

Received: 26.10.2023

Revised: 14.02.2024

Accepted: 26.04.2024

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.2.020-035

THE STRESS STATE OF A THICK-WALLED SHELL WITH ALLOWANCE FOR CONTACT WITH A HYDROGEN-CONTAINING MEDIUM

I. G. Emelyanov^{a)} * and D. A. Ogorelkov^{b)}

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0002-9733-5485>  emelyanov.ig.2016@mail.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0000-0002-7412-3316>  ogorelkov.dimon@yandex.ru

*Corresponding author. Email: emelyanov.ig.2016@mail.ru

Address for correspondence: ul. Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 362-3018; fax: +7 (343) 362-3018

Numerical and experimental methods are used to solve a multidisciplinary problem on determining the stress state of a steel shell of revolution under mechanical loading and thermal effect with allowance for its contact with a hydrogen-containing medium. The study uses a well-developed mathematical tool for solving heat conduction problems in order to solve the problem of hydrogen diffusion into metal. The effective stresses and their invariants are determined by solving the nonlinear boundary value problem of thermoplasticity of a thick-walled shell of revolution in a three-dimensional formulation. The study takes into account the experimentally found effect of changes in the mechanical properties of steel affected by hydrogen. The correctness of the proposed method and the performed calculations is quantitatively estimated by comparison with a well-known problem having an analytical solution. The paper shows that it is possible and necessary to take into account the change in mechanical properties when determining the stress state of steel structures operating in contact with a hydrogen-containing medium.

Keywords: thick-walled shell, steel, hydrogen, diffusion, experiment, mechanical properties, stress state

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment for the IES UB RAS, No. AAAA-A18-118020790140-5.

References

1. Karpenko, G.V. and Kripyakevich, R.I. *Vliyanie vodoroda na svoystva stali* [The Effect of Hydrogen Upon the Properties of Steel]. Metallurgizdat Publ., Moscow, 1962, 192 p. (In Russian).
2. Shreider, A.V., Shparber, I.S., and Archakov, Yu.I. *Vliyanie vodoroda na neftyanoe i khimicheskoe oborudovanie* [Effect of Hydrogen on Oil and Chemical Equipment]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1976, 144 p. (In Russian).
3. Archakov, Yu.I. *Vodorodnaya korroziya stali* [Hydrogen Corrosion of Steel]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1985, 192 p. (In Russian).
4. Rebyakov, Yu.N., Cherniavsky, A.O., and Cherniavsky, O.F. Deformation and destruction of materials and structures in the diffusion. *Vestnik YuUrGU*, 2010, 10, 4–16. (In Russian).
5. Ovchinnikov, I.I. and Ovchinnikov, I.G. Effect of hydrogen-containing environment at high temperature and pressure on the behavior of metals and structures. *Naukovedenie*, 2012, 14. (In Russian). Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/60tvn412.pdf>

6. Tehranchi, A. and Curtin, W.A. The role of atomistic simulations in probing hydrogen effects on plasticity and embrittlement in metals. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 216, 106502. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106502.
7. Baek, S.-W., Song, E.J., Kim, J.H., Jung, M., Baek, U.B., and Nahm, S.H. Hydrogen embrittlement of 3-D printing manufactured austenitic stainless-steel part for hydrogen service. *Scripta Materialia*, 2017, 130, 87–90. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.11.020.
8. Dasa, T., Legrand, E., Brahimi, S.V., Song, J., and Yue, S. Evaluation of material susceptibility to hydrogen embrittlement (HE): an approach based on experimental and finite element (FE) analyses. *Engineering Fracture Mechanics*, 2020, 224, 106714. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106714.
9. Shishvana, S.S., Csányi, G., and Deshpande, V.S. Hydrogen induced fast-fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2020, 134, 103740. DOI: 10.1016/j.jmps.2019.103740.
10. Ogawa, Y., Okazaki, S., Takakuwa, O., and Matsunaga, H. The roles of internal and external hydrogen in the deformation and fracture processes at the fatigue crack tip zone of metastable austenitic stainless steels. *Scripta Materialia*, 2018, 157, 95–99. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.08.003.
11. Merson, E.D., Myagkikh, P.N., Klevtsov, G.V., Merson, D.L., and Vinogradov, A. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 2019, 210, 342–357. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.05.026.
12. Anand, L., Mao, Y., and Talamini, B.L. On modeling fracture of ferritic steels due to hydrogen embrittlement. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2019, 122, 280–314. DOI: 10.1016/j.jmps.2018.09.012.
13. Pradhan, A., Vishwakarma, M., and Dwivedi, S.K. A review: the impact of hydrogen embrittlement on the fatigue strength of high strength steel. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26 (2), 3015–3019. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.627.
14. Tehranchi, A. and Curtin, W.A. Atomistic study of hydrogen embrittlement of grain boundaries in nickel. I. Fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2017, 101, 150–165. DOI: 10.1016/j.jmps.2017.01.020.
15. Yu, H., Cocks, A.C.F., and Tarleton, E. The influence of hydrogen on Lomer junctions. *Scripta Materialia*, 2019, 166, 173–177. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.03.022.
16. Mironov, V.I., Emelyanov, I.G., Vichuzhanin, D.I., Zamaraev, L.M., Ogorel'kov, D.A., and Yakovlev, V.V. Effect of hydrogenation temperature and tensile stress on the parameters of the complete deformation diagram for steel 09G2S. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, 1, 24–33. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.1.024-033. Available at: http://dream-journal.org/issues/2020-1/2020-1_279.html
17. Mironov, V.I., Emelyanov, I.G., Vichuzhanin, D.I., Kamantsev, I.S., Yakovlev, V.V., Ogorel'kov, D.A., and Zamaraev, L.M. A method for experimental investigation of degradation processes in materials. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2019, 2, 16–27. DOI: 10.17804/2410-9908.2019.2.016-027. Available at: http://dream-journal.org/issues/2019-2/2019-2_246.html
18. *Metody rascheta obolochek: v 5 t. T. 3.* Shevchenko, Yu.N. and Prokhorenko, I.V. *Teoriya uprugoplasticheskikh obolochek pri neizotermicheskikh protsessakh nagruzheniya* [Theory of Elastoplastic Shells under Nonisothermal Loading Processes, vol. 3. In: Methods for Calculating Shells]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1981, 296 p. (In Russian).
19. *Metody rascheta obolochek: v 5 t. T. 4.* Grigorenko, Ya.M. and Vasilenko, A.T. *Teoriya obolochek peremennoy zhestkosti* [The theory of Shells of Variable Stiffness, vol. 4. In: Methods for Calculating Shells]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1981, 544 p. (In Russian).
20. Lykov, A.V. *Teplomassoobmen* [Heat-mass exchange: Reference Book]. Energiya Publ., Moscow, 1978, 480 p. (In Russian).
21. Aramanovich, I.G. and Levin, V.I. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of Mathematical Physics]. Nauka Publ., Moscow, 1969, 288 p. (In Russian).

