Динамика, прочность приборов и аппаратуры

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-4>
УДК 539.4:620:17

В.В. Лепов, Е.А. Архангельская, В.С. Ачикасова

ЛЕПОВ ВАЛЕРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ – д.т.н., главный научный сотрудник отдела моделирования процессов разрушения, AuthorID: 17472, SPIN-код: 1397-6725; ORCID 0000-0003-2360-7983, e-mail: lepov@iptpn.ysn.ru

АЧИКАСОВА ВАЛЕНТИНА СЕМЕНОВНА – ведущий инженер отдела моделирования процессов разрушения, e-mail: achikasova@iptpn.ysn.ru

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН

Октябрьская ул., 1, Якутск, Россия, 677890

АРХАНГЕЛЬСКАЯ ЕКАТЕРИНА АФАНАСЬЕВНА – к.т.н., доцент кафедры экспертизы, управления и кадастра недвижимости Инженерно-технического института, AuthorID: 110671, SPIN-код: 8882-4811, ORCID 0000-0002-6130-0539, e-mail: ea.arkhangelskaia@s-vfu.ru

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова

Белинского ул., 58, Якутск, Россия, 677029

Влияние водорода на кинетику хрупкого разрушения в металлах

Аннотация: Приводится обзор исследований накопления повреждений и механизмов разрушения при совместном действии механического нагружения и водорода. Обосновывается механизм хрупкого разрушения металлов, обусловленный как особенностями дислокационной структуры, так и содержанием растворённого в кристаллической решётке водорода при статическом и динамическом нагружении в условиях низких климатических температур. Механизм подтвержден результатами наших экспериментальных и расчётных исследований, в частности, по выявлению энергетического спектра внутреннего трения при низкотемпературном вязко-хрупком переходе, численным моделированием процесса накопления повреждений в связанной задаче диффузии-упругопластичности и динамическими испытаниями на ударную вязкость. Предложена модель оценки влияния низких температур и водорода на процесс накопления повреждений, учитывающая активационный характер хрупкого разрушения. Расчет показал сильную зависимость темпа накопления повреждений от уровня напряжений, содержания водорода и температуры. Особенно опасным представляется сочетание низких температур и высокого содержания водорода в металле, что характерно для сварных соединений конструкций, эксплуатируемых в условиях Арктики и Субарктики. Даны рекомендации по использованию полученных соотношений в численных моделях, а также предложены пути повышения хладостойкости сталей и сплавов путём управления характеристиками дислокационной структуры.

Ключевые слова: накопление повреждений, моделирование, хладостойкость, вязко-хрупкий переход, решеточный водород, барьер Пайерлса–Набарро, дислокации, хладноломкость.

Введение

Понятие накопления повреждений в механике разрушения позволяет объяснить как масштабный эффект, так и постепенную деградацию механических свойств материала,

© Лепов В.В., Архангельская Е.А., Ачикасова В.С., 2019

О статье: поступила: 28.05.2019; бюджет: работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-48-140015) и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект III.28.1.1.) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Станция натурных испытаний» ИФТПС СО РАН.

а также выработку конструкцией своего расчетного ресурса [6, 10]. Физическая природа таких повреждений допускает вероятностную интерпретацию [11], однако при этом следует учитывать множество действующих факторов, поэтому статистические характеристики распределений не всегда могут быть очевидны. Так, кроме точечных дефектов кристаллической решётки, имеющих флуктуационную природу [4], и дислокаций, образующихся на границах раздела под действием внешних и внутренних напряжений, в металле присутствуют обусловленные технологией изготовления поры и включения, а также поверхностные несовершенства, которые развиваются под действием коррозионных процессов и старения [5]. Основная роль в процессах коррозионного растрескивания и питтинга конструкционных сталей принадлежит замедленному разрушению под действием водорода, или водородному охрупчиванию (ВО). Интерес к явлению ВО усилился в связи с расширением сферы использования и температурных диапазонов применения высокопрочных сталей и сплавов [15, 16, 18].

В данной работе представлен анализ механизма накопления повреждений в элементах конструкций, подверженных совместному воздействию водорода и упругопластической деформации. Важность рассмотрения такой задачи обуславливается сложностью протекающих процессов, прямой численный расчет которых пока существенно затруднен.

