

УДК 669.1; 539.37

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-1-187-196

С.А. БАРАННИКОВА<sup>1,2</sup>, А.Г. ЛУНЁВ<sup>1</sup>, А.П. МАЛИНОВСКИЙ<sup>2</sup>, Л.Б. ЗУЕВ<sup>1</sup>,<sup>1</sup>Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,<sup>2</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет

## ИЗМЕНЕНИЕ СКОРОСТИ УЛЬТРАЗВУКА ПРИ ВОДОРОДНОМ ОХРУПЧИВАНИИ ВЫСОКОХРОМИСТОЙ СТАЛИ\*

Приведены результаты исследования изменения скорости распространения ультразвука (волн Рэлея) при пластической деформации коррозионно-стойкой высокохромистой стали 40Х13 с сорбитной структурой после высокого отпуска (исходное состояние) и после электролитического насыщения водородом в течение 12 и 24 ч. Реализация метода измерения скорости волн Рэлея заключалась в периодической генерации прямоугольных импульсов длительностью 100 нс на входе излучающего пьезопреобразователя и регистрации прошедшей по образцу волны посредством приемного пьезопреобразователя, подключенного к цифровому осциллографу. Обнаружено, что структурное состояние исследуемой стали изменяет не только тип деформационной кривой при одноосном растяжении, но и меняет характер зависимости скорости ультразвука от деформации.

**Ключевые слова:** нержавеющая сталь; водородное охрупчивание; пластическая деформация; скорость ультразвука.

**Для цитирования:** Баранникова С.А., Лунёв А.Г., Малиновский А.П., Зуев Л.Б. Изменение скорости ультразвука при водородном охрупчивании высокохромистой стали // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 187–196.

S.A. BARANNIKOVA<sup>1,2</sup>, A.G. LUNEV<sup>1</sup>, A.P. MALINOVSKIY<sup>2</sup>, L.B. ZUEV<sup>1</sup>,<sup>1</sup>Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS,<sup>2</sup>Tomsk State University of Architecture and Building

## CHANGES IN ULTRASONIC VELOCITY AT HYDROGEN EMBRITTLMENT OF HIGH-CHROMIUM STEEL

The paper presents research into changes in the ultrasonic velocity (Rayleigh wave propagation) at plastic deformation of the type 40Kh13 corrosion-resistant high-chromium steel with a sorbitol structure after high-temperature tempering (original state) and after electrolytic hydrogenation saturation for 12 and 24 h. The method implementation for measuring Rayleigh wave propagation includes a periodic generation of square-waves 100 nm long. Measurements are performed at the input of a radiating piezoelectric transducer including the wave propagation over the specimen using a receiving piezoelectric transducer connected to a digital oscilloscope. Measurements show changes not only in the deformation curve at uniaxial tension but also in the dependence between the ultrasonic velocity and deformation.

**Keywords:** corrosion-resistant steel; hydrogen embrittlement; plastic deformation; ultrasonic velocity.

\* Работа выполнена в рамках Программы фундаментальных исследований Государственной академии наук в 2013–2020 гг., а также при частичной поддержке РФФИ №16-08-00385-а.

**For citation:** Barannikova S.A., Lunev A.G., Malinovskii A.P., Zuev L.B. Izmenenie skorosti ul'trazvuka pri vodorodnom okhrupchivanii vyso-kokhromistoi stali [Changes in ultrasonic velocity at hydrogen embrittlement of high-chromium steel]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 1. Pp. 187–196. (rus)