22. Vorobyev, A.Kh. *Diffuzionnye zadachi v khimicheskoy kinetike: uchebnoe posobie* [Diffusional Problems in Chemical Kinetics]. MGU Publ., Moscow, 2003, 98 p. (In Russian).
23. Cherdantsev, Yu.P., Chernov, I.P., and Tyurin, Yu.I. *Metody issledovaniya sistem metall-vodorod: uchebnoe posobie* [Methods for Studying Metalhydrogen Systems]. TPU Publ., Tomsk, 2008, 286 p. (In Russian).
24. Galaktionova, N.A. *Vodorod v metallakh* [Hydrogen in Metals]. Metallurgizdat Publ., Moscow, 1959, 255 p. (In Russian).
25. Shevchenko, Yu.N., Babeshko, M.E., Piskun, V.V., Prokhorenko, I.V., and Savchenko V.G. *Reshenie osesimmetrichnoy zadachi termoplastichnosti dlya tonkostennykh i tolstostennykh tel vrashcheniya na ES EVM* [The Solution of the Axisymmetric Problem of Thermoplasticity for Thin-Walled and Thick-Walled Bodies of Revolution on the EU Computer]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1980, 196 p. (In Russian).
26. Shevchenko, Yu.N. *Termoplastichnost pri peremennykh nagruzheniyakh* [Thermoplasticity Under Variable Loads]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1970, 288 p. (In Russian).
27. Ilyushin, A.A. *Plastichnost. Osnovy obshchey matematicheskoy teorii* [Plasticity. Foundations of the General Mathematical Theory]. Izd-vo AN SSSR, Moscow, 1963. 271 p. (In Russian).
28. Emelyanov, I.G. and Mironov, V.I. A thermodiffusion problem of hydrogenation of a steel shell structure. *Vestnik PNIPU. Mekhanika*, 2018, 3, pp. 27–35. (In Russian). DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.03.
29. Emelyanov, I.G. and Mironov, V.I. The method for estimation of shell hydrogenation with variable geometrical and physics-mechanicals parameters. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 2053, 030012. DOI: 10.1063/1.5084373.
30. Emelyanov, I.G., Mironov, V.I., and Hodak, A.S. The boundary value problem of determining hydrogen concentration and the stress state in a titanium shell. *AIP Conference Proceedings*, 2019, 2176, 030005. DOI: 10.1063/1.5135129.
31. Syrotyuk, A.M., Leshchak, R.L., and Dorosh, M.I. Experimental and analytic investigation of the hydrogenation of pipe steels. *Materials Science*, 2018, 53, 811–817. DOI: 10.1007/s11003-018-0140-0.
32. Ivanytskyi, Ya.L., Hembara, O.V., and Chepil, Ya.O. Determination of the durability of elements of power-generating equipment with regard for the influence of working media. *Materials Science*, 2015, 51, 104–113. DOI: 10.1007/s11003-015-9815-y.
33. Khismatulin, E.R., Korolev, E.M., Livshits, V.I. et al. *Sosudy i truboprovody vysokogo davleniya: spravochnik* [High-Pressure Vessels and Pipelines: Handbook]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1990, 384 p. (In Russian).
34. Pisarenko, G.S., Yakovlev, A.P., and Matveev, V.V. *Spravochnik po soprotivleniyu materialov* [Handbook on Strength of Materials]. Naukova Dumka Publ., Kiev, 1988, 736 p. (In Russian).

Подана в журнал: 26.10.2023

УДК 620.172.2:51-72

DOI: 10.17804/2410-9908.2024.2.020-035

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОЛСТОСТЕННОЙ ОБОЛОЧКИ С УЧЕТОМ КОНТАКТА С ВОДОРОДСОДЕРЖАЩЕЙ СРЕДОЙ

И. Г. Емельянов^{а), *}, Д. А. Огорелков^{б)}

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия*

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-9733-5485>  emelyanov.ig.2016@mail.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0002-7412-3316>  ogorelkov.dimon@yandex.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: emelyanov.ig.2016@mail.ru
Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия
Тел.: +7 (343) 362–30–18; факс: +7 (343) 362–30–18

С использованием численных и экспериментальных методов решена мультидисциплинарная задача определения напряженного состояния стальной оболочки вращения в условиях механического нагружения и температурного воздействия с учетом ее контакта с водородсодержащей средой. В работе используется разработанный математический аппарат решения задач теплопроводности для решения задачи диффузии водорода в металл. Действующие напряжения и их инварианты определяются решением нелинейной краевой задачи термопластичности толстостенной оболочки вращения в трехмерной постановке. В работе учитывается экспериментально зафиксированный эффект изменения механических свойств стали под воздействием водорода. Даны количественные оценки правильности предлагаемого метода и выполненных расчетов путем сравнения с известной задачей, имеющей аналитическое решение. Показана возможность и необходимость учитывать изменение механических свойств при определении напряженного состояния стальных конструкций, работающих в условиях контакта с водородсодержащей средой.

Ключевые слова: толстостенная оболочка, сталь, водород, диффузия, эксперимент, механические свойства, напряженное состояние

1. Введение

Различные металлические конструкции часто эксплуатируются при контакте с агрессивными водородсодержащими средами. Известно, что под влиянием агрессивных сред изменяются механические свойства металлов [1–7]. Этот факт необходимо учитывать при оценке прочности длительно эксплуатируемых элементов конструкций, например трубопроводов и резервуаров, предназначенных для транспортировки и хранения водородсодержащих сред, которые рассматриваются как объекты повышенной опасности. Нестационарное термомеханическое воздействие на трубопровод и контакт с агрессивной средой способствуют образованию дефектов в металле при длительной эксплуатации, которые могут привести к аварийным ситуациям. Требования к эксплуатационной надежности устройств для хранения и транспортировки водородсодержащих сред определяют особый интерес исследователей к задачам прочности и безопасности конструкций в условиях наводороженного металла.

Влияние агрессивной среды проявляется в эффектах двух типов: поверхностных и объемных. Поверхностные эффекты выражаются в растворении материала вследствие химического взаимодействия со средой или в изменении вязкости разрушения вследствие взаимодействия вершин трещин с молекулами среды [8–10].