Механизмы хрупкого разрушения металлов под влиянием водорода при низких температурах

В последние годы наблюдается значительный прогресс в понимании механизма низкотемпературного вязкохрупкого перехода, транспорта водорода и кинетики разрушения металлов, в частности сталей и сплавов с ОЦК-структурой кристаллической решётки [2, 8, 14].

В частности, авторами подтвержден фононно-дислокационный механизм низкотемпературного вязкохрупкого перехода, обусловленный величиной энергии активации внутреннего трения для высокопрочных ОЦК-сталей [2]. К схожим выводам привели исследования механизма разрушения, а также внутреннего трения металлов с кристаллической решеткой различных типов [14], причем одним из методов увеличения подвижности дислокаций с целью повышения хладостойкости сталей оказалось воздействие на структуру дефектов, возникающих под действием нейтронного облучения.

В области воздействия низких климатических температур на хрупкую прочность актуальным остаётся направление исследований, связанное с действием растворенного в металле водорода на прочность статически и динамически нагруженных образцов, при этом наблюдается значительное снижение порога хладноломкости даже для сталей с высокой ударной вязкостью при низких температурах [7, 17]. Оказалось, что повышающая твердость термообработка стали железнодорожного колеса приводит к значительному снижению ударной вязкости уже при температуре $-30-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, что резко снижает ресурс колёсных пар локомотивов в условиях Севера и Арктики [7]. Повышение предела прочности сталей приводит к более резкому падению ударной вязкости при низкой температуре, причем для сварных соединений проблема усугубляется – в металле сварного шва ударная вязкость оказывается ниже, чем в основном металле, а в зоне термического влияния – выше, что приводит к раннему образованию трещин и коррозионному растрескиванию под действием водорода [17].

В то же время хладноломкость выявляется при испытаниях на динамический изгиб, в условиях объёмного напряженного состояния, когда дислокационное скольжение затруднено. Поэтому для анализа воздействия низких температур и водорода на процесс распространения трещин необходимо рассмотреть случай динамического разрушения. В работах Иоффе, Нильсона и Броберга дана оценка предельной скорости трещины, или скорости поверхностных волн Релея в материале, не превышающей 90% от скорости волн сдвига $c = \sqrt{\mu/\rho}$, где μ – модуль упругости второго рода, ρ – удельная плотность [13]. При приближении к этой скорости существенно изменяется интенсивность распределения напряжений в вершине растущей трещины, тогда как при скоростях, не превышающих $0,05 \cdot c$ (как в случае испытаний на ударный изгиб), можно считать её соответствующей условиям статического нагружения.

Это позволяет рассмотреть только воздействие растворенного водорода на процесс хрупкого разрушения, поскольку водород, содержащийся в ловушках, не успевает оказать существенного воздействия на процесс деформации в ходе разрушения образца.

На рисунках 1 и 2 показаны зависимости от температуры энергии разрушения и доли хрупкой составляющей в изломе высокопрочной стали в отожжённом состоянии и с повышенным содержанием водорода [12]. Очевидно, что находящийся в металле водород снижает уровень энергии, требуемый для разрушения образца, и изменяет характер разрушения на хрупкий, сдвигая тем самым диапазон вязкохрупкого перехода в область более высоких температур. Этим объясняется и падение ударной вязкости в образцах, выполненных из материала сварного шва [17]. В последнем случае водород попадает в металл непосредственно из сварочной ванны, тогда как в зоне термического влияния термический цикл сварки уменьшает содержание водорода, которое становится ниже, чем в основном металле.

Рис. 1. Зависимость энергии разрушения при ударном изгибе для высокопрочной стали F22 (ASME) от температуры [12]. Здесь и далее: по шкале абсцисс – энергия, по шкале ординат – температура.

Рис. 2. Зависимость доли хрупкого излома при ударном изгибе для стали F22 (ASME) от температуры [12].

