

УДК 539.3

АНАЛИЗ РОСТА ТРЕЩИНЫ В СТЕНКЕ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРНОЙ КАМЕРЫ

П. П. Гонтаровский,

канд. техн. наук

gontarpp@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8503-0959

Н. В. Сметанкина,

д-р техн. наук

nsmetankina@ukr.net

ORCID: 0000-0001-9528-3741

Н. Г. Гармаш, канд. техн. наук

garm.nataly@gmail.com

ORCID: 0000-0002-4890-8152

И. И. Мележик,

канд. техн. наук

melezhyk81@gmail.com

ORCID: 0000-0002-8968-5581

Институт проблем

машиностроения

им. А. Н. Подгорного

НАН Украины,

61046, Украина, г. Харьков,

ул. Пожарского, 2/10

Электролизерные установки имеют широкое применение в различных отраслях промышленности. Они представляют собой емкости высокого давления и камеру с помещенными в нее электродами, которые скомпонованы в пакеты, и имеют крышку, а также подводящий и отводящий патрубки. К их техническим характеристикам предъявляются высокие требования, подтверждающие актуальность проблемы усовершенствования методов исследований. Для моделирования кинетики термонапряженного состояния в элементах энергоустановок со сложными реологическими характеристиками материала и с учетом его повреждаемости на базе метода конечных элементов разработана специальная методика и программный комплекс, позволяющие в трехмерной постановке решать широкий класс нелинейных нестационарных задач с одновременным учетом всех действующих факторов. Исследования кинетики трещины выполнены с использованием методики расчетной оценки живучести элементов конструкций, которая базируется на принципах механики хрупкого разрушения. При этом зона пластичности в вершине трещины принимается малой по сравнению с ее размерами, а кинетика трещины определяется коэффициентами интенсивности напряжений в ее вершинах. Методика основывается на расчетах кинетики трещины до критических размеров, когда происходит лавиноподобное разрушение элемента конструкции или трещина прорастает насквозь по толщине элемента. Кинетика полуэллиптической трещины, выходящей на внутреннюю поверхность стенки электролизерной камеры, исследовалась под действием статического и циклического нагружений. С использованием разработанной методики выполнены расчетные исследования термонапряженного состояния верхней части электролизерной ячейки. Полученные результаты показывают, что цилиндрическая часть внутренней поверхностной полуэллиптической трещины, которая зародилась в этой зоне. Установлено, что при малом количестве циклов за год трещина будет долго подрастать до определенной глубины, далее скорость ее роста от статического нагружения увеличится так быстро, что ростом трещины от циклического нагружения можно будет пренебречь.

Ключевые слова: электролизер, наводораживание, напряженно-деформированное состояние, среда, трещина.

Введение

Электролизерные установки и водород, получаемый с их помощью, в настоящее время имеют широкое применение в различных отраслях промышленности. Электролизеры, как правило, изготавливаются в виде емкостей высокого давления с электролизерной камерой и помещенными в нее электродами. Электроды скомпонованы в пакеты, в которых активные и пассивные электроды размещены поочередно и жестко установлены в токоподводах, при этом пассивные электроды соединены с корпусом, а активные – с тоководом. Конструкция также включает в себя крышку, подводящий и отводящий патрубки [1].

Анализ зарождения усталостных трещин и их рост в результате водородного охрупчивания конструкционных материалов при контакте с водородсодержащей средой рассматривается в работах [2–7].

Высокие требования к техническим характеристикам таких конструкций подтверждают актуальность проблемы усовершенствования методов их расчетов. Достоверная оценка работоспособности конструкций, находящихся в условиях термосилового нагружения, возможна с помощью численного моделирования изменения их напряженно-деформированного состояния с одновременным учетом всех действующих факторов.

Постановка задачи

Для моделирования кинетики термонапряженного состояния в элементах энергоустановок со сложными реологическими характеристиками материала и с учетом его повреждаемости на базе ме-

Статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Международная.

© П. П. Гонтаровский, Н. В. Сметанкина, Н. Г. Гармаш, И. И. Мележик, 2020

тода конечных элементов (МКЭ) разработана специальная методика и программный комплекс, которые позволяют в трехмерной постановке решать широкий класс нелинейных нестационарных задач при относительно невысоких вычислительных затратах [8, 9].

