

О механохимической коррозии трубы с отклонением по толщине под действием внешнего и внутреннего давления

© 2020

Чжао Шисян*, магистрант

Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург (Россия)

*E-mail: zhaoshixiang@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4731-1397>

Аннотация: Работа посвящена компьютерному моделированию внутренней механохимической коррозии линейной части длинных трубопроводов, находящихся под действием внутреннего и внешнего давления агрессивных сред. Полагается, что внешняя граница поперечного сечения трубы является круговой, а ее внутренняя граница – эллиптической. Задача исследуется в двухмерной постановке. Многие решения, касающиеся неравномерного коррозионно-механического износа, основаны на предположениях о сохранении определенной формы корродирующего изделия. Кроме того, аналитическое решение для идеальной трубы дает существенно завышенную долговечность в случае трубы с отклонением по толщине стенки даже в пределах стандартных допусков. Следовательно, хорошим подходом для решения подобных задач труб с дефектами является компьютерное моделирование. В работе проведен численный эксперимент для конкретного примера по изучению влияния отклонения по толщине трубы на ее долговечность при помощи метода конечных элементов (МКЭ) в среде MATLAB. Предложена модель для моделирования коррозионного процесса. Обнаружено, что даже слабое изменение толщины стенки трубы вызывает концентрацию напряжений, при этом наличие механохимической коррозии приводит к еще большей разнотолщинности. Кроме того, к заметному сокращению долговечности трубы приводит как утонение, так и утолщение ее стенки. При этом чем больше разность внутреннего и внешнего давления, тем сильнее проявляется механохимический эффект и тем меньше прогнозируемый срок службы изделия. Наибольший рост абсолютных значений напряжений наблюдается на внутренней поверхности трубы в тех точках, где ее толщина имеет минимальные значения.

Ключевые слова: механохимическая коррозия; конечно-элементный анализ; прочность; трубопровод; овальность трубы; отклонение по толщине.

Благодарности: Статья подготовлена по материалам докладов участников IX Международной школы «Физическое материаловедение» (ШФМ-2019) с элементами научной школы для молодежи, Тольятти, 9–13 сентября 2019 года.

Для цитирования: Чжао Ш. О механохимической коррозии трубы с отклонением по толщине под действием внешнего и внутреннего давления // Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2020. № 1. С. 86–91. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-1-86-91.

ВВЕДЕНИЕ

Механохимическая коррозия протекает при совместном воздействии на металл агрессивной среды и механических напряжений. Совместное действие химических полей и механической нагрузки сильнее, чем сумма их воздействий по отдельности [1–3]. Коррозионный процесс – гетерогенный (неоднородный), протекает на границе раздела металл – агрессивная среда, имеет сложный механизм. В большинстве случаев коррозия металлов происходит неравномерно по поверхности, имеются участки, на которых возникают локальные поражения. Коррозия металла снижает механическую прочность и меняет другие его свойства. Общая коррозия подразделяется на равномерную, неравномерную и избирательную. Равномерная коррозия протекает с одинаковой скоростью по всей поверхности металла; неравномерная – с неодинаковой скоростью на различных участках поверхности металла. При избирательной коррозии разрушаются отдельные компоненты сплава.

Большинство работ по расчету прочности элементов конструкций, эксплуатируемых в условиях коррозии под напряжением, посвящены равномерному износу [4–6]. Для равномерной коррозии элементов трубопроводов получен ряд аналитических решений [6–9]. Нерав-

номерный износ изучался в [10–12] с использованием анализа возмущений, вариационных методов и различных численных методов.

Многие решения, касающиеся неравномерного коррозионно-механического износа, основаны на предположениях о сохранении определенной формы корродирующего изделия [13–15], поэтому мало пригодны для нахождения точной конфигурации растворяемой поверхности. Следовательно, изучение возможности моделирования эволюции корродирующей поверхности без предвзятых предположений достаточно актуально.