Объемные эффекты более многообразны. Например, под действием водорода изменяются свойства сталей: происходит водородное охрупчивание, выражающееся в изменении показателей прочности и пластичности вследствие химических взаимодействий. Природа механизма водородного охрупчивания до конца пока не изучена. Не удалось построить универсальную модель, дающую надежные прогнозы срока службы оборудования, работающего в водородсодержащих средах [11]. Предложенные модели описывают воздействие водорода для конкретных классов сталей: ферритных [12], низкоуглеродистых [13] и т. д. Поэтому для понимания сложного механизма охрупчивания требуется большой объем теоретических и экспериментальных исследований.

Поскольку водородсодержащая среда оказывает негативное воздействие на металлические конструкции, то влияние водорода на механические характеристики материалов в настоящее время активно изучается. Например, влияние водорода на системы, масштабы которых сравнимы с размером ячейки кристаллической решетки материала, изучают физическими методами [14, 15], а для образцов, размеры которых значительно превышают характерные размеры структурных составляющих материала, применяют механические испытания [16, 17].

В данной работе предложена численно-экспериментальная методика решения мультидисциплинарной задачи определения напряженного состояния стальной оболочки вращения в условиях механического нагружения и температурного воздействия с учетом ее контакта с водородсодержащей средой. В работе используется хорошо разработанный математический аппарат решения задач теплопроводности для решения задачи диффузии водорода в металл. Для определения напряженного состояния используется математическая модель, описывающая пространственное напряженное состояние тела вращения с возможной термопластической деформацией. Для определения механических параметров материала конструкции экспериментально исследуются образцы из материала, предварительно насыщенного водородом. Определено напряженное состояние стальной оболочки вращения в трехмерной постановке в условиях механического нагружения с учетом изменения свойств материала при наводороживании. При упругой деформации исследуемой оболочки получено хорошее совпадение результатов решения по предлагаемой методике с известными результатами решения задачи теории упругости.

2. Методы математического и экспериментального моделирования

2.1. Уравнения упругопластического тела вращения с учетом диффузии

Предложенная методика демонстрируется на конструкции в виде оболочки вращения. Внешняя поверхность оболочки контактирует с водородсодержащей средой с избыточным давлением. Отнесем данную оболочку вращения с толщиной h к непрерывной срединной поверхности с криволинейными ортогональными координатами, где s – меридиональная, а θ – окружная координата. Через γ обозначим координату в направлении внешней нормали к поверхности оболочки. На рис. 1 показана цилиндрическая оболочка под внешней распределенной нагрузкой q .

Известно, что распространения температуры T в оболочке вращения описываются дифференциальным уравнением [18]

$$\frac{1}{H_1 H_2} \left[\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{H_2}{H_1} \frac{\partial T}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{H_1}{H_2} \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(H_1 H_2 \frac{\partial T}{\partial \gamma} \right) \right] = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

где H_1, H_2 – коэффициенты Ламе [19]; t – время; a – коэффициент температуропроводности.

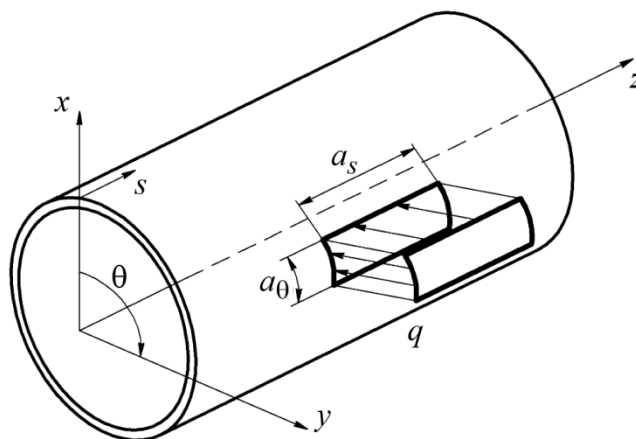


Рис. 1. Цилиндрическая оболочка

Коэффициенты H_1 и H_2 определяются через главные радиусы оболочки $k_1 = R_s^{-1}$ и $k_2 = R_\theta^{-1}$:

$$H_1 = A(1 + k_1\gamma), \quad H_2 = B(1 + k_2\gamma). \quad (2)$$

Параметры Ламе для оболочек вращения будут $A = 1$, $B = r$, где $r(s)$ – текущий радиус оболочки. Радиусы главных кривизн R_s и R_θ будут равны радиусу кривизны меридиана и длине отрезка нормали к поверхности до оси вращения оболочки z [19].

Температуру на поверхности оболочки в каждый момент времени необходимо задавать граничными условиями. В задачах теплопроводности обычно используют три вида граничных условий [20]. Если использовать наиболее простое граничное условие первого рода, то необходимо задавать на поверхности оболочки распределение температуры

$$T\left(\gamma = \frac{h}{2}, t\right) = T_H, \quad (3)$$

где T_H – начальная температура на внешней поверхности оболочки; h – толщина оболочки.

В результате контакта оболочки с водородсодержащей средой происходит процесс наводороживания металла. Процессы нагрева и диффузии развиваются за счет различных физических носителей, однако при решении прикладных задач обычно принимают гипотезу о том, что при математическом описании процесса диффузии можно использовать уравнение теплопроводности, заменив коэффициент температуропроводности a коэффициентом диффузии D [20–22]. Коэффициент температуропроводности a является коэффициентом переноса тепла, а коэффициент D характеризует эффективность диффузионного перемещения исследуемого вещества. При этом оба коэффициента имеют размерность $\text{м}^2/\text{с}$. Следовательно, процесс диффузии можно представить уравнением

$$\frac{1}{H_1 H_2} \left[\frac{\partial}{\partial s} \left(\frac{H_2}{H_1} \frac{\partial c}{\partial s} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{H_1}{H_2} \frac{\partial c}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial \gamma} \left(H_1 H_2 \frac{\partial c}{\partial \gamma} \right) \right] = \frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (4)$$

где c – концентрация водорода.

Концентрация водорода в металлах измеряется его содержанием в ppm ($1,12 \text{ см}^3/100 \text{ г}$). Известно, что растворимость водорода в сталях может достигать 300–400 ppm, а в титановых сплавах – 40 000 ppm [23, 24].

Процесс диффузии в значительной степени зависит от температуры тела. Соотношение Эйнштейна [22] связывает подвижность молекулы с коэффициентом диффузии и температурой. Таким образом, при решении прикладных задач диффузии можно использовать вычислительные методы, которые применяются при решении задач теплопроводности, с учетом того, что коэффициент диффузии будет зависеть от температуры, $D(T)$.