При разработке расчетных схем система задания исходных данных основывается на топологически регулярной декомпозиции тела на макроэлементы в виде произвольных шестигранников, геометрия и внешние воздействия на которые могут задаваться в разных системах координат (декартовых, цилиндрических, сферических, тороидальных), произвольно ориентированных по отношению к глобальной декартовой системе координат. Дискретизация шестигранников на простейшие конечные элементы по заданной информации проводится программой автоматически.

Свойства материалов, из которых состоит конструкция, могут зависеть от температуры и задаются в виде таблиц для ее фиксированных значений. Для других значений температуры они определяются с помощью линейной или квадратической интерполяции.

Задается произвольное количество типов граничных условий, распределенных на гранях макроэлементов. Для каждой грани подобласти указывается номер граничных условий. Компоненты граничных условий могут изменяться по координатам и во времени и задаваться с помощью специальных функций для фиксированных моментов времени. Для задачи теплопроводности могут быть заданы граничные условия 2-го или 3-го рода, а также теплообмен излучением. Для задачи механики задаются компоненты напряжений или перемещений в глобальной или местной системах координат. Могут быть заданы объемные источники и стоки тепла, а также разные виды нагружения. Начальные условия могут быть заданы постоянными величинами или получены путем решения стационарной задачи при заданных граничных условиях.

Методика решения

Начально-краевая задача решается методом шагов по времени. При этом используются явные и неявные конечно-разностные схемы с автоматизированным выбором шагов. На каждом шаге допускается итерационный процесс для определения параметров линеаризованных задач. Для вычисления теплофизических свойств материала допускается прогноз температуры, позволяющий экономить одну итерацию.

Для решения осесимметричной нестационарной задачи теплопроводности в цилиндрической системе координат используется функционал [8]

$$I = \frac{1}{2} \iint_S \left[k_r \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 + k_{rz} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + 2QT - 2\rho c \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot T \right] r dS - \int_{L_q} q T r dL + \int_{L_\alpha} \alpha \cdot \left(\frac{T}{2} - T_\infty \right) T r dL,$$

где $k_r(T)$, $k_z(T)$, $k_{rz}(T)$ – коэффициенты теплопроводности; $Q(r, z, t)$ – интенсивность внутренних источников тепла; $\rho c(T)$ – удельная объемная теплоемкость материала; q – интенсивность теплового потока через границу L_q ; α, T_∞ – коэффициент теплоотдачи и температура среды на границе L_α .

При этом используется неявная схема Кренка-Николсона [8]

$$\frac{\partial T(t + \Delta t)}{\partial t} = (T(t + \Delta t) - T(t)) \cdot \frac{2}{\Delta t} - \frac{\partial T(t)}{\partial t}.$$

Для формулировки задачи механики используется инкрементальный вариант вариационного принципа Лагранжа с модифицированными тензорами напряжений Кирхгофа и деформаций Грина, для которого вариация соответствующего функционала имеет вид [8]

$$\iiint_V [(\sigma_{ij} + \Delta\sigma_{ij}) \delta e_{ij} - (F_i + \Delta F_i) \delta \Delta u_i] dV - \iint_S (P_i + \Delta P_i) \delta u_i dS = 0, \quad (1)$$

где σ_{ij} – тензор напряжений Эйлера, определенный в начальной системе координат в начале шага, находящийся в равновесии с приложенными массовыми F_i и поверхностными P_i усилиями, отнесенными к единичному объему V ; ΔF_i , ΔP_i – приращение усилий, которые вызывают деформацию тела и появление приращения перемещений Δu_i , деформаций Δe_{ij} и напряжений $\Delta\sigma_{ij}$.

Линеаризуя уравнение (1) и зависимости физического закона

$$\Delta\sigma_{ij} = C_{ijkl} \Delta\epsilon_{kl} + \sigma_{ij}^0,$$

где $\Delta \epsilon_{kl}$ – тензор приращения полных деформаций, определенный из зависимостей Коши; C_{ijkl} – тензор упругости материала; σ_{ij}^0 – напряжение в начале шага.

Затем, применяя обычную процедуру МКЭ, получим линейную систему разрешающих уравнений для конечного элемента.