Поиск новых закономерностей в изменении механических свойств металлов и сплавов после различных внешних энергетических воздействий является одной из важнейших проблем механики деформируемого твердого тела. Изменение свойств необходимо для получения сбалансированного комплекса характеристик конструктивной прочности сплавов с использованием энергосиловых воздействий, таких как обработка давлением и термическая обработка сплавов. Проблема сопротивления материалов большим пластическим деформациям связана с их использованием в технологических процессах, применяющих прокатку, ковку, штамповку и волочение, и особенно обостряется в условиях холодной деформации, характерных для заключительных стадий процессов изготовления ответственных изделий. В таких ситуациях разрушение заготовки резко ухудшает экономические показатели и исключает возможность планомерной работы. Это относится, в частности, к сталям, работающим в агрессивных средах. Интенсивное развитие исследований в области изучения взаимодействия металлов с водородом в первую очередь связано с решением важных практических задач в области использования различных металлов и сплавов для нужд ядерной и водородной энергетики. В присутствии водорода изменяются интенсивность и скорость накопления дефектов на стадиях однородного и локализованного повреждения материала [1–13], что ведет к снижению его пластичности (охрупчиванию). В то же время изменение структуры и химического состава металлов и сплавов приводит к изменению их основных акустических свойств [14–22]. К таким акустическим свойствам относятся скорость распространения ультразвуковых волн и их затухание. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния времени электролитического насыщения водородом на механические свойства и акустические характеристики нержавеющей стали 40X13. Коррозионно-стойкие высокохромистые стали мартенситного класса обладают благоприятным соотношением прочностных и пластических характеристик, а также повышенной стойкостью в различных коррозионных средах. Для аттестации материалов такого назначения важным представляется определение запаса пластичности и перехода к стадии разрушения до появления его видимых признаков.

Для проведения исследований выбрана высокохромистая нержавеющая сталь марки 40X13 (0,4 % C, 0,6 % Si, 0,55 % Mn, 12,5 % Cr). Данная сталь после закалки имеет хорошую коррозионную стойкость с температуры, которая способна обеспечить полное растворение карбидов. Сталь 40X13 целесообразно использовать после температурного отпуска в 200–400 °C в целях получения высоких коррозионной стойкости и твердости или после высокого отпуска при температуре 600–650 °C для получения конструкционного материала. Образцы в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 50×10×2 мм были вырезаны электроискровой резкой из горячекатаного листа в состоянии

поставки (ГОСТ 5582–75). Закалка образцов проводилась после гомогенизации при  $T = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 3 ч путем быстрого охлаждения на воздухе. Высокий отпуск проводили от температуры  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  с выдержкой в течение 3 ч и охлаждением с печью. Механические испытания плоских образцов в форме двойной лопатки (размеры рабочей части  $10 \times 2 \times 50\text{ мм}$ ) проводились по схеме одноосного растяжения на испытательной машине Walter+Bai (Швейцария) при комнатной температуре со скоростью  $6,67 \cdot 10^{-5}\text{ с}^{-1}$ . Анализ стадийности деформационных кривых проводился на основе характера изменения показателя деформационного упрочнения  $n$  в уравнении Людвига – Холомона [23]

$$s = s_0 + \theta e^n,$$

где  $s$  и  $e$  – истинные напряжение и деформация;  $s_0$  – критическое напряжение сдвига;  $\theta$  и  $n$  – соответственно коэффициент и показатель деформационного упрочнения.

Кривую нагружения представляют в системе функциональных координат  $\ln(s - s_0) = \ln \theta + n \ln e$ , и поскольку все величины кроме деформации и напряжения в таком случае остаются неизменными, то участок, в пределах которого показатель  $n$ , определяющий закон пластического течения, будет прямолинейным.

Присутствие стадии линейного упрочнения дополнительно подтверждалось анализом  $\theta(s)$  и  $\theta(e)$ . Обработку полученных данных проводили с использованием стандартных методов статистического анализа.

Наводороживание образцов осуществляли в трехэлектродной электрохимической ячейке при постоянном катодном потенциале  $U = -600\text{ мВ}$ , задаваемом относительно хлор-серебряного электрода сравнения, в 1N растворе серной кислоты с добавлением тиомочевины  $20\text{ мг/л}$  при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 12 и 24 ч [24–26]. Плотность тока, протекающего через образец, оставалась в пределах  $10\text{--}25\text{ А/м}^2$ . Для каждого состояния было получено по 5 образцов.