Как известно, на практике трубы несколько отличаются по форме от идеального круглого цилиндра. Толщина стенки трубы не всегда постоянна не только по длине, но и в поперечном сечении. В частности, может наблюдаться овальность ее внутренней поверхности, в то время как внешняя поверхность остается почти круговой. В соответствии с известной моделью В. Долинского, скорость общей коррозии является линейной функцией от максимального по абсолютной величине нормального напряжения в соответствующих точках корродирующей поверхности. Задачи о коррозии под напряжением могут рассматриваться как начальные краевые задачи с неизвестными переменными границами. Поскольку структурная неустойчивость рассматриваемых

задач может вызвать расхождение применяемых численных процедур, для верификации результатов расчетов необходимо было использовать аналитическое решение для идеальной толстостенной трубы (т. е. без локальных утонений) под действием давления, полученное Ю. Прониной [16]. Однако упомянутое аналитическое решение для идеальной трубы дает существенно завышенную долговечность, если труба имеет отклонение по толщине стенки даже в пределах стандартных допусков.

Цель работы – исследование изменения напряженно-состояния толстостенной трубы с начальной овальностью ее внутренней поверхности в процессе внутренней механохимической коррозии под действием внутреннего и внешнего давления на основе модели коррозионной кинетики В. Долинского.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ

Существуют различные математические модели коррозионной кинетики. В модели Долинского используется линейная зависимость скорости $v(s,t)$ механохимической коррозии от эффективного напряжения σ [17], имеющая вид

$$v(s,t) = \frac{d\delta(s,t)}{dt} = a + m \cdot \sigma(s,t). \quad (1)$$

где a – скорость коррозии ненапряженного материала; m – постоянная, учитывающая влияние напряжений; s – координата поверхности; $d\delta(s,t)$ – приращение глубины коррозионного растворения (в течение временного интервала dt) в точке s в направлении нормали к контуру.

На основе выражения для удельной энергии деформации и ее непосредственной связи с химическим потенциалом была предложена квадратичная зависимость скорости химических реакций от квадратов компонент деформации, а следовательно, и напряжений [2, 5]. Квадратичная зависимость скорости коррозии от напряжения рассматривалась и в работе [4], где она, наряду с кубической зависимостью, вводилась как приближение экспоненциальной зависимости Гутмана – Зайнуллина [1] при разложении ее в ряд Тейлора по степеням напряжений.

МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Постановленная задача является начальной краевой задачей с неизвестными переменными границами. Решение задачи проводится в конечно-элементном пакете в среде MATLAB. Тонкость реализации алгоритмов в MATLAB и некоторые проблемы, возникающие при изучении подобных задач, изложены в работах [18–20].

Задача исследуется в двухмерной постановке. Согласно [21], в качестве эффективного напряжения в уравнении (1) выбрано максимальное по абсолютной величине главное напряжение. Вследствие симметрии задачи, включая симметрию геометрии и граничных условий, рассматривается только половина поперечного сечения трубы, разбиение которой на конечные элементы представлено на рис. 1. Численные эксперименты показали, что использование в качестве расчетной модели четверти поперечного сечения трубы при

водит к недостаточно точным результатам. С учетом коррозии задача с изменяющейся геометрией является эволюционной. Для данного типа задачи необходимо ввести параметр dt , играющий роль шага по времени. На каждом новом шаге по времени каждый узел на контуре, соответствующем внутренней корродирующей поверхности, перемещается на расстояние, определяемое по формуле

$$d\delta(s,t) = v(s,t) \cdot dt = (a + m \cdot \sigma(s,t)) \cdot dt \quad (2)$$

по направлению внутренней нормали к контуру в данной точке. Поскольку при расчетах контур аппроксимируется ломаной, направление нормали в каждом узле можно определять как направление биссектрисы между двумя соответствующими элементами данной ломаной.

В результате алгоритм решения задачи можно сформулировать следующим образом.

(I) В начальный момент времени $t = 0$ внутренний контур поперечного сечения имеет эллиптическую форму с известными полуосями A и B ($A > B$), внешний контур является круговым с известным радиусом R . Заданы нормальные давления Pr и PR , действующие на внутренней и внешней поверхностях соответственно.

(II) Главные напряжения на внутренней поверхности поперечного сечения трубы в текущий момент времени находятся с помощью метода конечных элементов.

(III) При заданном шаге по времени dt смещения узлов внутреннего контура (а значит, и его новая форма) определяются по формуле (2); давления Pr и PR остаются неизменными.