Тензор приращения полных деформаций $\Delta \epsilon_{ij}$ представляется как сумма упругой $\Delta \epsilon_{ij}^e$ и температурной $\Delta \epsilon_{ij}^T$ компонент

$$\Delta \epsilon_{ij} = \Delta \epsilon_{ij}^e + \Delta \epsilon_{ij}^T.$$

Приращение упругих деформаций определяется законом Гука

$$\Delta \epsilon_{ij}^e = A_{ijkl} \Delta \epsilon_{kl} + \Delta A_{ijkl} \epsilon_{kl},$$

где A_{ijkl} – тензор упругой податливости материала при температуре в конце шага; ΔA_{ijkl} – тензор приращения упругой податливости материала за шаг за счет изменения температуры.

Приращение температурных деформаций определяется соотношением

$$\Delta \epsilon_{ij}^T = \alpha_i^{(2)} T^{(2)} - \alpha_i^{(1)} T^{(1)}, \quad \Delta \epsilon_{ij}^T = 0, \quad i \neq j,$$

где α_i – коэффициенты линейного температурного расширения материала. Цифрами 1 и 2 обозначены величины в начале и в конце шага.

Система линейных уравнений МКЭ решается методом квадратного корня с учетом переменной ширины полуленты, а коэффициенты системы уравнений вычисляются при помощи двухузловых квадратур Гаусса.

Использование модифицированных тензоров деформаций и напряжений позволяет применять традиционные теории пластичности и ползучести, поскольку в этом случае условия несжимаемости материала будут приближенно выполнены. При решении задач для больших перемещений, но малых деформаций алгоритм значительно упрощается.

В зависимости от сложности геометрии конструкции для моделирования ее термонапряженного состояния возможно применение плоских, осесимметричных и трехмерных моделей. В данной работе использовалась осесимметричная расчетная схема верхней части крышки (крышки) электролизерной ячейки.

Численные результаты

С использованием разработанной методики выполнены расчетные исследования термонапряженного состояния верхней части (крышки) электролизерной ячейки. Цилиндрическая часть электролизерной ячейки находится под внутренним давлением $P = 15$ МПа и имеет объем 40 л, толщина ее стенки $h = 7$ мм. Расчетная схема симметричной части крышки с конечноэлементной дискретизацией приведена на рис. 1.

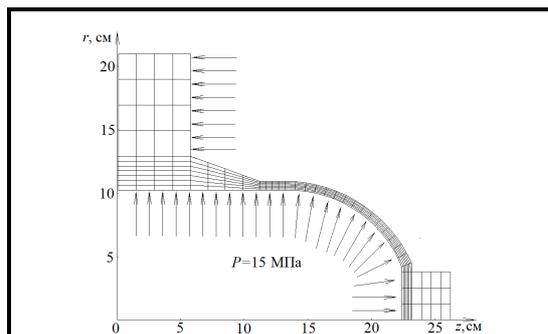


Рис. 1. Расчетная схема симметричной части крышки с конечноэлементной дискретизацией

