physical acoustics methods for assessing hydrogen embrittlement in PT-7M grade titanium alloy. *Inorganic materials: applied research,* 2023, vol. 14, pp. 164-171. DOI: 10.1134/S2075113323010173

33. Burnyshev I.N., Abramov K.A. Acoustic emission during hydrogenation of VST3SP steel. *Technical physics letters,* 2009, vol. 35, no. 1, pp. 96-98. DOI: 10.1134/S1063785009010295

34. Skal'skii V.R., Rudavslii D.V., Selivonchik T.V. Hydrogen degradation of steel 12X1MΦ and its estimation by the acoustic emission method. *Russian Journal of Nondestructive Testing,* 2009, vol. 45, no. 9, pp. 636-645. DOI: 10.1134/S1061830909090071

35. Merson E.D., et al. Issledovanie stadiinosti protsessa razrusheniia vysokouglerodistoi stali, okhrupchennoi vodorodom, s primeneniem metoda akusticheskoi emissii. Deformatsiia i razrushenie materialov. *Deformation and destruction of materials,* 2012, no. 9, pp. 41-48.

36. Gomes P.M., et al. Characterization of hydrogen concentration in Zircaloy-4 using ultrasonic techniques. *Journal of Nuclear Materials,* 2006, vol. 353, pp. 167-176. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.01.024

37. Chunjie Y., et al. Experimental study of hydrogen embrittlement on AISI 304 stainless steels and Rayleigh wave characterization. *Engineering Failure Analysis,* 2013, vol. 34, pp. 228-234. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2013.07.021

38. Dea P.K., et al. Assessment of hydrogen levels in Zircaloy-2 by non-destructive testing. *Journal of Nuclear Materials,* 1998, vol. 252, pp. 43-54. DOI: 10.1016/S0022-3115(97)00315-2

39. Khanzhin V.G., et al. Vodorodnoe okhrupchivanie stalei. I. Analiz kinetiki protsessa po izmereniiam akusticheskoi emissii [Hydrogen embrittlement of steels. I. Analysis of the process kinetics by acoustic emission measurements]. Deformatsiia i razrushenie materialov. *Deformation and destruction of materials,* 2011, no. 8, pp. 44-48.

40. Kostina M.V., et al. Corrosion-resistant steels based on Fe – ~13 % Cr: Heat treatment, corrosion- and wear resistance. Review. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy,* 2023, vol. 66, no. 1. pp. 8-26. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-1-8-26

41. Barannikova S.A., et al. Changes in ultrasound velocity in the plastic deformation of high-chromium steel. *Steel in translation,* 2016, vol. 46, no. 8, pp. 552-557. DOI: 10.3103/S0967091216080039

42. Barannikova S.A., et al. On assessment possibility of hydrogen embrittlement of high-chromium steel by ultrasound method. Deformatsiia i razrushenie materialov. *Deformation and destruction of materials,* 2016, no. 1, pp. 41-45.

43. Zuev L.B., Barannikova S.A., Lunev A.G. Ot makro k mikro. Masshtaby plasticheskoi deformatsii [From Macro to Micro. Scales of Plastic Deformation]. Novosibirsk, Nauka, 2018, 132 p.

44. Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Iskhakova P.V. Mechanical and acoustic properties of deformable alloys. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy,* 2023, vol. 66, no. 2. pp. 162-167. DOI: 10.17073/0368-0797-2023-2-162-167

45. Petrov A.I., Razuvaeva M.V. Analysis of the effect of yield stress on stress corrosion cracking of martensitic and ferritic steels in acidic environments. *Technical Physics,* 2022, no. 10, pp. 1588-1594. DOI: 10.21883/TP.2022.10.54364.154-22

Финансирование. Исследование выполнено в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема № FWRW-2021-0011.
Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
Вклад авторов равноценен.

Funding. The study was carried out within the frames of the Governmental Assignment for ISPMS SB RAS, project No. FWRW-2021-0011.
Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.
The contribution of the authors is equivalent.