Модель воздействия водорода и низких температур на поврежденность

Воздействие водорода на процесс разрушения современных конструкционных сталей оказывается весьма сходным с охрупчиванием, характерным для низких климатических температур. На рис. 3 представлена зависимость от температуры ударной вязкости углеродистой высокопрочной стали бандажа локомотивного колеса после эксплуатации [7]. Значение

ударной вязкости в этом случае падает почти в три раза уже при температуре окружающей среды $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Ранее авторами для учета охрупчивающего влияния водорода на материал предлагалось использовать скалярный параметр поврежденности Ψ со следующим кинетическим уравнением [1]:

$$d\Psi/dt = f(C, T, \sigma)\psi(1 - \psi), \quad (1)$$

где $f(C, T, \sigma)$ – функция, учитывающая влияние определяющих параметров (в данном случае концентрации водорода, температуры и гидростатического напряжения) на процесс накопления повреждений. При определенном уровне повреждений характер разрушения сменяется с вязкого на хрупкий. Известно, что зависимость вида $\psi(1 - \psi)$ в (1) называется логистической кривой, или уравнением Ферхюльста, что в данном случае выражает динамику дефектов дислокационного и недислокационного происхождения на различных масштабных уровнях.

Рис. 3. Зависимость ударной вязкости стали локомотивного колеса от температуры испытаний [7].

Известно точное решение этого уравнения (1) при постоянной величине $f(C, T, \sigma)$ (например, при стандартном испытании образца на ударную вязкость):

$$\Psi = \frac{1}{1 + \Psi_0 (e^{f(T, C, \sigma) \cdot t} - 1)}. \quad (2)$$

Форма функции $f(C, T, \sigma)$ может быть установлена на основе активационной зависимости (закона долговечности) [13]:

$$\tau = \tau_0 \exp(U_0 - \gamma\sigma/kT). \quad (3)$$

где τ – долговечность при заданном напряжении растяжения σ ; τ_0 – период тепловых колебаний, примерно равный 10^{-13} – 10^{-14} с для классических твердых тел и 10^{-13} с – для твердых полимеров; U_0 – энергия активации самопроизвольного разрыва молекулярных связей или полимерных цепей при $\sigma = 0$; γ – структурно-чувствительный коэффициент Журкова; k – постоянная Больцмана; T – температура. Энергия активации U_0 в (3) будет зависеть от содержания растворенного в решетке водорода. В этом случае предпочтительнее численное решение уравнения (1), поскольку аналитическая форма точного решения приобретает достаточно сложный вид.

Обсуждение результатов

Предполагая, что растворенный в решетке водород в виде ионов способен снижать барьер Пайерлса–Набарро, а остающийся в ловушках (коллекторах) молекулярный не участвует в пластификации материала, модифицированная модель транспорта водорода [1], дополненная соотношениями (1) или (2), позволит глубже понять зависимость характера разрушения от содержания водорода и температуры при испытаниях на ударный изгиб и статическое растяжение.

Однако до сих пор остаётся открытым вопрос о влиянии водорода на генерацию дислокаций. Если снижение температуры однозначно оказывает влияние на этот процесс, то данные о влиянии водорода достаточно противоречивы [8]. Тем не менее очевидно, что водород формирует собственную подсистему в решетке металла с собственными частотами колебаний вне фононного спектра кристалла. Тогда фононно-дислокационная теория вязкохрупкого перехода в ОЦК-металлах [2] может быть расширена и на явление водородного охрупчивания. Энергия активации микропластического сдвига будет снижаться за счет взаимодействия с решеточным водородом, тогда с учетом (3) получим:

$$f(C, T, \sigma) = \exp(<U_0(C, T)> - \gamma\sigma/kT), \quad (4)$$

где $<U_0(C, T)>$ – усредненная энергия активации пластического сдвига, которая, вообще говоря, должна учитывать, с одной стороны, вклад ионизированного водорода, растворенного в кристаллической решетке, с другой – падение сопротивления сдвига дислокационно-фононного механизма вязкохрупкого перехода (согласно рис. 3).

Численный анализ модели (1)–(4) для стали локомотивного колеса с пределом прочности $\sigma_b = 1050$ МПа [7] и энергией активации при комнатной температуре в отсутствие растворенного водорода $U_0 = 4.2$ эВ [9] приводит к следующим результатам (см. рисунки 4 и 5):

- высокий темп накопления повреждений происходит при умеренных и высоких уровнях напряжений; понижение температуры вызывает ускоренный рост повреждений, так же как и снижение энергии активации пластического сдвига (при повышенном содержании ионов водорода в металле) (рис. 4).