Далее шаги (II) и (III) повторяются циклически до наступления предельного состояния (достижения предела прочности). Шаг по времени dt берется постоянным и определяется из численных экспериментов и проверки внутренней сходимости.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве примера была рассмотрена высокопрочная толстостенная труба с допустимой овальностью при следующих значениях входных параметров (рис. 1):

$$R = 120 [l_c], A = 101 [l_c], B = 100 [l_c], a = 0,1 [l_c/t_c],$$

$$m = -a/200 [l_c/(t_c \cdot p_c)],$$

$$PR = 80 [p_c], Pr = 40 [p_c],$$

где $[l_c]$, $[t_c]$ и $[p_c]$ – определенные единицы измерения длины, времени и напряжения.

На рис. 2 представлен график изменения со временем абсолютного значения окружных напряжений (сжимающих) в разных узлах внутренней поверхности трубы. Узел 1 на внутренней поверхности трубы соответствует месту наибольшей толщины трубы (у полуоси B), а узел 101 – наименьшей (у вершины эллипса A). Можно заметить, что поведение напряжений в разных точках сечения (Nodes 1, 50, 75, 101) различно: наблюдается как рост, так и снижение напряжений. В начальные моменты рост напряжений происходит на всей внутренней поверхности. Однако через некоторое время напряжение в узле 1 снижается, затем снижается и напряжение в точках вблизи узла 1. Область снижения напряжений расширяется со временем, но для рассматриваемого случая в узле 101 напряжение всегда увеличивается.

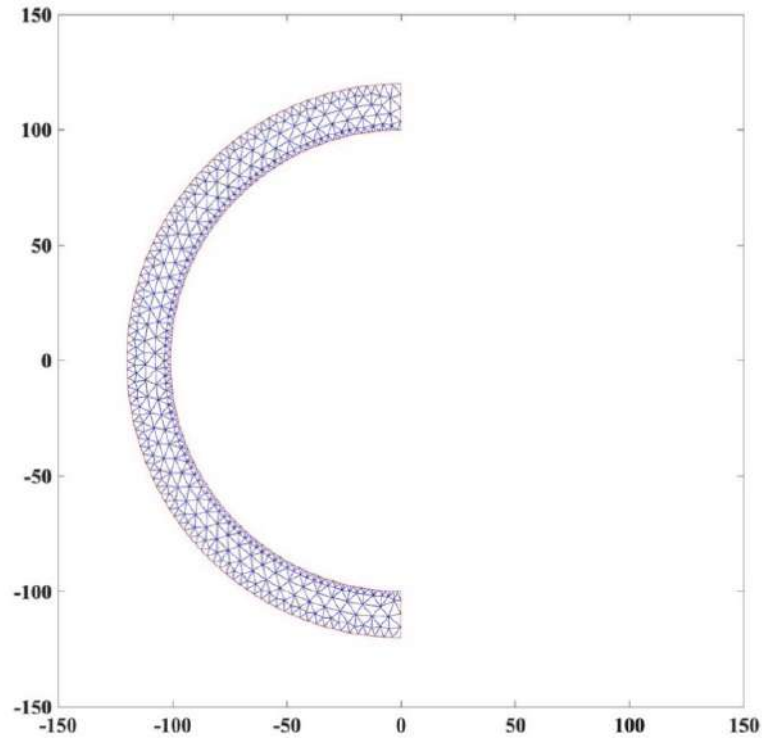


Рис. 1. Конечно-элементное разбиение сечения трубы
Fig. 1. Finite-element division of pipe section