Для измерения скорости распространения рэлеевских волн использовался раздельно-совмещенный датчик, состоящий из установленных в одном корпусе излучающего и приемного пьезопреобразователей, выполненных на основе пьезокерамики ЦТС-19 с резонансной частотой  $5\text{ МГц}$ . Пьезопреобразователи установлены под углом  $56^{\circ}$  к нормали плоскости падения акустической волны, что обеспечивает формирование поверхностной акустической волны (волны Рэлея) в сплавах на основе железа и алюминия. Расстояние между преобразователями (длина акустического пути в объекте контроля) без учета длины волновода датчика составляло  $32\text{ мм}$ . Излучающий преобразователь возбуждался полуволновым импульсом длительностью  $100\text{ нс}$  от генератора прямоугольных импульсов. 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 с частотой дискретизации  $2\text{ ГГц}$ . Соответственно, точность измерения задержки распространения акустической волны в образце ( $10\text{--}11\text{ мкс}$ ) составляет  $10^4\text{--}10^5$  при постоянном контакте образца с датчиком

(погрешность). Суть измерения времени задержки заключается в следующем. Осциллограмма, записываемая осциллографом, представляет собой развертку колебания приемного преобразователя во времени. Начало отсчета времени – время запуска импульса на излучающем преобразователе. Время прихода сигнала определяется моментом пересечения нулевого уровня полуволны максимальной амплитуды, сформированной приемным пьезопреобразователем. При этом используется аппроксимация сигнала прямой линией вблизи нулевого уровня, что позволяет достичь требуемой точности. Поскольку сигнал на выходе приемного преобразователя представляет собой затухающую синусоиду, то неизбежно неоднократное пересечение сигналом нулевого уровня, в предлагаемом методе используется ближайшее пересечение нулевого уровня после появления полуволны максимальной амплитуды. Аппроксимация необходима для определения момента времени пересечения, если этот момент не совпадает с очередной выборкой осциллографа. Аппроксимация прямой линией обеспечивает достаточную точность в связи с тем, что синус вблизи нуля раскладывается в ряд Тейлора как прямая линия, погрешность, вносимая членами ряда более высокого порядка, не превышает  $2,5 \cdot 10^{-5}$ . Полученное в результате время задержки уменьшается на время распространения волны в волноводе датчика. Волноводом датчика является область датчика, выполненная из полиметилметакрилата, обеспечивающая прохождение акустической волны от поверхности образца к пьезопреобразователю или обратно. Экспериментальная оценка погрешности, вносимой нестабильностью акустического контакта датчика с объектом контроля, показала, что ошибка определения скорости не превышает  $\pm 3$  м/с. Погрешность определялась следующим образом: на контактные области датчика наносился тонкий слой трансформаторного масла (контактная жидкость), датчик устанавливался на образец, регистрировалась скорость рэлеевской волны, затем датчик снимался с образца, протирались датчик и образец от остатка масла, вновь наносился слой масла на датчик, и датчик устанавливался на образец. Данная операция была повторена 50 раз. После чего были вычислены среднее значение, дисперсия и среднеквадратичное отклонение. Среднее квадратичное отклонение составило 2,37 м/с.

Одновременно со скоростью звука измерялось затухание. Ввиду сложности учета потерь, связанных с пьезопреобразованием и акустическим контактом датчика с исследуемой средой, в экспериментах регистрировалось изменение затухания в процессе нагружения относительно ненагруженного состояния. В этом случае изменение затухания записывается как

$$\Delta\alpha = \ln\left(\frac{E_0}{E_t}\right) / 2d,$$

где  $d$  – длина пути рэлеевской волны в образце;  $E_0$  – энергия сигнала в нена-

груженном образце;  $E = \int_0^{\tau} u^2(t) dt \approx \tau \sum_{i=0}^N u_i^2$  – энергия сигнала в нагруженном

образце;  $\tau$  – длительность развертки сигнала на осциллографе (1 мкс), мгновенное значение напряжения на электродах приемного пьезопреобразователя;  $t$  – время, отсчитываемое от начала прихода акустического импульса на при-

емный пьезопреобразователь;  $N$  – количество выборок осциллографа за время развертки (2000 выборок).