Поскольку рассматриваем конструкцию в виде толстостенной цилиндрической оболочки под действием внешнего давления водородсодержащей среды, то термомеханическая задача будет осесимметричной. Следовательно, на внешней поверхности оболочки будет постоянная концентрация водородсодержащей среды. Таким образом, при решении задачи диффузии концентрация водорода будет зависеть только от координаты γ .

Уравнение теплопроводности (1) в цилиндрической системе координат z, r (z – координата оси вращения) для тела вращения при осесимметричном нагреве было получено в работе [25]. По аналогии с этим уравнением теплопроводности представим уравнение диффузии (4) для тела вращения в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial c}{\partial r} \right) = \frac{1}{D} \frac{\partial c}{\partial t}, \quad (5)$$

где $r(z)$ – радиус тела вращения.

Граничными условиями для данного уравнения будут служить значения концентрации водорода на поверхности. Принимая предположение о быстром перемешивании водородсодержащей среды, для этой задачи зададим граничные условия первого рода

$$c(r_{\max}, t) = c_H, \quad c(r_{\min}, t) = 0. \quad (6)$$

Здесь c_H – начальная концентрация водорода на внешней поверхности оболочки.

Таким образом, на первом этапе решения задачи после решения уравнения (5) может быть найдено распределение концентрации водорода в исследуемой цилиндрической оболочке $c(r, z, t)$ в любой момент времени.

На втором этапе решения задачи необходимо найти напряженное состояние цилиндрической оболочки под действием механической нагрузки с учетом установившегося в ней распределения концентрации водорода.

Напряженное состояние оболочки будем определять в трехмерной постановке с учетом осесимметричного деформирования. Будем использовать дифференциальные уравнения равновесия тензора напряжений без учета кручения тела [25]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{zr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{zr}}{r} + F_z &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r} + F_r &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений, $F_z = q_z/z$, $F_r = q_r/z$ – компоненты погонной силы.

Для описания изменения механических характеристик тела будем использовать физические уравнения пластичности для прямолинейных траекторий деформирования. Компоненты тензора напряжений и деформаций для осесимметричной задачи тела связаны соотношениями [26]

$$\sigma_{ij} = 2G^* \varepsilon_{ij} + \lambda^* \theta \delta_{ij} - \sigma_{ij}^d, \quad (8)$$

где индексы i, j принимают значения 1, 2, 3; δ_{ij} – символ Кронекера, равный единице при $i = j$ и равный нулю при $i \neq j$; θ – объемная деформация,

$$\theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}, \quad 2G^* = \frac{1}{\psi} = \frac{S}{H}, \quad \lambda^* = \frac{2G^* \nu^*}{1 - 2\nu^*}, \quad (9)$$

$$\nu^* = \frac{2G(1+\nu)\psi - (1-2\nu)}{4G(1+\nu)\psi + (1-2\nu)}, \quad \sigma_{ij}^d = K\varepsilon_T \delta_{ij} + 2G\varepsilon_{ij}^P, \quad K = \frac{2G^*(1+\nu^*)}{1-2\nu^*}.$$

Здесь G – модуль сдвига, ν – коэффициент Пуассона, K – модуль объемного расширения, ε_{ij}^P – компоненты пластической деформации, ε_T – тепловая деформация. В соотношениях (9) S и H – интенсивности касательных напряжений и деформаций сдвига, которые определяются следующими равенствами (по повторяющимся индексам предполагается суммирование от 1 до 3):

$$S = \sqrt{\frac{1}{2} S_{ij} S_{ij}}, \quad H = \sqrt{\frac{1}{2} e_{ij} e_{ij}}. \quad (10)$$

Здесь S_{ij} , e_{ij} – компоненты девиаторов напряжений и деформаций, определяемые как

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sigma_0 \delta_{ij}, \quad e_{ij} = \varepsilon_{ij} - \varepsilon_0 \delta_{ij}, \quad (11)$$

где

$$\sigma_0 = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}), \quad \varepsilon_0 = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}).$$

В соотношениях (11) компоненты пластической деформации определяются равенством

$$\varepsilon_{ij}^P = \omega e_{ij}, \quad (12)$$

где ω – функция пластичности [25–27],

$$\omega = 1 - \frac{G^*}{G}. \quad (13)$$

Модуль сдвига G в общем случае зависит от температуры оболочки T и концентрации водорода c . В нашем случае интенсивность касательных напряжений будет функционалом от интенсивности деформаций сдвига H и концентрации водорода:

$$S = F[H, c]. \quad (14)$$

2.2. Численные методы решения задачи

Итак, сначала необходимо решить краевую задачу диффузии (5). Для этого используем вычислительную программу расчета нестационарной теплопроводности. Для решения задачи теплопроводности используем подход, основанный на том, что уравнение теплопроводности заменяется эквивалентным вариационным уравнением [25]. Это уравнение решается

методом конечных элементов по явной схеме решения задачи теплопроводности. Результаты решения для цилиндрического стержня сравнивались с известными результатами для задачи, имеющей аналитическое решение. Примеры решения задач нестационарной теплопроводности и диффузии рассматривались в работах [28–30].

При определении осесимметричного напряженного состояния тела вращения, описанного уравнениями (7)–(14), также используется метод конечных элементов. В качестве конечного элемента принят плоский треугольный элемент. Для этого уравнения равновесия со статическими граничными условиями заменяются эквивалентными вариационными уравнениями.

Сведение разрешающих уравнений к системе алгебраических уравнений и линеаризация физически нелинейной задачи приведены в работе [25]. Таким образом, может быть вычислено напряженное состояние $\sigma_{ij}(r, z, c(t))$, которое будет зависеть от распределения концентрации водорода в исследуемой конструкции.

2.3. Экспериментальные исследования, необходимые для решения задачи

Для решения задачи определения напряженного состояния исследуемой конструкции необходимы экспериментальные данные при растяжении образцов из материала конструкции, находящихся в водородсодержащей среде. Экспериментальных данных, демонстрирующих феноменологический эффект изменения механических свойств различных материалов в зависимости от времени насыщения или концентрации водорода, в научной литературе не так много. Для решения поставленной задачи были взяты данные из проведенного эксперимента на растяжение образцов из стали [16]. В работе [16] приведены записанные машинные кривые растяжения в виде полных диаграмм деформирования. Образцы, показанные на рис. 2, испытывались без водорода и после процесса наводороживания. Исследуемая рабочая часть образца представляет собой стальную цилиндрическую оболочку длиной $l = 2$ мм, толщиной $h = 0,5$ мм и внешним диаметром $D = 3$ мм, изготовленную из конструкционной стали для сварных конструкций 09Г2С по российскому стандарту ГОСТ 19281-2014. Механические испытания образцов выполнялись на разрывной машине Instron 8801.