- понижение энергии активации пластического сдвига (за счет содержания ионов водорода в решетке металла) значительно ускоряет процесс накопления повреждений при низких температурах эксплуатации и небольших уровнях напряжений (рис. 5).

В уравнениях (3), (4) использовано значение структурно-чувствительного параметра $\gamma = 2 \cdot 10^{-4}$ эВ·МПа и постоянной Больцмана $k = 8.617 \cdot 10^{-5}$ эВ·К⁻¹.

Таким образом, зависимость (4) учитывает активационную природу разрушения и в совокупности с (1) и (3) может быть использована в численных моделях связанной диффузии-упругопластичности и накопления повреждений для оценки надежности и ресурса элементов конструкций северного исполнения, а также их сварных соединений. С помощью предложенных соотношений осуществлен количественный анализ явления хладноломкости путём учёта воздействия низких температур эксплуатации и растворенного водорода на процесс накопления повреждений.

В качестве рекомендаций по повышению хладостойкости материалов, а также их сварных соединений представляется целесообразным повышение энергии активации пластического сдвига сталей и сплавов, или разрыва молекулярных связей полимеров и композитов. Одной из наиболее перспективных технологий для металлических материалов является интенсивная пластическая деформация с созданием равновесной дисперсной структуры с микронапряжениями сжатия (материалы с субмикроструктурной структурой), однако для существенного понижения температурного диапазона вязкохрупкого перехода, особенно для безопасной эксплуатации сварных соединений таких материалов, рекомендуется микролегирование редкоземельными элементами, что обеспечит существенное повышение энергии активации пластического сдвига и сопротивления дислокационно-фононной подсистемы воздействию растворенного водорода.

Рис. 4. Зависимость поврежденности Ψ от уровня напряжений σ при различных температурах T и энергиях активации U_0 : 1 – $T = 223$ К, $U_0 = 4.2$ эВ; 2 – $T = 223$ К, $U_0 = 3.9$ эВ; 3 – $T = 293$ К, $U_0 = 4.2$ эВ; 4 – $T = 293$ К, $U_0 = 3.9$ эВ.

Рис. 5. Зависимость поврежденности Ψ от величины энергии активации U_0 при различных температурах и уровнях напряжений σ : 1 – $T = 223$ К, $\sigma = 250$ МПа; 2 – $T = 223$ К, $\sigma = 300$ МПа; 3 – $T = 293$ К, $\sigma = 250$ МПа; 4 – $T = 293$ К, $\sigma = 300$ МПа.

Заключение

Для подтверждения дислокационно-фононного механизма вязкохрупкого перехода, когда хладноломкость обуславливается флуктуациями на очагах в виде дислокаций, сдвигов, микропор и микротрещин и дальнейшим их ростом, разработана модель активационного типа. На основе разработанного подхода возможен количественный расчет энергетического и фононного спектра, а также прогнозирование свойств микрокристаллических и наноструктурных материалов с высоким порогом хладноломкости. В частности, измельчение кристаллической структуры зерен интенсивной пластической деформацией уменьшает длину сво-