Анализ кривых нагружения наводороженных в течение 12 и 24 ч образцов показал значительное изменение деформационного поведения материала по сравнению с образцами после высокого отпуска (рис. 1, *a*). В результате предварительного насыщения водородом стальных образцов произошло резкое снижение предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , предела прочности  $\sigma_B$  и пластичности  $\delta$  на 70, 40 и 60 % соответственно. При этом изменился характер разрушения от вязкого к хрупкому, и на диаграммах наводороженных образцов отсутствует участок, соответствующий стадии формирования макроскопической шейки разрушения. Снижение пластичности, очевидно, является результатом водородного охрупчивания сталей мартенситного класса.

Анализ деформационных кривых показал, что стадия линейного деформационного упрочнения с показателем деформационного упрочнения  $n \approx 1$  в уравнении Людвига – Холломоуна зафиксирована как в исходном состоянии после термообработки, так и на диаграммах нагружения образцов после насыщения водородом в течение 12 и 24 ч. Однако продолжительность стадии линейного деформационного упрочнения уменьшилась с увеличением времени наводороживания. Характерной особенностью всех диаграмм нагружения явилось отсутствие параболической стадии деформационного упрочнения (по Тейлору) с показателем деформационного упрочнения  $n \approx 0,5$ . Для образцов, насыщенных водородом в течение 24 ч, стадия предразрушения с показателем деформационного упрочнения  $n \approx 0,3$  полностью отсутствует в результате водородного охрупчивания.

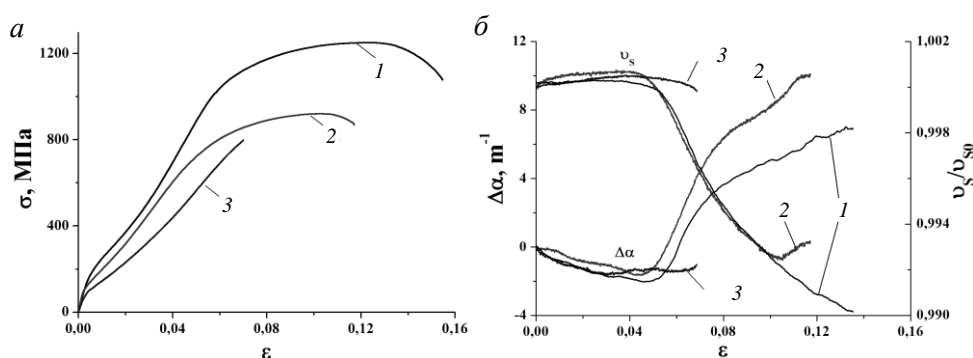


Рис. 1. Зависимости напряжений (*a*) и акустических свойств (*б*) от общей деформации стали 40X13 в трех состояниях:

1 – в исходном состоянии; 2 – после электролитического наводороживания 12 ч; 3 – после электролитического наводороживания 24 ч

Анализ кривых изменения скорости звука от общей деформации растяжения для трех разных состояний показал, что в целом отличие наблюдается в исходном значении скорости ультразвука лишь в ненагруженных образцах  $V_{s0}$ . Фактические значения скорости ультразвуковых волн  $V_{s0}$  и механические характеристики образцов представлены в таблице, при этом сопоставление характера изменения нормированных значений скорости рэлеевских волн во

всех трех типах исследуемых состояний осуществляется однотипно. Снижение скорости ультразвука в исследуемом материале наблюдается сразу после стадии линейного упрочнения (рис. 1, б).

При электролитическом наводороживании скорость звука изменяется неоднозначно, по-видимому, существует экстремум на зависимости скорости звука от концентрации водорода в образце. Снижение скорости рэлеевских волн при времени наводороживания до 12 ч, вероятно, связано с сорбцией атомов водорода вблизи дислокаций [3].

#### Акустические и механические свойства образцов стали 40Х13

№ п/п	Состояние образцов	$V_{s0}$ , м/с	$\sigma_T$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta$ , %
1	Закалка + отпуск	$3021 \pm 3$	218	1251	12,9
2	Закалка + отпуск + наводороживание 12 ч	$3013 \pm 3$	132	922	9,8
3	Закалка + отпуск + наводороживание 24 ч	$3027 \pm 3$	73	798	4,7