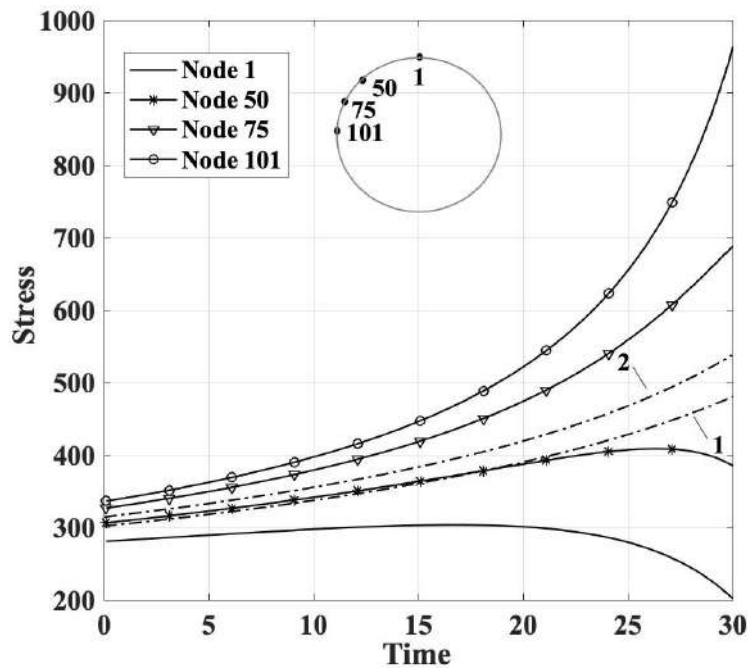


Рис. 2. Изменение напряжений в разных узлах внутренней поверхности трубы.
Nodes 1, 101 расположены на полуосях B и A соответственно
Fig. 2. Stress changes in various nodes of inner pipe surface.
Nodes 1, 101 lie on B and A semi-axes respectively

Трубу с овальностью внутренней поверхности можно рассматривать как трубу, полученную путем утонения стенки идеально ровной трубы, толщина которой равна максимальной толщине трубы с овальностью, или же как трубу, полученную путем утолщения трубы, толщина которой равна минимальной толщине трубы с овальностью. Пунктирные линии на рис. 2 показывают рост напряжений для труб без овальности с внутренним радиусом $r = 100 [l_c]$ (линия 1) и $101 [l_c]$ (линия 2) при прочих равных параметрах. Как видно, рост напряжений в окрестности вершин эллипса существенно превосходит рост напряжений в идеальных трубах, толщина которых равна как минимальной, так и максимальной толщине дефектной трубы.

На рис. 3 показана геометрия половины поперечного сечения трубы в начальный момент времени (объединение серой и белой полукольцевых областей, обведенное сплошной жирной линией), и в момент времени $t=30 [t_c]$ (серая область с конечно-элементной сеткой). Стрелки указывают направление эволюции внутреннего контура сечения.

За указанный период растворение материала в окрестности левой вершины контура (Node 101 из рис. 2) произошло на глубину $10,4 [l_c]$, а в окрестности верхней (Node 1) и нижней точек – на глубину $7,28 [l_c]$. Разные значения глубины растворения материала в различных узлах объясняются эффектом концентрации напряжений в окрестности левой вершины, вызванным начальным утонением стенки трубы. При этом утонение усиливается под влиянием механохимической коррозии.

В задачах о механохимической коррозии может наблюдаться так называемая структурная неустойчивость,

когда слабое изменение начальных данных вызывает качественно иное поведение системы. Например, в зависимости от соотношения параметров a , m и значения давления поведение решения может быть разным. В случае сильного механохимического эффекта отношение A/B увеличивается со временем, в противном случае A/B уменьшается, т. е. контур корродирующей поверхности скругляется.

Подобная задача для бесконечной пластины с эллиптическим отверстием под действием всестороннего растяжения исследована в работе [22], где была выведена приближенная аналитическая формула, предсказывающая характер эволюции контура отверстия в зависимости от соотношения параметров a , m и растягивающей силы. В рассмотренном выше примере значение A/B со временем заметно увеличивается ввиду высокого уровня напряжений уже на начальном этапе. Однако при малых давлениях и прочих равных параметрах A/B может оставаться почти неизменным или даже падать.

ВЫВОДЫ

Из анализа результатов расчетов следует, что не только утонение, но и утолщение стенки трубы в допустимых пределах может привести к существенному росту максимальных напряжений в неидеальных трубах по сравнению с напряжениями в круговых концентрических (идеальных) трубах. При этом вследствие зависимости скорости коррозии от напряжений ускоряется утонение стенки трубы, особенно на наиболее напряженных