бодного пробега в решетке, тем самым снижая неупругое рассеяние фононов, ответственное за разрыв связей под действием внешнего растягивающего напряжения. Это также позволяет рассчитать параметры и частоты оптимальных энергетических воздействий (нейтронного облучения, электрического напряжения и т.п.) на детали конструкции, снижающие диапазон вязкохрупкого перехода в область безопасных температур.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-48-140015) и Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук (проект III.28.1.1.) с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Станция натуральных испытаний» ИФТПС СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архангельская Е.А., Лепов В.В., Ларионов В.П. Связная модель замедленного разрушения повреждаемой среды // Физическая мезомеханика. 2001. Т. 4, № 4. С. 81–87.
2. Ачикасова В.С., Лепов В.В. Низкотемпературный вязко-хрупкий переход и внутреннее трение // Наука и образование. 2015. № 1(77). С. 75–77.
3. Бартенев Г.М. Прочность и механизм разрушения полимеров. М.: Химия, 1984. 280 с.
4. Бартенев Г.М., Зуев Ю.С. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов. М.; Л.: Химия, 1964. 388 с.
5. Ботвина Л.Р. Разрушение: кинетика, механизмы, общие закономерности. М.: Наука, 2008. 334 с.
6. Волков И.А., Игумнов Л.А. Введение в континуальную механику поврежденной среды. М.: Физматлит, 2017. 310 с.
7. Григорьев А.В., Лепов В.В. Надежность и ресурс технических систем в экстремальных условиях эксплуатации Арктики и Субарктики: железнодорожный транспорт. Новосибирск: Наука, 2018. 112 с.
8. Нагорных И.Л., Бурнышев И.Н. Молекулярно-динамическое моделирование поведения краевой дислокации с водородной атмосферой Коттрелла в альфа-железе // Химическая физика и мезоскопия. 2015. № 1(17). С. 111–116.
9. Петров А.И., Разуваева М.В. Оценка активационных параметров разрушения в алюминии и α -железе по данным измерения долговечности при умеренных и низких температурах // Журнал технической физики. 2010. Т. 80. вып. 6. С. 90–95.
10. Степанова Л.В. Математические методы механики разрушения. М.: Физматлит, 2009. 333 с.
11. Фрейденталь А.М. Статистический подход к хрупкому разрушению. Разрушение. Т. 2. Математические основы теории разрушения / под. ред. Г. Либовиц, пер. с англ. М.: Мир, 1975. С. 616–645.
12. Augusto Sciuccati. Mechanical Behaviour of High Toughness Steels in Extreme Environments: Influence of Hydrogen and Low Temperature. Doctoral Dissertation. Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering. Doctoral Programme in Mechanical Engineering, 2011. 131 p.
13. Broek D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. 4th revised edition. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1986, 469 p.
14. Chernov V.M., Kardashev B.K., Moroz K.A. Low-temperature embrittlement and fracture of metals with different crystal lattices – dislocation mechanisms. Nuclear Materials and Energy. 2016(9):496–501.
15. Environment-Induced Cracking of Materials. Ed. S.A. Shipilov, R.H. Jones, R.B. Rebak. Elsevier science, 2008. 1000 p.
16. González P., Ciceroa S., Álvarez J.A., Arroyo B. Analysis of stress corrosion cracking in X80 pipeline steel: An approach from the Theory of Critical Distances. Procedia Structural Integrity. 2018(13):3–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.002>
17. Lewei Tong, Lichao Niu, Shuang Jing, Liwen Ai, Xiao-Ling Zhao. Low temperature impact toughness of high strength structural steel. Thin-Walled Structures, 2018(132):410–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.009>
18. Stress Corrosion Cracking. Theory and Practice. Ed. V.S. Raja, Tetsuo Shoji. Woodhead Publishing, 2011, 816 p.

DOI: <https://dx.doi.org/10.24866/2227-6858/2019-3-4>

Lepov V., Arkhangelskaya E., Achikasova V.

VALERY LEPOV, Doctor of Engineering Sciences, Chief Researcher, Fracture Modeling Department, ORCID 0000-0003-2360-7983, e-mail: lepov@iptpn.ysn.ruVALENTINA ACHIKASOVA, Lead Engineer, Fracture Modeling Department, e-mail: achikasova@iptpn.ysn.ru*Larionov Institute of Physical and Technical Problems of the North SB RAS*

1 Otyabrskaya St., Yakutsk, Russia, 677890

EKATERINA ARKHANGELSKAYA, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Expert appraisal, management and cadastre of Real Estate, Engineering and Technical Institute, ORCID 0000-0002-6130-0539, e-mail: ea.arkhangelskaia@s-vfu.ru*M.K. Ammosov North-Eastern Federal University*