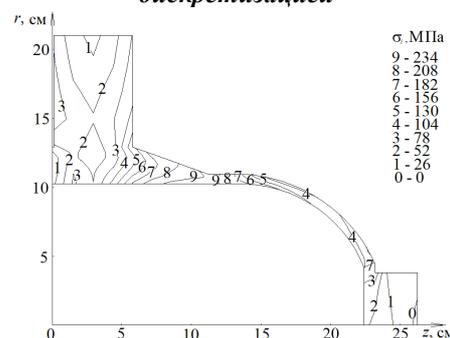


Рис. 2. Распределение интенсивности напряжений σ_x

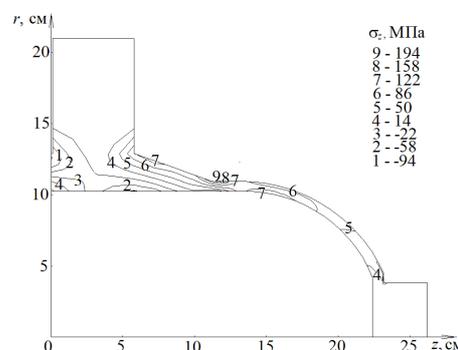


Рис. 3. Распределение осевых напряжений σ_z

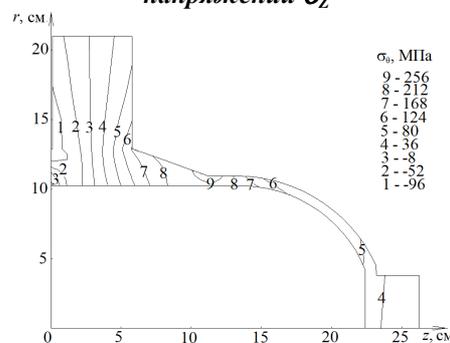


Рис. 4. Распределение окружных напряжений σ_θ

На рис. 2–4 показаны распределения интенсивности напряжений, осевых и окружных напряжений соответственно. Полученные результаты показывают, что цилиндрическая часть крышки является наиболее нагруженной. Далее выполним исследование развития внутренней поверхностной полуэллиптической трещины, которая зародилась в этой зоне. Так как окружные напряжения σ_θ значительно превышают осевые σ_z , меридиональная трещина более опасна, нежели кольцевая.

На рис. 5 приведено сечение элемента конструкции с поверхностной полуэллиптической трещиной глубиной l и шириной c . Расчетная область принимается в виде четырехугольника шириной b и толщиной h . Нагружение задается произвольной эпюрой напряжений вдоль глубины трещины l .

Исследования кинетики трещины выполняем с использованием методики расчетной оценки живучести элементов конструкций [8, 10]. Методика базируется на принципах механики хрупкого разрушения, при этом зона пластичности в вершине трещины принимается малой в сравнении с размерами трещины, а за кинетику трещины отвечают коэффициенты интенсивности напряжений (КИН) в ее вершинах.

Для вычисления КИН используется интерполяционный метод [11, 12], который позволяет найти локальные характеристики в вершине трещины по распределению напряжений в теле без трещины.

Скорость роста трещины под действием циклического нагружения вычисляется в m -й вершине трещины по формуле Периса

$$V_N^m = \frac{dl}{dN} = C_N (\Delta K_I^m)^{n_N}, \quad (2)$$

где ΔK_I^m – максимальный размах КИН в цикле; C_N , n_N – физические константы материала, определяемые экспериментально

$$\Delta K_I^m = K_{I\max}^m - K_{I\min}^m,$$

где $K_{I\max}^m$, $K_{I\min}^m$ – максимальное и минимальное значение КИН нормального отрыва в цикле, вычисленные в m -й вершине трещины.

Расчет кинетики трещины выполняется шаговым методом интегрирования Эйлера с автоматическим выбором шага.

Время живучести конструкции определяется как минимальное время, при котором размах КИН достигнет своего критического значения вязкости разрушения при циклическом нагружении, отвечающее началу лавинообразного разрушения конструкции. При этом размеры трещины принимаются критическими $l_{кр}$ и (или) $c_{кр}$.

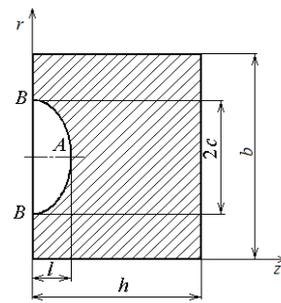


Рис. 5. Сечение тела в плоскости полуэллиптической поверхностной трещины

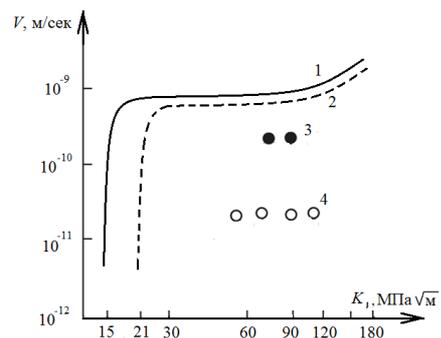


Рис. 6. Зависимость скорости подрастания трещины от КИН при статическом нагружении стали:

1 – при условии электролитического наводораживания с плотностью тока 1 А/дм²; 2 – при условии электролитического наводораживания с плотностью тока 0,1 А/дм²; 3 – в газообразном водороде влажностью 90 %; 4 – в газообразном водороде влажностью 15 %, $T=20^\circ\text{C}$