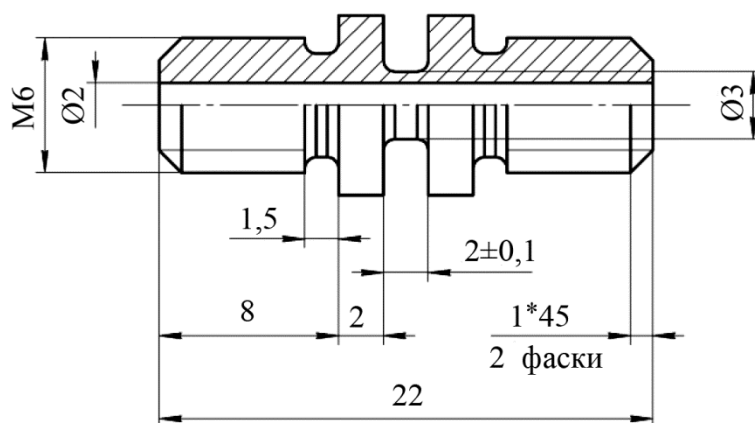


Рис. 2. Образец для испытания

При проведении испытаний образец устанавливают в спроектированном устройстве и закрывают колпаком, образующим герметичную камеру, в которой поддерживается давление водорода $p = 5$ МПа. Для увеличения скорости наводороживания образцы нагревались. После наводороживания, длившегося около 3 часов, образцы снимались со стенда и сразу, чтобы исключить дегазацию водорода, испытывались на разрывной машине. Следовательно, можно считать, что феноменологический эффект изменения механических свойств обусловлен не только наводороживанием, но и остаточной температурой образца.

На рис. 3 показаны восходящие кривые растяжения образцов без наводороживания при температуре 20 °С (кривая 1) и после их наводороживания при температуре 580 °С (кривая 2).

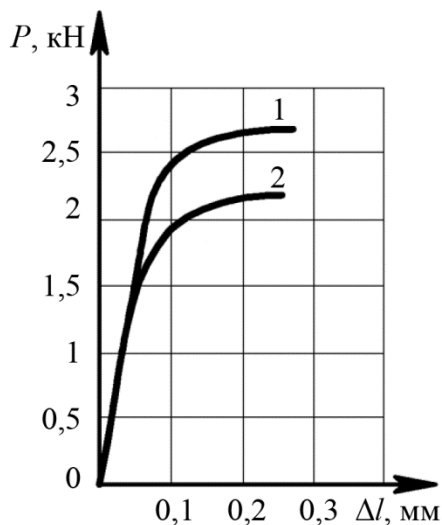


Рис. 3. Машинные диаграммы стали 09Г2С: кривая 1 – без наводороживания; кривая 2 – наводороживание при температуре 580 °С

3. Результаты и обсуждение

3.1. Результаты решения с использованием программы SolidWorks

Поскольку испытывались образцы нестандартной формы и с короткой рабочей длиной 2 мм, то сначала для демонстрации предложенного метода определяли напряженное состояние металлических конструкций в виде центральной части образца под действием растягивающей силы на торцах. С использованием вычислительной программы SolidWorks, предназначенной для создания моделей и проведения инженерного анализа, определено напряженное состояние центральной части образца с буртиками при температуре 20 °С в физически линейной постановке (при упругих деформациях) без наводороживания.

На рис. 4 показано распределение интенсивности деформаций сдвига H в центральной части образца.

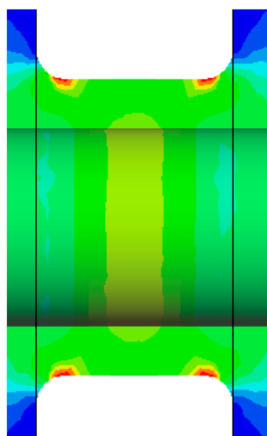


Рис. 4. Распределение интенсивности деформаций сдвига H в центральной части образца длиной 2 мм

Из рис. 4 следует, что в срединной части образца длиной 2 мм, за исключением концентрации напряжений вблизи начала буртика, интенсивность деформации сдвига H практи-

чески постоянна. Следовательно, вычисленные осевые напряжения в центре образца будут достаточно точно определять механические свойства при растяжении исследуемого материала. Для полного исключения краевого эффекта, обусловленного геометрией образца, в дальнейшем модель конструкции принимается в виде цилиндрической оболочки.

3.2. Результаты решения с помощью предлагаемой методики

Геометрическая модель исследуемой конструкции принимается в виде цилиндрической оболочки (трубы) со свободными краями длиной 2 мм и толщиной 0,5 мм. Поскольку отношение достаточно большое ($R_{cp}/h = 2,5$, где R_{cp} – срединный радиус цилиндра), то этот исследуемый элемент должен описываться уравнениями для толстостенного цилиндра, т. е. с использованием пространственной теории упругости.

На первом этапе для определения распределения концентрации водорода в исследуемом цилиндре решается краевая задача диффузии (5). Коэффициент диффузии для стали 09Г2С принят $D = 4 \times 10^{-4} \text{ см}^2/\text{с}$ для температуры $T = 580 \text{ }^\circ\text{C}$. Необходимо добавить, что коэффициенты диффузии, приведенные в различных литературных источниках для одного и того же материала при повышенных температурах, могут сильно отличаться, что объясняется, по-видимому, различными методиками проведения эксперимента.

Для реализации граничного условия (6) необходимо определить концентрацию водорода на поверхности цилиндра, определяемую давлением водородсодержащей среды p , температурой T и состоянием поверхности. Некоторые аналитические и экспериментальные соотношения для определения концентрации водорода на поверхности тела и внутри рассмотрены в работах [31, 32]. Концентрацию водорода на поверхности c_H в ppm в зависимости от парциального давления водорода в газовой фазе p_{H_2} (МПа) и температуры можно определить соотношением [33]

$$c_H = K_0 \exp\left\{-\frac{\Delta H}{2R(T + 273)}\right\} \sqrt{p_{H_2}}, \quad (15)$$

где K_0 – безразмерные коэффициенты; ΔH – теплота растворения; R – универсальная газовая постоянная.

Учитывая соотношение (15), можно найти значения c_H для граничного условия первого рода (6). Для рассматриваемой задачи начальная концентрация водорода на внешней поверхности цилиндра c_H составит 1,52 ppm при $T = 580 \text{ }^\circ\text{C}$. Из-за высокой температуры процесс насыщения водородом идет достаточно быстро. На рис. 5 показано распределение концентрации водорода по толщине стенки цилиндра (толщина стенки $h = 0,5 \text{ мм}$ разделена на 10 частей). Кривые 1–6 соответствуют 1, 2, 3, 4, 5 и 10 секундам диффузии. Следовательно, после проведенного испытания по всей толщине образца концентрация водорода c_H составит 1,52 ppm.