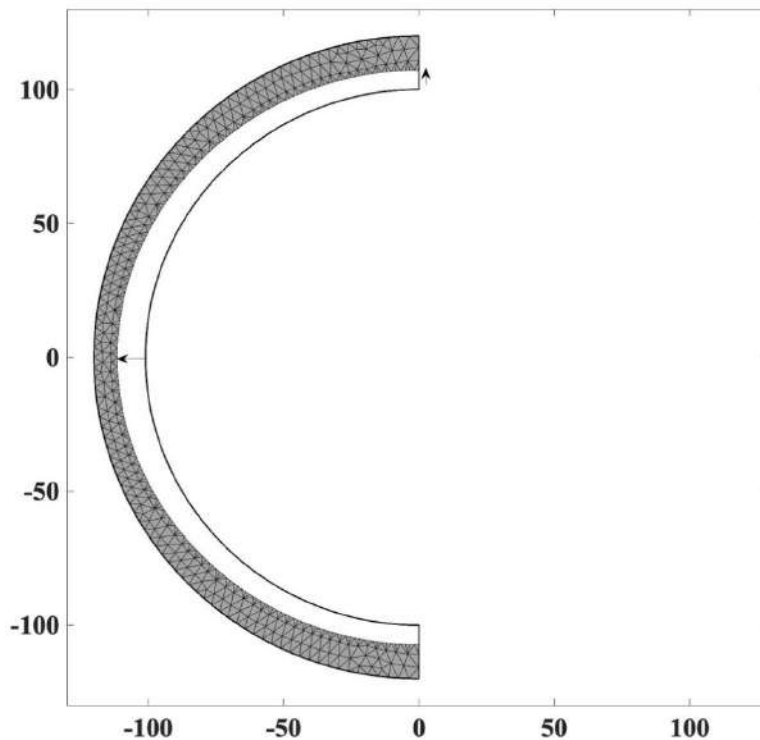


Рис. 3. Геометрия половины поперечного сечения трубы в начальный момент времени и в момент $t=30 [t_c]$
 Fig. 3. The geometry of a pipe half cross-section at the initial time and the moment $t=30 [t_c]$

участках. Таким образом, срок службы труб с дефектами геометрии резко сокращается. Поэтому аналитические решения для идеальных труб дают большую погрешность для труб с дефектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gutman E.M. *Mechanochemistry of Solid Surfaces*. Singapore: World Scientific, 1994. 332 p.
- Русанов А.И. Термодинамические основы механохимии. СПб.: Наука, 2006. 221 с.
- Rusanov A.I. Thermodynamic aspects of materials science // *Russian Chemical Reviews*. 2016. Vol. 85. № 1. P. 1–13.
- Elishakoff I., Ghyselinck G., Miglis Y. Durability of an Elastic Bar Under Tension With Linear or Nonlinear Relationship Between Corrosion Rate and Stress // *Journal of Applied Mechanics*. 2012. Vol. 79. № 2. P. 021013.
- Gutman E., Bergman R., Levitsky S. Influence of internal uniform corrosion on stability loss of a thin-walled spherical shell subjected to external pressure // *Corrosion Science*. 2016. Vol. 111. P. 212–215.
- Fridman M.M., Elishakoff I. Design of bars in tension or compression exposed to a corrosive environment // *Ocean Systems Engineering*. 2015. Vol. 5. № 1. P. 21–30.
- Pronina Y. Design of pressurised pipes subjected to mechanochemical corrosion // *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. London: CRC Press, 2019. P. 644–649.
- Pronina Y., Sedova O., Grekov M., Sergeeva T. On corrosion of a thin-walled spherical vessel under pressure // *International Journal of Engineering Science*. 2018. Vol. 130. P. 115–128.
- Sedova O.S., Pronina Y.G., Kuchin, N.L. A thin-walled pressurized sphere exposed to external general corrosion and nonuniform heating // *AIP Conference Proceedings*. 2018. Vol. 1959. P. 070032. DOI: 10.1063/1.5034707.
- Prevost J. H., Baker T. J., Liang J., Suo Z. A finite element method for stress-assisted surface reaction and delayed fracture // *International Journal of Solids and Structures*. 2001. Vol. 38. № 30–31. P. 5185–5203.
- Tang Z., Li Q. Advances in research of stress-assisted corrosion fatigue problem // *Journal of Zhejiang University-Science A*. 2007. Vol. 8. № 2. P. 221–227.
- Awrejcewicz J., Krysko A.V., Krylova E.Y., Yaroshenko T.Y., Zhigalov M.V., Krysko V.A. Analysis of flexible elastic-plastic plates/shells behaviour under coupled mechanical/thermal fields and one-sided corrosion wear // *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2020. Vol. 118. P. 103302. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2019.103302.
- Charles R.J., Hillig W.B. The kinetics of glass failure by stress corrosion // *Symposium on Mechanical Strength of Glass and Ways of Improving it*. Charleroi: Union Scientifique Continentale du Verre, 1961. P. 511–527.
- Miglis Y., Elishakoff I., Presuel-Moreno F. Analysis of a cracked bar under a tensile load in a corrosive environment // *Ocean Systems Engineering*. 2013. Vol. 3. № 1. P. 001–008.
- Pronina Y.G., Khryashchev S.M. Mechanochemical growth of an elliptical hole under normal pressure // *Materials Physics and Mechanics*. 2017. Vol. 31. № 1–2. P. 52–55.
- Stareva I., Pronina Y. Modelling the general corrosion of a steel tube under its own weight // *Procedia Structural Integrity*. 2017. Vol. 6. P. 48–55.
- Долинский В.М. Расчет нагруженных труб, подверженных коррозии // *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1967. № 2. С. 9–10.
- Zhao S., Pronina Y. On the MATLAB finite element modelling of an elastic plane with a hole under tension // *2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov)*, CNSA 2017 – Proceedings. St. Petersburg, 2017. P. 7974036. DOI: 10.1109/CNSA.2017.7974036.
- Zhao S., Pronina Y. On the stress state of a pressurised pipe with an initial thickness variation, subjected to non-homogeneous internal corrosion // *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 121. P. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/201912101013.
- Чжао Ш. Алгоритм расчета напряженного состояния пластинки с эллиптическим отверстием в MATLAB // *Процессы управления и устойчивость*. 2017. Т. 4. № 1. С. 251–255.
- Павлов П.А., Кадырбеков Б.А., Колесников В.А. Прочность сталей в коррозионных средах. Алма-Ата: Наука, 1987. 272 с.
- Pronina Y.G. An analytical solution for the mechanochemical growth of an elliptical hole in an elastic plane under a uniform remote load // *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2017. Vol. 61. P. 357–363.