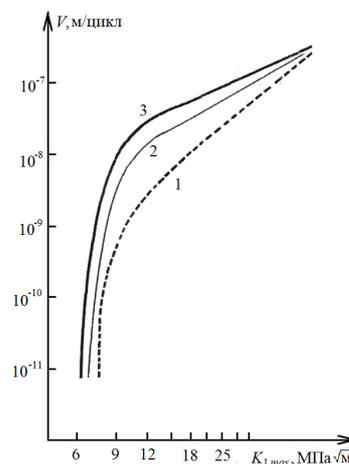


Рис. 7. Кинетические диаграммы усталостного разрушения стали:

1 – в воздухе; 2, 3 – в процессе электролитического наводораживания, плотность тока соответственно 0,1 и 1 А/дм²

Экспериментальными исследованиями доказано, что прочность конструкции зависит от окружающей среды [13, 14]. Изменение внешних условий наиболее сказывается на процессах локального разрушения в вершине трещины и влияет на скорость докритического роста трещин.

Кинетика полуэллиптической трещины, выходящей на внутреннюю поверхность стенки электролизерной камеры, исследовалась под действием статического и циклического нагружений. Начальные размеры трещины (полуоси эллипса) $l = 0,5$ мм и $c = 1$ мм.

На рис. 6 приведена принятая зависимость скорости роста трещины от КИН при статическом нагружении стали. Темными точками показана зависимость в газообразном водороде влажностью 90 %, а светлыми – в газообразном водороде влажностью 15 %. Сплошная кривая отражает зависимость в условиях электрического наводораживания с плотностью тока 1 А/дм², а пунктир – при плотности тока 0,1 А/дм². Из рис. 6 можно сделать вывод, что плотность тока при его уменьшении в 10 раз понижает скорость роста трещины не более чем на 20 %. В нашем случае плотность тока составляет около 1 А/дм². Существенным является то, что при $K_I > 21$ МПа√м скорость роста трещины практически не зависит от величины нагружения. При $K_I < 21$ МПа√м скорость роста трещины быстро изменяется более чем в 100 раз, и при пороговом значении $K_I \approx 15$ МПа√м трещина перестает расти при статическом нагружении.

При циклическом нагружении принималась кинетическая диаграмма усталостного разрушения, приведенная на рис. 7, и соответствующие ей постоянные трещиностойкости материала $C_N = 5,07 \times 10^{-11}$ и $n_N = 2,36$ при плотности тока 1 А/дм².

На отнулевом цикле пороговое значение КИН значительно ниже и равняется приблизительно 6 МПа√м. При $K_I > 10$ МПа√м скорость роста усталостной трещины при циклическом нагружении с достаточной точностью описывается уравнением Периса (2).

Полученные результаты кинетики поверхностной меридиональной трещины при отнулевом цикле нагружения приведены на рис. 8–9 и в таблице.

Таким образом, если в конструкции имеет место начальный дефект (в нашем случае меридиональная трещина глубиной порядка 0,75 мм), то она может подрастать, начиная со скорости 0,06 мм/год.

При глубине меридиональной трещины приблизительно 0,3 мм при данном отнулевом циклическом нагружении она перестанет подрастать. Когда трещина достигнет глубины 1,75 мм, начнется ее подрастание не только за счет циклического нагружения $N \approx 210$ циклов/год, а также за счет статического нагружения при условии электролитического наводораживания. Следует отметить, что при циклическом нагружении в воздухе скорость роста трещины приблизительно на порядок меньше. Скорость с глубиной трещины будет подрастать в соответствии с графиком, приведенным на рис. 8.

Когда глубина меридиональной трещины станет приблизительно 3 мм, при статическом нагружении она начинает подрастать с постоянной скоростью 32 мм/год. При этом даже без циклического нагружения приблизительно через месяц трещина прорастет насквозь.