На втором этапе решения задачи для определения напряженного состояния необходимо задать свойства материала. При определении упругопластического напряженного состояния цилиндра необходимо знать зависимость $\sigma = f(\epsilon)$ при $T = \text{const}$ и $c = \text{const}$ для исследуемого материала. Для элементов конструкций из стали 09Г2С такие зависимости в виде диаграмм растяжения можно аппроксимировать кусочно-линейным представлением. С целью решения задач для элементов конструкций при насыщении водородом с концентрацией $c = 1,52 \text{ ppm}$ диаграмма растяжения (рис. 3, кривая 2) представлялась точками, показанными в таблице (безразмерная деформация ϵ , напряжение σ в МПа).

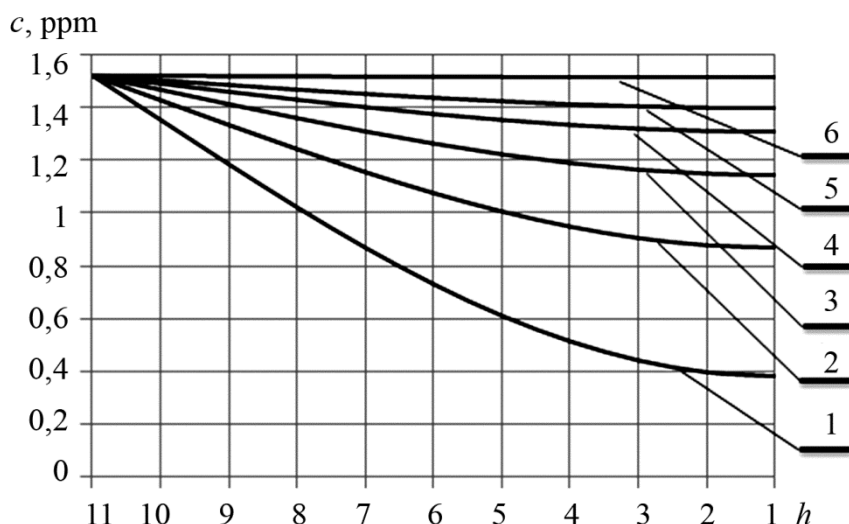


Рис. 5. Распределение концентрации водорода c по толщине стенки

Таблица

Аппроксимация диаграммы растяжения (рис. 3, кривая 2)

$\varepsilon_1 = 0,0$	$\varepsilon_2 = 0,0013$	$\varepsilon_3 = 0,03$	$\varepsilon_4 = 0,06$	$\varepsilon_5 = 0,1$	$\varepsilon_6 = 0,15$
$\sigma_1 = 0,0$	$\sigma_2 = 254$	$\sigma_3 = 381$	$\sigma_4 = 508$	$\sigma_5 = 559$	$\sigma_6 = 584$

При геометрическом моделировании цилиндра его толщина делилась на четыре прямоугольных микроподобластей. Количество данных подобластей в меридиональном направлении зависит от длины оболочки. Для данной задачи принималось $4 \times 10 = 40$ микроподобластей. Затем каждая микроподобласть делилась на четыре треугольных конечных элемента. Результаты решения задачи по определению компонент напряженного состояния приводятся для середины каждого конечного элемента, т. е. в восьми точках по радиусу и двадцати точках по длине оболочки. Торцевые поверхности цилиндра принимались свободными.

Таким образом, на втором этапе определены компоненты напряженного состояния (окружное $\sigma_{\theta\theta}$, радиальное σ_{rr} и осевое σ_{zz} напряжения) для цилиндра с механическими свойствами (таблица), на внешнюю поверхность которого действует давление водорода $p = 5$ МПа.

На рис. 6 показано распределение окружного напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ по длине цилиндра на внешней (кривая 1) и внутренней (кривая 2) поверхностях.

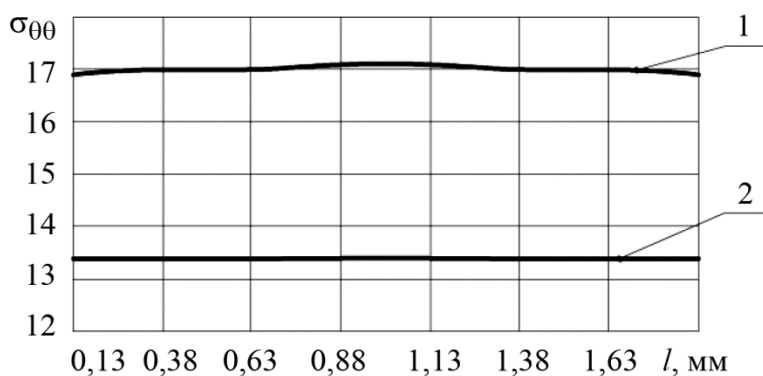


Рис. 6. Распределение окружного напряжения $\sigma_{\theta\theta}$ по длине цилиндра

На рис. 7 показано распределение радиального напряжения σ_{rr} по длине цилиндра на внешней (кривая 1) и внутренней (кривая 2) поверхностях.

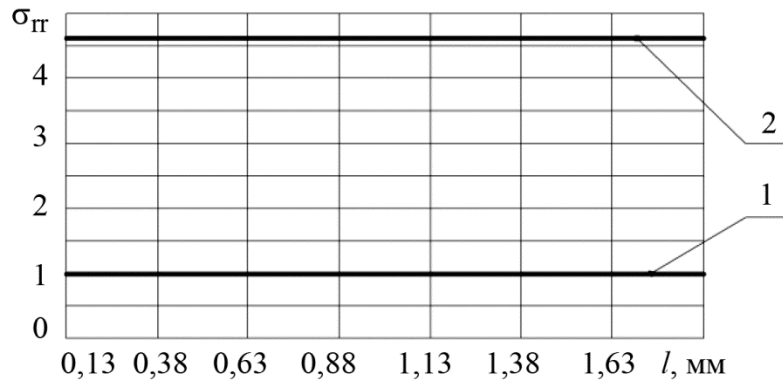


Рис. 7. Распределение радиального напряжения σ_{rr} по длине цилиндра

На рис. 8 показано распределение интенсивности касательных напряжений сдвига S в зависимости от внешнего давления p для точки с координатой $z = 0,5l$ на внешней поверхности цилиндра. S определяется формулой

$$S = \sqrt{[(\sigma_{zz} - \sigma_{rr})^2 + (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta})^2 + (\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{zz})^2 + 6\sigma_{zr}^2]} \frac{1}{6}. \quad (16)$$