58 Belinskogo St., Yakutsk, Russia, 677029

Influence of hydrogen on the brittle fracture kinetics in metals

Abstract: A short review of actual researches on damage accumulation modeling and brittle fracture processes mechanisms under the combined effect of mechanical loading and hydrogen has been presented in the article. The modified mechanism of brittle fracture for metallic materials based on dislocation and phonon structure fingerprints and lattice hydrogen content under the static and dynamic loading at low temperature condition has been ground by experimental and numerical studies. The experiment includes the energy spectrum of internal friction determination and impact toughness testing for low-temperature brittle-ductile transition revealing. The numerical study based on damage accumulation modeling under the influence of up-hill diffusion in the elastic-plastic problem of solid state by finite element method. The new simple activation model of low temperature and hydrogen influence on damage accumulation process has been proposed. The tentative calculations show the strong dependence of the rate of damage on stress level and hydrogen content, and on test temperature. The combination of low temperature and high hydrogen content is most dangerous, so the weld structures using in extreme environment like the Arctic and Subarctic regions have high risk of breakage. It is possible to numerically estimate the energy and phonon spectrum of crystal lattice, and predict the properties of microcrystalline and nanostructured materials with high cold-short threshold on the base of such the approach. The recommendations to improve the cold resistance of steels and alloys by controlling the characteristics of the dislocation structure has been given also.

Keywords: damage, modeling, cold resistance, low temperature ductile-brittle transition, fluctuations, lattice hydrogen, dislocation, risk of breakage, cold-short threshold.

REFERENCES

1. Arkhangelskaya E.A., Lepov V.V., Larionov V.P. Connected model of delayed destruction of the damaged medium. *Physical Mesomechanics*. 2001(4);4:81–87.
2. Achikasova V.S., Lepov V.V. Ductile-brittle transition and internal friction at low-temperature. *Science and Education*, 2015(1):75–77.
3. Bartenev G.M. Strength and mechanism of destruction of polymers. M., Chemistry, 1984. 280 p.
4. Bartenev G.M., Zuev Yu.S. Strength and destruction of highly elastic materials. M., L., Chemistry, 1964, 388 p.

5. Botvina L.R. Destruction: kinetics, mechanisms, general laws. Moscow: Science, 2008. 334 p.
6. Volkov I.A., Igumnov L.A. Introduction to continuous mechanics of the damaged environment. M., Fizmatlit, 2017, 310 p.
7. Grigoriev A.V., Lepov V.V. Reliability and resource technical systems in extreme conditions of operation of the Arctic and Subarctic: railway transport. Novosibirsk, Nauka Publishing House, 2018, 112 p.
8. Nagornyh I.L., Burnyshev I.N. Molecular dynamic modeling of the behavior of edge dislocations with the Cottrell hydrogen atmosphere in alpha iron. Chemical Physics and Mesoscopy. 2015(1);17:111–116.
9. Petrov A.I., Razuvaeva M.V. Evaluation of the activation parameters of the destruction of aluminum and α -iron according to the measurement of durability at moderate and low temperatures. J. of Technical Physics. 2010(80);6:90–95.
10. Stepanova L.V. Mathematical methods of fracture mechanics. M., Fizmatlit, 2009, 333 p.
11. Freudenthal A.M. Statistical approach to brittle fracture. V. 2. Mathematical foundations of the theory of destruction. Under. ed. G. Libovits. M., Mir, 1975, p. 616–645.
12. Augusto Sciuccati. Mechanical Behaviour of High Toughness Steels in Extreme Environments: Influence of Hydrogen and Low Temperature. Doctoral Dissertation. Politecnico di Milano, Department of Mechanical Engineering. Doctoral Programme in Mechanical Engineering, 2011. 131 p.
13. Broek D. Elementary Engineering Fracture Mechanics. 4th revised edition. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1986, 469 p.
14. Chernov V.M., Kardashev B.K., Moroz K.A. Low-temperature embrittlement and fracture of metals with different crystal lattices – dislocation mechanisms. Nuclear Materials and Energy. 2016(9):496–501.
15. Environment-Induced Cracking of Materials. Ed. S.A. Shipilov, R.H. Jones, R.B. Rebak. Elsevier science, 2008. 1000 p.
16. González P., Cicero S., Álvarez J.A., Arroyo B. Analysis of stress corrosion cracking in X80 pipeline steel: An approach from the Theory of Critical Distances. Procedia Structural Integrity. 2018(13):3–10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.12.002>
17. Lewei Tong, Lichao Niu, Shuang Jing, Liwen Ai, Xiao-Ling Zhao. Low temperature impact toughness of high strength structural steel. Thin-Walled Structures, 2018(132):410–420. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.09.009>
18. Stress Corrosion Cracking. Theory and Practice. Ed. V.S. Raja, Tetsuo Shoji. Woodhead Publishing, 2011, 816 p.