Атомы водорода, являясь атомами внедрения, скапливаются вблизи дислокаций и создают дополнительные барьеры их движению (механизм Коттрелла) [27]. Как следствие, уменьшается эффективная длина дислокационных сегментов и, согласно теории дислокационного внутреннего трения Гранато – Люкке [28], снижается скорость ультразвука. Применимость данной теории в экспериментальных методиках измерения скорости и затухания акустических волн на частотах возбуждения от 1 до 10 МГц подтверждается авторами работы [29]. Дальнейшее наводороживание до 24 ч может приводить к формированию областей скопления молекулярного водорода и, как следствие, росту сжимающих напряжений первого рода, обуславливая увеличение скорости звука, согласно теоретическим и экспериментальным работам А.Н. Гузя [30]. Однако при больших концентрациях водорода в легированных сталях возможно сложное физико-химическое взаимодействие водорода с компонентами сплава [1–3], вследствие чего выделить факторы, влияющие на скорость звука, не представляется возможным.

На фоне значительного снижения пластичности и прочности в результате водородного охрупчивания с увеличением концентрации водорода в образце относительное изменение скорости распространения волн Рэлея в целом происходит однотипно для всех состояний. При этом, по-видимому, наибольшее влияние водород оказывает на изменение дислокационного внутреннего трения в процессе пластического течения образца, что проявляется в изменении затухания акустических волн.

Таким образом, в результате исследований была выявлена быстрая деградация основных механических свойств сталей мартенситного класса в результате водородного охрупчивания. В ходе проведенных испытаний удалось подтвердить однозначное соответствие между действующим законом деформационного упрочнения и характером зависимости скорости распространения

рэлеевских волн от деформации. При этом наблюдается изменение скорости распространения ультразвуковых волн Рэлея от времени наводороживания. Выяснение конкретных механизмов, влияющих на скорость звука в наводороженных образцах, требует дополнительных исследований. В процессе деформирования наводороженных образцов основным информативным параметром исследования становится затухание акустических волн.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Song, J.* A nanoscale mechanism of hydrogen embrittlement in metals / J. Song, W.A. Curtin // *Acta Materialia*. – 2011. – V. 59. – P. 1557–1569.
2. *Fuchigami, H.* Effect of grain size on the susceptibility of martensitic steel to hydrogen related failure / H. Fuchigami, H. Minami, M. Nagumo // *Phil. Mag. Lett.* – 2006. – V. 86. – P. 21–29.
3. *Robertson, I.M.* The effect of hydrogen on dislocation dynamics / I.M. Robertson // *Eng. Frac. Mech.* – 2001. – V. 68. – P. 671–692.
4. *Matsuo, T.* Effects of hydrogen on tensile properties and fracture surface morphologies of Type 316L stainless steel / T. Matsuo, J. Yamabe, S. Matsuoka // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39. – P. 3542–3551.
5. *Hydrogen embrittlement associated with strain localization in a precipitation-hardened Fe–Mn–Al–C light weight austenitic steel* / M. Koyama, H. Springer, S. V. Merzlikin, K. Tsuzaki, E. Akiyama, D. Raabe // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39. – P. 4634–4646.
6. *Effect of hydrogen charging on the mechanical properties of advanced high strength steels* / T. Depover, D. Pérez Escobar, E. Wallaert, Z. Zermout, K. Verbeken // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2014. – V. 39. – P. 4647–4656.
7. *Mechanical characterisation of microstructural evolution in 304 stainless steel subjected to high-pressure torsion with and without hydrogen pre-charging* / Y. Mine, K. Koga, K. Takashima, Z. Horita // *Materials Science and Engineering: A*. – 2016. – V. 661. – P. 87–95.
8. *Hydrogen migration and hydrogen-dislocation interaction in austenitic steels and titanium alloy in relation to hydrogen embrittlement* / S.M. Teus, D.G. Savvakis, O.M. Ivasishin, V.G. Gavriljuk // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42. – P. 2424–2433.
9. *The role of hydrogen in hardening/softening steel: Influence of the charging process* / Y. Zhao, M. Seok, I. Choi, Y. Lee, S. Park, U. Ramamurty, J. Suh, J. Jang // *Scripta Materialia*. – 2015. – V. 107. – P. 46–49.
10. *A microstructure-based mechanism of cracking in high temperature hydrogen attack* / M.L. Martin, M. Dadfarnia, S. Orwig, D. Moore, P. Sofronis // *Acta Materialia*. – 2017. – V. 140. P. 300–304.
11. *Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels* / M. Koyama, E. Akiyama, Y. Lee, D. Raabe, K. Tsuzaki // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2017. – V. 42. – P. 12706–12723.
12. *Doshida, T.* Dependence of hydrogen-induced lattice defects and hydrogen embrittlement of cold-drawn pearlitic steels on hydrogen trap state, temperature, strain rate and hydrogen content / T. Doshida, K. Takai // *Acta Materialia*. – 2014. – V. 79. – P. 93–107.
13. *Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model* / M.B. Djukic, V. Sijacki Zeravcic, G.M. Bakic, A. Sedmak, B. Rajicic // *Engineering Failure Analysis*. – 2015. – V. 58. – P. 485–498.
14. *Ding, X.* Bolt axial stress measurement based on a mode-converted ultrasound method using an electromagnetic acoustic transducer / X. Ding, X. Wu, Y. Wang // *Ultrasonics*. – 2014. – V. 54. – P. 914–920.
15. *Zuev, L.B.* On the interrelation between plastic-deformation localization and the acoustic properties of aluminum and D16 alloy / L.B. Zuev, B.S. Semukhin, A.G. Lunev // *Russ. Metall.* – 2004. – V. 3. – P. 286–292.