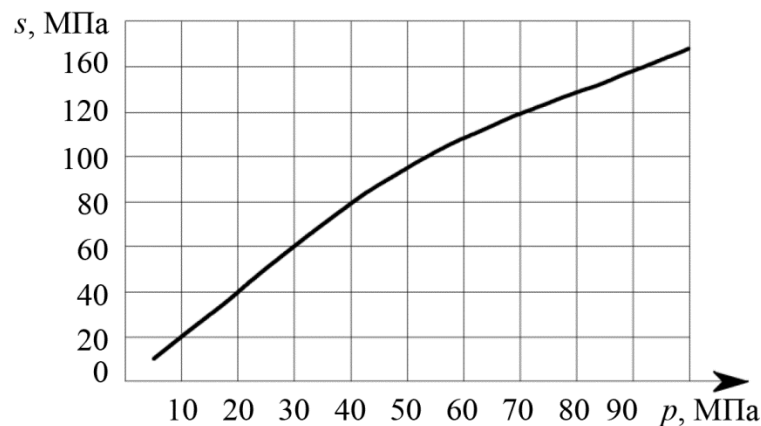


Рис. 8. Распределение интенсивности касательных напряжений сдвига S в зависимости от внешнего давления p

3.3. Обсуждение и верификация результатов решения

Из рис. 5 следует, что из-за небольшой толщины (0,5 мм) и большого коэффициента диффузии достаточно быстро в цилиндре устанавливается постоянная концентрация водорода по всей толщине, $c = 1,52$ ppm. Следовательно, для расчетов напряженного состояния цилиндра можно использовать механические свойства исследуемого материала, полученные при данной концентрации.

Из проведенных расчетов следует, что при упругой деформации при внешнем давлении $p = 5$ МПа в центре цилиндра ($z = 0,5l$) на внешней поверхности ($r = 1,44$ мм – центр тяжести конечного элемента) окружное напряжение $\sigma_{\theta\theta}$ равно $-13,4$ МПа (рис. 6), а радиальное напряжение σ_{rr} составляет $-4,6$ МПа (рис. 7). На внутренней поверхности ($r = 1,06$ мм – центр тяжести конечного элемента) окружное напряжение $\sigma_{\theta\theta}$ равно $-17,1$ МПа, а радиальное напряжение σ_{rr} равно $-1,0$ МПа. Полученные по предложенной методике напряжения практически совпа-

дают с напряжениями, вычисленными с использованием аналитических формул для толстостенного плосконапряженного цилиндра, нагруженного внешним давлением [34]:

$$\sigma_{\theta\theta} = -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 + \frac{r_1^2}{r^2}\right) p, \quad \sigma_{rr} = -\frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r^2}\right) p. \quad (17)$$

Здесь $r_1 = 1$ мм, $r_2 = 1,5$ мм.

Вычисления по формулам (17) привели к следующим результатам: при $r = 1,44$ мм $\sigma_{\theta\theta} = -13,36$ МПа, $\sigma_{rr} = -4,65$ МПа; при $r = 1,06$ мм $\sigma_{\theta\theta} = -17,0$ МПа, $\sigma_{rr} = -0,99$ МПа. Следовательно, в области упругих деформаций напряженное состояние толстостенного цилиндра, вычисленное по предлагаемой методике, совпадает с напряженным состоянием, вычисленным с использованием известного решения классической теории упругости.

Из рис. 8 следует, что при давлении p более 80 МПа задача становится физически нелинейной (распределение интенсивности касательных напряжений сдвига S отклоняется от прямолинейной траектории). Как показано выше, нелинейный эффект изменения механических свойств, обусловленный наводороживанием и остаточной температурой образцов, приводит к нелинейному напряженному состоянию исследуемого толстостенного цилиндра. Величину интенсивности касательных напряжений сдвига S , учитывающую феноменологический эффект от наводороживания металла, можно использовать для оценки прочности исследуемого элемента конструкции.

Поскольку с использованием предложенной выше численно-экспериментальной методики определены компоненты напряженного состояния оболочки (окружное $\sigma_{\theta\theta}$, радиальное σ_{rr} и осевое σ_{zz} напряжения), то по этим напряжениям, применяя какую-либо теорию прочности, можно произвести оценку прочности для рассматриваемой оболочки. Но это самостоятельная, далеко не тривиальная задача, которая не входит в круг проблем, затрагиваемых в данной статье. Например, в работе [34] приведено более десятка различных теорий прочности. В простейшем варианте, который часто применяется в прикладных задачах, считается, что прочность оболочки обеспечивается, если интенсивность касательных напряжений сдвига S не превышает временного сопротивления материала σ_b . Следовательно, для приведенного в статье примера S не должно превышать $\sigma_b = 584$ МПа (таблица).

4. Заключение

Таким образом, с использованием численных методов и результатов экспериментальных исследований решена мультидисциплинарная задача по определению напряженного состояния толстостенной стальной оболочки вращения в условиях механического нагружения при контакте с водородсодержащей средой. При этом решено уравнение диффузии и определено распределение концентрации водорода по телу цилиндрической оболочечной конструкции; определены компоненты напряженно-деформированного состояния для цилиндрической оболочки с учетом механических свойств материала, зависящих от концентрации водорода; даны количественные оценки правильности предлагаемого метода и выполненных расчетов; показано, как можно произвести оценку прочности цилиндрической конструкции, контактирующей с водородсодержащей средой при механическом нагружении.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМАШ УрО РАН (тема АААА-А18-118020790140-5).