REFERENCES

- Gutman E.M. *Mechanochemistry of Solid Surfaces*. Singapore, World Scientific, 1994. 332 p.
- Rusanov A.I. *Termodinamicheskie osnovy mekhanokhimii* [Thermodynamic foundations of mechanochemistry]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2006. 221 p.
- Rusanov A.I. Thermodynamic aspects of materials science. *Russian Chemical Reviews*, 2016, vol. 85, no. 1, pp. 1–13.
- Elishakoff I., Ghyselinck G., Miglis Y. Durability of an Elastic Bar Under Tension With Linear or Nonlinear Relationship Between Corrosion Rate and Stress. *Journal of Applied Mechanics*, 2012, vol. 79, no. 2, pp. 021013.
- Gutman E., Bergman R., Levitsky S. Influence of internal uniform corrosion on stability loss of a thin-walled spherical shell subjected to external pressure. *Corrosion Science*, 2016, vol. 111, pp. 212–215.
- Fridman M.M., Elishakoff I. Design of bars in tension or compression exposed to a corrosive environment. *Ocean Systems Engineering*, 2015, vol. 5, no. 1, pp. 21–30.
- Pronina Y. Design of pressurised pipes subjected to mechanochemical corrosion. *Advances in Engineering Materials, Structures and Systems: Innovations, Mechanics and Applications*. London, CRC Press, 2019, pp. 644–649.
- Pronina Y., Sedova O., Grekov M., Sergeeva T. On corrosion of a thin-walled spherical vessel under pressure. *International Journal of Engineering Science*, 2018, vol. 130, pp. 115–128.
- Sedova O.S., Pronina Y.G., Kuchin, N.L. A thin-walled pressurized sphere exposed to external general corrosion