16. *Investigations of acoustoelastic characteristics of rod waves in heat-treated steel wires using the electromagnetic-acoustic method* / V.V. Murav'ev, O.V. Murav'eva, A.V. Platonov, D.V. Zlobin // Russ. J. Nondestruct. Test. – 2012. – V. 48. – P. 447–456.
17. *Concrete cover characterisation using dynamic acousto-elastic testing and Rayleigh waves* / Q. Vu, V. Garnier, J. Chaix, C. Payan, M. Lott, J. Eiras // Construction and Building Materials. – 2016. – V. 114. – P. 87–97.
18. *Anomalous ultrasonic attenuation in ferritic steels at elevated temperatures* / B. Hutchinson, P. Lundin, E. Lindh-Ulmgren, D. Lévesque // Ultrasonics. – 2016. – V. 69. – P. 268–272.
19. *Mean grain size detection of DP590 steel plate using a corrected method with electromagnetic acoustic resonance* / B. Wang, X. Wang, L. Hua, J. Li, Q. Xiang // Ultrasonics. – 2017. – V. 76. – P. 208–216.
20. *Hu, F. Constitutive model for full-range elasto-plastic behavior of structural steels with yield plateau: Calibration and validation* / F. Hu, G. Shi, Y. Shi // Engineering Structures. – 2016. – V. 118. – P. 210–227.
21. *Pelleg, J. Mechanical Properties of Metals* / J. Pelleg. – Springer : Dordrecht, 2013. – 634 p.
22. *Ultrasound Velocity Measurements in High-Chromium Steel Under Plastic Deformation* / A. Lunev, A. Bochkareva, S. Barannikova, L. Zuev // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V. 125. – P. 012007.
23. *Acoustic parameters as the material formability criteria* / A. Lunev, S. Barannikova, M. Nadezhkin, L. Zuev // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1783. – P. 020139.
24. *Tensile plastic strain localization in single crystals of austenite steel electrolytically saturated with hydrogen* / L.B. Zuev, S.A. Barannikova, M.V. Nadezhkin, V.A. Mel'nichuk // Techn. Phys. Lett. – 2011. – V. 37. – P. 793–796.
25. *Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels* / S.A. Barannikova, A.G. Lunev, M.V. Nadezhkin, L.B. Zuev // Adv. Mater. Res. – 2014. – V. 880. – P. 42–47.
26. *On the plastic flow localization of martensitic stainless steel saturated with hydrogen* / S. Barannikova, A. Bochkareva, A. Lunev, G. Shlyakhova, Y. Li, L. Zuev // AIP Conference Proceedings. – 2016. – V. 1783. – P. 020011.
27. *Котрелл, А.Х. Дислокации и пластическое течение в металлах* / А.Х. Котрелл. – М. : Металлургиздат, 1958. – 268 с.
28. *Granato, A. Theory of Mechanical Damping Due to Dislocations* / A. Granato, K. Lücke // J. Appl. Phys. – 1956. – V. 27. – P. 583–593.
29. *Труэлл, Р. Ультразвуковые методы в физике твердого тела : пер. с англ.* / Р. Труэлл, Ч. Эльбаум, Б. Чик ; под ред. И.Г. Михайлова, В.В. Леманова. – М. : Мир, 1972. – 307 с.
30. *Гузь, А.Н. Упругие волны в телах с начальными напряжениями: в 2 т.* / А.Н. Гузь. – Киев : Наук. думка, 1986. – Т. 2. – 536 с.