Литература

1. Карпенко Г. В., Крипакевич Р. И. Влияние водорода на свойства стали. – М. : Металлургиздат, 1962. – 192 с.
2. Шрейдер А. В., Шпарбер И. С., Арчаков Ю. И. Влияние водорода на нефтяное и химическое оборудование. – М. : Машиностроение, 1976. – 144 с.
3. Арчаков Ю. И. Водородная коррозия стали. – М. : Metallurgiya, 1985. – 192 с.
4. Ребяков Ю. Н., Чернявский А. О., Чернявский О. Ф. Деформирование и разрушение материалов и конструкций в условиях диффузии // Вестник ЮУрГУ. – 2010. – № 10. – С. 4–16.
5. Овчинников И. И., Овчинников И. Г. Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ». – 2012. – № 4. – URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/60tvn412.pdf>
6. Tehranchi A., Curtin W. A. The role of atomistic simulations in probing hydrogen effects on plasticity and embrittlement in metals // Engineering Fracture Mechanics. – 2019. – Vol. 216. – P. 106502. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106502.
7. Hydrogen embrittlement of 3-D printing manufactured austenitic stainless-steel part for hydrogen service / S.-W. Baek, E. J. Song, J. H. Kim, M. Jung, U. B. Baek, S. H. Nahm // Scripta Materialia. – 2017. – Vol. 130. – P. 87–90. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2016.11.020.
8. Evaluation of material susceptibility to hydrogen embrittlement (HE): an approach based on experimental and finite element (FE) analyses / T. Dasa, E. Legrand, S. V. Brahimia, J. Song, S. Yue // Engineering Fracture Mechanics. – 2020. – Vol. 224. – P. 106714. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2019.106714.
9. Shishvana S. S., Csányi G., Deshpande V. S. Hydrogen induced fast-fracture // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2020. – Vol. 134. – P. 103740. – DOI: 10.1016/j.jmps.2019.103740.
10. The roles of internal and external hydrogen in the deformation and fracture processes at the fatigue crack tip zone of metastable austenitic stainless steels / Y. Ogawa, S. Okazaki, O. Takakuwa, H. Matsunaga // Scripta Materialia. – 2018. – Vol. 157. – P. 95–99. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2018.08.003.
11. Effect of fracture mode on acoustic emission behavior in the hydrogen embrittled low-alloy steel / E. D. Merson, P. N. Myagkikh, G. V. Klevtsov, D. L. Merson, A. Vinogradov // Engineering Fracture Mechanics. – 2019. – Vol. 210. – P. 342–357. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.05.026.
12. Anand L., Mao Y., Talamini B. L. On modeling fracture of ferritic steels due to hydrogen embrittlement // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2019. – Vol. 122. – P. 280–314. – DOI: 10.1016/j.jmps.2018.09.012.
13. Pradhan A., Vishwakarma M., Dwivedi S. K. A review: The impact of hydrogen embrittlement on the fatigue strength of high strength steel // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 26, part 2. – P. 3015–3019. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.02.627.
14. Tehranchi A., Curtin W. A. Atomistic study of hydrogen embrittlement of grain boundaries in nickel: I. Fracture // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 2017. – Vol. 101. – P. 150–165. – DOI: 10.1016/j.jmps.2017.01.020.
15. Yu H., Cocks A. C. F., Tarleton E. The influence of hydrogen on Lomer junctions // Scripta Materialia. – 2019. – Vol. 166. – P. 173–177. – DOI: 10.1016/j.scriptamat.2019.03.022.
16. Effect of hydrogenation temperature and tensile stress on the parameters of the complete deformation diagram for steel 09G2S / V. I. Mironov, I. G. Emelyanov, D. I. Vichuzhanin, L. M. Zamaraev, D. A. Ogorelkov, V. V. Yakovlev // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – Iss. 1. – P. 24–33. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.1.024-033. – URL: http://dream-journal.org/issues/2020-1/2020-1_279.html
17. A Method for experimental investigation of degradation processes in materials / V. I. Mironov, I. G. Emelyanov, D. I. Vichuzhanin, I. S. Kamantsev, V. V. Yakovlev, D. A. Ogorelkov, L. M. Zamaraev // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2019. – Iss. 2. – P. 16–27. – DOI: 10.17804/2410-9908.2019.2.016-027. – URL: http://dream-journal.org/issues/2019-2/2019-2_246.html

18. Методы расчета оболочек : в 5 т. / отв. ред. А. Н. Гузь. Т. 3 : Шевченко Ю. Н., Прохоренко И. В. Теория упругопластических оболочек при неизотермических процессах нагружения. – Киев : Наукова думка, 1981. – 296 с.
19. Методы расчета оболочек : в 5 т. / отв. ред. А. Н. Гузь. Т. 4 : Григоренко Я. М., Василенко А. Т. Теория оболочек переменной жесткости. – Киев : Наукова думка, 1981. – 544 с.
20. Лыков А. В. Тепломассообмен : справочник. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
21. Араманович И. Г., Левин В. И. Уравнения математической физики. – М. : Наука, 1969. – 288 с.
22. Воробьев А. Х. Диффузионные задачи в химической кинетике : учебное пособие. – М. : МГУ, 2003. – 98 с.
23. Черданцев Ю. П., Чернов И. П., Тюрин Ю. И. Методы исследования систем металл-водород : учебное пособие. – Томск : Изд-во ТПУ, 2008. – 286 с.
24. Галактионова Н. А. Водород в металлах. – М. : Metallurgizdat, 1959. – 255 с.
25. Решение осесимметричной задачи термопластичности для тонкостенных и толстостенных тел вращения на ЕС ЭВМ / Ю. Н. Шевченко, М. Е. Бабешко, В. В. Пискун, И. В. Прохоренко, В. Г. Савченко. – Киев : Наукова думка, 1980. – 196 с.
26. Шевченко Ю. Н. Термопластичность при переменных нагружениях. – Киев : Наукова думка, 1970. – 288 с.
27. Илюшин А. А. Пластичность. Основы общей математической теории. – М. : Изд-во АН СССР, 1963. – 271 с.
28. Емельянов И. Г., Миронов В. И. Термодиффузионная задача наводороживания стальной оболочечной конструкции // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2018. – № 3. – С. 27–35. – DOI: 10.15593/perm.mech/2018.3.03.
29. Emelyanov I. G., Mironov V. I. The method for estimation of shell hydrogenation with variable geometrical and physics-mechanicals parameters // AIP Conference Proceedings. – 2018. – Vol. 2053. – P. 030012. – DOI: 10.1063/1.5084373.
30. Emelyanov I. G., Mironov V. I., Hodak A. S. The boundary value problem of determining hydrogen concentration and the stress state in a titanium shell // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2176. – P. 030005. – DOI: 10.1063/1.5135129.
31. Syrotyuk A. M., Leshchak R. L., Dorosh M. I. Experimental and analytic investigation of the hydrogenation of pipe steels // Materials Science. – 2018. – Vol. 53. – P. 811–817. – DOI: 10.1007/s11003-018-0140-0.
32. Ivanytskyi Ya. L., Hembara O. V., Chepil Ya. O. Determination of the durability of elements of power-generating equipment with regard for the influence of working media // Materials Science. – 2015. – Vol. 51. – P. 104–113. – DOI: 10.1007/s11003-015-9815-y.
33. Сосуды и трубопроводы высокого давления : справочник / Хисматулин Е. Р., Королев Е. М., Лившиц В. И. и др. – М. : Машиностроение, 1990. – 384 с.
34. Писаренко Г. С., Яковлев А. П., Матвеев В. В. Справочник по сопротивлению материалов. – Киев : Наукова думка, 1988. – 736 с.