- and nonuniform heating. *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1959, p. 070032. DOI: 10.1063/1.5034707.
10. Prevost J. H., Baker T. J., Liang J., Suo Z. A finite element method for stress-assisted surface reaction and delayed fracture. *International Journal of Solids and Structures*, 2001, vol. 38, no. 30–31, pp. 5185–5203.
 11. Tang Z., Li Q. Advances in research of stress-assisted corrosion fatigue problem. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 2007, vol. 8, no. 2, pp. 221–227.
 12. Awrejcewicz J., Krysko A.V., Krylova E.Y., Yaroshenko T.Y., Zhigalov M.V., Krysko V.A. Analysis of flexible elastic-plastic plates/shells behaviour under coupled mechanical/thermal fields and one-sided corrosion wear. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2020, vol. 118, p. 103302. DOI: 10.1016/j.ijnonlinmec.2019.103302.
 13. Charles R.J., Hillig W.B. The kinetics of glass failure by stress corrosion. *Symposium on Mechanical Strength of Glass and Ways of Improving it*. Charleroi, Union Scientifique Continentale du Verre, 1961, pp. 511–527.
 14. Miglis Y., Elishakoff I., Presuel-Moreno F. Analysis of a cracked bar under a tensile load in a corrosive environment. *Ocean Systems Engineering*, 2013, vol. 3, no. 1, pp. 001–008.
 15. Pronina Y.G., Khryashchev S.M. Mechanochemical growth of an elliptical hole under normal pressure. *Materials Physics and Mechanics*, 2017, vol. 31, no. 1–2, pp. 52–55.
 16. Stareva I., Pronina Y. Modelling the general corrosion of a steel tube under its own weight. *Procedia Structural Integrity*, 2017, vol. 6, pp. 48–55.
 17. Dolindky V.M. Calculation of loaded pipes subject to corrosion. *Khimicheskoe i neftekhimicheskoe mashinostroyeniye*, 1967, no. 2, pp. 9–10.
 18. Zhao S., Pronina Y. On the MATLAB finite element modelling of an elastic plane with a hole under tension. *2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics (Dedicated to the Memory of V.F. Demyanov), CNSA 2017 – Proceedings*. St. Petersburg, 2017, p. 7974036. DOI: 10.1109/CNSA.2017.7974036.
 19. Zhao S., Pronina Y. On the stress state of a pressurised pipe with an initial thickness variation, subjected to non-homogeneous internal corrosion. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 121, p. 01013. DOI: 10.1051/e3sconf/201912101013.
 20. Zhao Sh. Algorithm for calculating the stress state of a plate with an elliptical hole in MATLAB. *Protsessy upravleniya i ustoychivost*, 2017, vol. 4, no. 1, pp. 251–255.
 21. Pavlov P.A., Kadyrbekov B.A., Kolesnikov V.A. *Prochnost staley v korrozionnykh sredakh* [Strength of steels in corrosive environments]. Alma-Ata, Nauka Publ., 1987. 272 p.
 22. Pronina Y.G. An analytical solution for the mechanochemical growth of an elliptical hole in an elastic plane under a uniform remote load. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 2017, vol. 61, pp. 357–363.

On the mechanochemical corrosion of a pipe with a thickness deviation under the action of external and internal pressure

© 2020

*Shixiang Zhao**, graduate student

St. Petersburg University, St. Petersburg (Russia)

*E-mail: zhaoshixiang@yandex.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4731-1397>

Abstract: The paper deals with the computer modeling of internal mechanochemical corrosion of a long pipe line section under the internal and external corrosion pressure. The outer boundary of the pipe cross-section is circular, while the inner surface is elliptical. The author studied the task in a two-dimensional installation. Many decisions related to the irregular mechanochemical wear are based on the hypothesis suppositions about the retention of a definite shape of a corroding product. However, mentioned analytical solution gives a significantly overestimated lifetime if the pipe has the initial deviation in the wall thickness even within the permissible tolerance. In this way, computer modeling is a good approach to solve such problems of defective pipes. Using the finite elements technique (FET) in MATLAB environment, the author carried out the numerical experiment for a certain example for studying the influence of pipe thickness deviation on its service life. The study showed that even a slight thickness deviation of a pipe wall causes the stress concentration and the existence of the mechanochemical corrosion causes larger variation in thickness. Moreover, both thinning and thickening of the pipe wall lead to a reduction in its durability. In this way, the more the internal and external pressure difference, the stronger the mechanochemical effect and the shorter the service life of a pipe. The greatest increase in the absolute values of stresses is observed at the vertices of the inner elliptical boundary of a pipe where its thickness has minimum values.

Keywords: mechanochemical corrosion; finite element analysis; strength; pipeline; pipe out-of-roundness; thickness deviation.

Acknowledgements: The paper was written on the reports of the participants of the IX International School of Physical Materials Science (SPM-2019) with elements of a scientific school for young adults, Togliatti, September 9–13, 2019.

For citation: Zhao Sh. On the mechanochemical corrosion of a pipe with a thickness deviation under the action of external and internal pressure. *Vektor nauki Tolyatinskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2020, no. 1, pp. 86–91. DOI: 10.18323/2073-5073-2020-1-86-91.