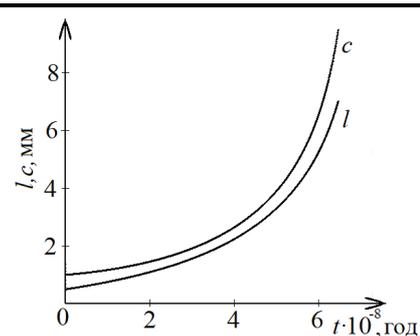


Рис. 8. Зависимость глубины l и ширины c трещины от времени

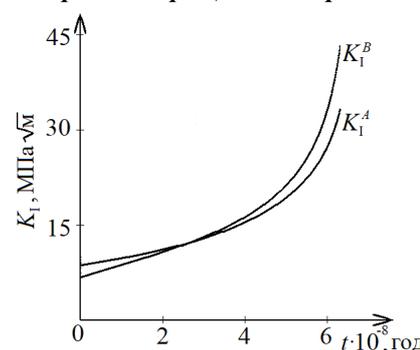


Рис. 9. Зависимость КИН в вершинах трещины А и В от времени

Значение КИН в вершинах эллиптической трещины А и В в зависимости от ее размеров

l , мм	c , мм	K_I^A , МПа√м	K_I^B , МПа√м
0,5	1	8,67	6,78
1,0	2	12,30	9,76
1,5	3	15,3	12,3
2,0	4	17,9	14,6
2,5	5	20,4	16,9
3,0	6	22,8	19,4
3,5	7	25,2	22,0
4,0	8	27,6	24,8
4,5	9	30,0	27,8
5,0	10	32,6	31,2

Выводы

С помощью разработанной ранее методики моделирования напряженно-деформированного состояния на основе применения МКЭ выполнены расчетные исследования термонапряженного состояния крышки электролизерной ячейки. Методика включает в себя программный комплекс, позволяющий проводить численные исследования термонапряженного состояния конструкций с учетом сложной геометрии объектов, переменных во времени граничных условий, неоднородности свойств материала и т.п. Достоверность результатов, получаемых с помощью разработанной расчетной методики, подтверждалась на ряде тестовых примеров, а также результатами решений широкого класса прикладных задач [8].

Цилиндрическая часть крышки определена как наиболее нагруженная. Результаты оценки кинетики гипотетической трещины в этой области свидетельствуют о том, что при малом количестве циклов (менее 300 за год) трещина будет долго (38 лет) подрастать до глубины 1,75 мм, а потом скорость ее роста от статического нагружения увеличится так быстро, что ростом трещины от циклического нагружения можно будет пренебречь.

Литература

1. Solovei V. V., Kotenko A. L., Vorobiova I. O., Shevchenko A. A., Zipunnikov M. M. Basic operation principles and control algorithm for a high-pressure membrane-less electrolyser. *J. Mech. Eng.* 2018. Vol. 21. No. 4. P. 57–63. <https://doi.org/10.15407/pmach2018.04.057>.
2. Tarzimoghadam Z., Ponge D., Klower J., Raabe D. Hydrogen-assisted failure in Ni-based superalloy 718 studied under in situ hydrogen charging: the role of localized deformation in crack propagation. *Acta Materialia*. 2017. Vol. 128. P. 365–374. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.02.059>.
3. Ivaskevich L. M., Balitskii A. I., Mochulskiy V. M. Influence of hydrogen on the static crack resistance of refractory steels. *Materials Sci.* 2012. Vol. 48. No. 3. P. 345–354. <https://doi.org/10.1007/s11003-012-9512-z>.
4. Балицький О. І., Семерак М. М., Балицька В. О., Субота А. В., Еліаш Я., Вус О.Б. Зміна міцнісних властивостей водневих балонів на енергоблоках електростанцій за тривалої експлуатації. Пожежна безпека. 2013. Т. 23. С. 20–28.
5. Balitskii A. I., Ivaskevich L. M. Assessment of hydrogen embrittlement in high-alloy chromium-nickel steels and alloys in hydrogen at high pressures and temperatures. *Strength Materials*. 2018. Vol. 50. P. 880–887. <https://doi.org/10.1007/s11223-019-00035-2>.
6. Dmytrakh I. M., Leshchak R. L., Syrotyuk A. M., Barna R. A. Effect of hydrogen concentration on fatigue crack growth behavior in pipeline steel. *Intern. J. Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. Iss. 9. P. 6401–6408. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.193>.
7. Овчинников И. И., Овчинников И. Г. Влияние водородосодержащей среды при высоких температурах и давлениях на поведение металлов и конструкций из них. *Науковедение*. 2012. № 4. С. 1–28.
8. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Зайцев Б. Ф. Задачи термпрочности, вибродиагностики и ресурса энергоагрегатов (модели, методы, результаты исследований). Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG, 2011. 370 с.
9. Shul'zhenko M. G., Gontarovskiy P. P., Garmash N. G., Melezhyk I. I. Thermostressed state and crack growth resistance of rotors of the NPP turbine K-1000-60/1500. *Strength Materials*. 2010. Vol. 42. P. 114–119. <https://doi.org/10.1007/s11223-010-9197-1>.
10. Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін. Методичні вказівки: СОУ- Н МЕВ 40.1–21677681– 52:2011 / М. Г. Шульженко, П. П. Гонтаровський, Ю. І. Матюхін, І. І. Мележик, О. В. Пожидаєв. К.: ОЕП «ГРІФРЕ»: М-во енергетики та вугільної пром-сті України, 2011. 42 с.
11. Ovchinnikov A. V. An interpolation method of calculation of stress intensity factors. *Strength Materials*. 1988. Vol. 20. P. 710–717. <https://doi.org/10.1007/BF01530081>.
12. Методические рекомендации МР 125-02-95. Правила составления расчётных схем и определение параметров нагруженности элементов конструкций с выявленными дефектами. М.: ЦНИИТМАШ, 1995. 52 с.
13. Черепанов Г. П. Механика хрупкого разрушения. М.: Наука, 1974. 640 с.
14. Механіка руйнування і міцність матеріалів: Довід. посіб. / Під заг. ред. В. В. Панасюка. Т. 8: Міцність матеріалів і довговічність елементів конструкцій атомних електростанцій / О. І. Балицький, О. В. Махненко, О. О. Балицький, В. А. Грабовський, Д. М. Завербний, Б. Т. Тимофєєв. Під ред. О. І. Балицького. Київ: ВД «Академпериодика», 2005. 534 с.