## REFERENCES

1. *Song J., Curtin W.A. A nanoscale mechanism of hydrogen embrittlement in metals. Acta Materialia.* 2011. V. 59. Pp. 1557–1569.
2. *Fuchigami H., Minami H., Nagumo M. Effect of grain size on the susceptibility of martensitic steel to hydrogen related failure. Phil. Mag. Lett.* 2006. V. 86. Pp. 21–29.
3. *Robertson I.M. The effect of hydrogen on dislocation dynamics. Eng. Frac. Mech.* 2001. V. 68. Pp. 671–692.
4. *Matsuo T., Yamabe J., Matsuoka S. Effects of hydrogen on tensile properties and fracture surface morphologies of Type 316L stainless steel. International Journal of Hydrogen Energy.* 2014. V. 39. Pp. 3542–3551.
5. *Koyama M., Springer H., Merzlikin S.V., Tsuzaki K., Akiyama E., Raabe D. Hydrogen embrittlement associated with strain localization in a precipitation-hardened Fe–Mn–Al–C light weight austenitic steel. International Journal of Hydrogen Energy.* 2014. V. 39. Pp. 4634–4646.
6. *Depover T., Pérez Escobar D., Wallaert E., Zermout Z., Verbeken K. Effect of hydrogen charging on the mechanical properties of advanced high strength steels. International Journal of Hydrogen Energy.* 2014. V. 39. Pp. 4647–4656.



7. Mine Y., Koga K., Takashima K., Horita Z. Mechanical characterisation of microstructural evolution in 304 stainless steel subjected to high-pressure torsion with and without hydrogen pre-charging. *Materials Science and Engineering: A*. 2016. V. 661. Pp. 87–95.
8. Teus S.M., Savvakini D.G., Ivasishin O.M., Gavriljuk V.G. Hydrogen migration and hydrogen-dislocation interaction in austenitic steels and titanium alloy in relation to hydrogen embrittlement. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42. Pp. 2424–2433.
9. Zhao Y., Seok M., Choi I., Lee Y., Park S., Ramamurthy U., Suh J., Jang J. The role of hydrogen in hardening/softening steel: Influence of the charging process. *Scripta Materialia*. 2015. V. 107. Pp. 46–49.
10. Martin M.L., Dadfarnia M., Orwig S., Moore D., Sofronis P. A microstructure-based mechanism of cracking in high temperature hydrogen attack. *Acta Materialia*. 2017. V. 140. Pp. 300–304.
11. Koyama M., Akiyama E., Lee Y., Dierck Raabe D., Tsuzaki K. Overview of hydrogen embrittlement in high-Mn steels. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. V. 42. Pp. 12706–12723.
12. Doshida T., Takai K. Dependence of hydrogen-induced lattice defects and hydrogen embrittlement of cold-drawn pearlitic steels on hydrogen trap state, temperature, strain rate and hydrogen content. *Acta Materialia*. 2014. V. 79. Pp. 93–107.
13. Djukic M.B., Sijacki Zeravcic V., Bakic G.M., Sedmak A., Rajicic B. Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model. *Engineering Failure Analysis*. 2015. V. 58. Pp. 485–498.
14. Ding X., Wu X., Wang Y. Bolt axial stress measurement based on a mode-converted ultrasound method using an electromagnetic acoustic transducer. *Ultrasonics*. 2014. V. 54. Pp. 914–920.
15. Zuev L.B., Semukhin B.S., Lunev A.G. On the interrelation between plastic-deformation localization and the acoustic properties of aluminum and D16 alloy. *Russ. Metall.* 2004. V. 3. Pp. 286–292.
16. Murav'ev V.V., Murav'eva O.V., Platunov A.V., Zlobin D.V. Investigations of acoustoelastic characteristics of rod waves in heat-treated steel wires using the electromagnetic-acoustic method. *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2012. V. 48. Pp. 447–456.
17. Vu Q., Garnier V., Chaix J., Payan C., Lott M., Eiras J. Concrete cover characterisation using dynamic acousto-elastic testing and Rayleigh waves. *Construction and Building Materials*. 2016. V. 114. Pp. 87–97.
18. Hutchinson B., Lundin P., Lindh-Ulmgren E., Lévesque D. Anomalous ultrasonic attenuation in ferritic steels at elevated temperatures. *Ultrasonics*. 2016. V. 69. Pp. 268–272.
19. Wang B., Wang X., Hua L., Li J., Xiang Q. Mean grain size detection of DP590 steel plate using a corrected method with electromagnetic acoustic resonance. *Ultrasonics*. 2017. V. 76. Pp. 208–216.
20. Hu F., Shi G., Shi Y. Constitutive model for full-range elasto-plastic behavior of structural steels with yield plateau: Calibration and validation. *Engineering Structures*. 2016. V. 118. Pp. 210–227.
21. Pelleg J. *Mechanical Properties of Metals*. Springer: Dordrecht, 2013. 634 p.
22. Lunev A., Bochkareva A., Barannikova S., Zuev L. Ultrasound Velocity Measurements in High-Chromium Steel Under Plastic Deformation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. V. 125. P. 012007.
23. Lunev A., Barannikova S., Nadezhkin M., Zuev L. Acoustic parameters as the material formability criteria. *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1783. P. 020139.
24. Zuev L.B., Barannikova S.A., Nadezhkin M.V., Mel'nichuk V.A. Tensile plastic strain localization in single crystals of austenite steel electrolytically saturated with hydrogen. *Techn. Phys. Lett.* 2011. V. 37. Pp. 793–796.
25. Barannikova S.A., Lunev A.G., Nadezhkin M.V., Zuev L.B. Effect of hydrogen on plastic strain localization of construction steels. *Adv. Mater. Res.* 2014. V. 880 Pp. 42–47.
26. Barannikova S., Bochkareva A., Lunev A., Shlyakhova G., Li Y., Zuev L. On the plastic flow localization of martensitic stainless steel saturated with hydrogen. *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1783. P. 020011.
27. Cottrell A.H. *Dislocations and plastic flow in crystals*. Oxford University Press, 1953. 223 p.
28. Granato A., Lüke K. Theory of mechanical damping due to dislocations. *J. Appl. Phys.* 1956. V. 27. Pp. 583–593.

29. Truell R., Elbaum C., Chick B. Ultrasonic methods in solid state physics. New York: Academic Press, 1969. 478 p.
30. Guz' A.N. Uprugie volny v telakh s nachal'nymi napryazheniyami [Elastic waves in solids with initial stresses], in 2 vol. Kiev: Naukova Dumka, 1986. V. 2. 536 p. (rus)

#### Сведения об авторах

*Баранникова Светлана Александровна*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, bsa@ispms.tsc.ru

*Лунёв Алексей Геннадьевич*, канд. техн. наук, ст. научный сотрудник, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4, agl@ispms.tsc.ru

*Малиновский Анатолий Павлович*, канд. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, maptgasu@yandex.ru

*Зувев Лев Борисович*, докт. физ.-мат. наук, профессор, Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/4, lbz@ispms.tsc.ru

#### Authors Details

*Svetlana A. Barannikova*, DSc, Professor, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, bsa@ispms.tsc.ru

*Aleksei G. Lunev*, PhD, Senior Scientist, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia, agl@ispms.tsc.ru

*Anatolii P. Malinovskii*, PhD, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, maptgasu@yandex.ru

*Lev B. Zuev*, DSc, Professor, Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, 8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia, lbz@ispms.tsc.ru