Поступила в редакцію 28.08.2020

Аналіз росту тріщини в стінці електролізерної камери**П. П. Гонтаровський, Н. В. Сметанкіна, Н. Г. Гармаш, І. І. Мележик**Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України,
61046, Україна, м. Харків, вул. Пожарського, 2/10

Електролізерні установки широко застосовуються у різних галузях промисловості. Вони являють собою ємності високого тиску з камерою та розміщеними у ній електродами, які скомпоновані в пакети, а також кришки і патрубки. До їхніх технічних характеристик ставляться високі вимоги, що підтверджують актуальність проблеми удосконалення методів досліджень. Для моделювання кінетики термонапруженого стану в елементах енергоустановок зі складними реологічними характеристиками матеріалу й з урахуванням його пошкоджувальності на базі методу скінченних елементів розроблена спеціальна методика й програмний комплекс, що дозволяють у тривимірній постановці розв'язувати широкий клас нелінійних нестационарних задач із одночасним урахуванням усіх чинних факторів. Дослідження кінетики тріщини виконані з використанням методики розрахункової оцінки живучості елементів конструкцій, яка базується на принципах механіки крихкого руйнування. При цьому зона пластичності у вершині тріщини приймається малою у порівнянні з її розмірами, а кінетика тріщини визначається коефіцієнтами інтенсивності напружень у її вершинах. Методика ґрунтується на розрахунках кінетики тріщини до критичних розмірів, коли відбувається лавиноподібне руйнування елемента конструкції або тріщина проростає наскрізь по товщині елемента. Кінетика напівеліптичної тріщини, яка виходить на внутрішню поверхню стінки електролізерної камери, досліджувалася під дією статичного й циклічного навантажень. Із використанням розробленої методики виконані розрахункові дослідження термонапруженого стану верхньої частини електролізерної комірки. Отримані результати показують, що циліндрична частина кришки є найбільш навантаженою. Виконані дослідження розвитку внутрішньої поверхневої напівеліптичної тріщини, яка зародилася в цій зоні. Установлено, що при малій кількості циклів за рік тріщина буде довго підростати до певної глибини, далі швидкість її росту від статичного навантаження збільшується так швидко, що ростом тріщини від циклічного навантаження можна знехтувати.

Ключові слова: електролізер, наводнювання, напружено-деформований стан, середовище, тріщина.