

П. П. ГОНТАРОВСКИЙ, Н. Г. ШУЛЬЖЕНКО, Н. Г. ГАРМАШ, И. И. МЕЛЕЖИК

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА КОЛЬЦЕВОЙ ТРЕЩИНЫ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ЭЛЕМЕНТЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

Рассматривается кинетика кольцевой трещины в цилиндре с разными уровнями циклического нагружения. Применяется предложенная ранее методика расчетной оценки развития трещин в пластинчатых и осесимметричных конструкциях при циклическом нагружении, которая основана на концепции накопления рассеянных повреждений в материале. Упруго-пластическое деформирование материала в районе трещины определяется с помощью метода конечных элементов, а повреждаемость оценивается с использованием диаграмм усталостного разрушения гладких цилиндрических образцов. Учитывается контакт берегов трещины при сжимающих нагрузках. Результаты согласуются с данными, полученными по методу Ньюмана. Предлагаемая методика может быть использована для оценки живучести элементов паровых турбин (тепловых канавок роторов на пуско-остановочных режимах, замковых соединений лопаток с дисками и др.).

Ключевые слова: кинетика трещины, циклическая нагрузка, размахи упруго-пластических деформаций, кривые малоциклового усталости, метод конечных элементов, коэффициент асимметрии цикла, контакт берегов трещины.

П. П. ГОНТАРОВСЬКИЙ, М. Г. ШУЛЬЖЕНКО, Н. Г. ГАРМАШ, І. І. МЕЛЕЖИК МОДЕЛЮВАННЯ РОСТУ КІЛЬЦЕВОЇ ТРІЩИНИ В ЦИЛІНДРИЧНОМУ ЕЛЕМЕНТІ КОНСТРУКЦІЇ ПРИ ЦИКЛІЧНОМУ НАВАНТАЖЕННІ

Розглядається кінетика кільцевої тріщини в циліндрі при різних рівнях циклічного навантаження. Використовується запропонована раніше методика розрахункової оцінки розвитку тріщини в осесиметричних конструкціях при циклічному навантаженні, яка базується на концепції накоплення розсіяних пошкоджень у матеріалі. Пружно-пластичне деформування матеріалу в районі тріщини моделюється методом скінченних елементів, а руйнування оцінюється з використанням діаграм втомного руйнування гладких циліндричних зразків. Враховується контакт берегів тріщини при стискаючих навантаженнях. Результати узгоджуються з даними, отриманими по методу Ньюмана. Запропонована методика може бути використана для оцінки живучості елементів парових турбін (теплових канавок роторів при пуско-зупинних режимах, замкових з'єднань лопаток з дисками та ін.).

Ключові слова: кінетика тріщини, циклічне навантаження, розмахи пружно-пластичних деформацій, криві малоциклової втоми, метод скінченних елементів, коефіцієнт асиметрії циклу, контакт берегів тріщини.

P. GONTAROVSKIY, N. SHULZHENKO, N. GARMASH, I. MELEZHYK SIMULATION OF THE PROPAGATION OF CIRCUMFERENTIAL CRACK IN THE CYLINDRICAL ELEMENT STRUCTURE EXPOSED TO CYCLIC LOADINGS

The purpose of these studies was to work out the methods for the computation of crack development in the plate and axisymmetric elements of structures at cyclic loading for the plasto-elastic arrangement using the conception of the accumulation of scattered damages in the material. In the domain in question, we simulated the processes of alternating-sign plasto-elastic deformation and the material crack resistance was estimated using the fatigue test data for smooth specimens. Thermal and elastically-deformed states of the structure were determined for different loading modes using the finite elements method. The material damageability was assessed for the curves of low-cycle fatigue and for the range of plasto-elastic deformations on the route of probable crack propagation using the hypothesis of linear summation. As soon as a critical value of the damageability is achieved the crack is propagated stepwise for the specified step. As an example, consideration was given to the kinetics of circumferential crack in the cylindrical element exposed to the axial-symmetric cyclic loading. The contact of crack edges was taken into consideration for compressing loading semicycles. The obtained data agree with the data obtained using the Newman method. The suggested technique can be used for the estimation of survivability of the elements of steam turbines (heat rotor grooves at start-up-stop modes, blade and disk interlocks, etc.).

Key words: the crack kinetics, cyclic loading, plasto-elastic deformation range, low-cycle fatigue curves, finite elements method, cycle asymmetry factor, and the contact of crack edges.

Введение

Оценка живучести элементов паровых турбин играет важную роль при определении их расчетного ресурса и назначении сроков межремонтных контролей [1, 2]. Методы моделирования роста трещины в ряде случаев основываются на подходах классической механики разрушения, где зона пластичности в вершине трещины принимается малой по сравнению с ее длиной. Необходимые кинетические диаграммы разрушения материала определяются из испытаний специальных образцов с трещинами [3]. При этом предполагается, что в полцикле сжимающих нагрузок трещина не

распространяется, а расчеты проводятся для отнулевого цикла [4–6]. Вместе с тем, ряд исследований по распространению трещины при знакопеременном цикле нагружения (как экспериментальных [3, 7] так и численных [8]) показывают, что сжимающий полцикл нагружения также влияет на развитие трещины.

Цель работы

Целью работы является развитие методики оценки кинетики трещины в элементах конструкций в упруго-пластической постановке с использованием параметров рассеянных повреждений

©П. П. Гонтаровский, Н. Г. Шульженко, Н. Г. Гармаш, И. И. Мележик, 2018

материала при асимметричном циклическом нагружении с учетом контактирования берегов трещины.

Методика оценки кинетики трещины

Используется предложенная ранее методика расчета кинетики трещины в плоских и осесимметричных элементах конструкций, основанная на принципах накопления рассеянных повреждений в материале [8, 9]. Тепловое и напряженно-деформированное состояния определяются методом конечных элементов [2, 10] в упруго-пластической постановке с учетом истории деформирования материала на основе принципа Мазинга и эффекта Баушингера [11] при реверсе напряжений. Используются диаграммы малоциклового усталости гладких образцов при соответствующей температуре.

Задача решается для симметричной части конструкции. Конечноэлементная дискретизация области выполняется со сгущением сетки к вершине трещины (рис. 1). Трещина моделируется пропилом шириной 0,1 мм.

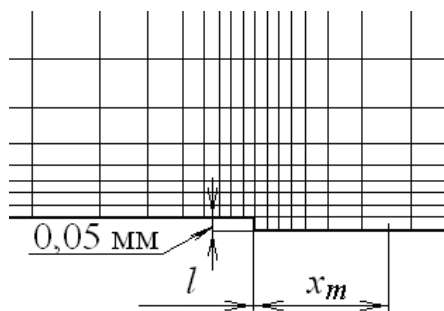


Рис. 1 — Конечноэлементная дискретизация в окрестности вершины трещины:
 l – длина трещины; x_m – расстояние от вершины трещины до центров конечных элементов

Для определения амплитуд интенсивности упруго-пластических деформаций решается термоконтактная задача теории пластичности с использованием метода конечных элементов. Расчеты проводятся для нескольких фиксированных длин трещин.

Предполагаемый путь развития трещины разбивается на отрезки d_i длиной 0,1 мм. Используется квадратичная интерполяция для вычисления амплитуд интенсивности деформаций в центрах x_i отрезков d_i по их значениям в центрах конечных элементов x_m . Принимается, что трещина продвигается на величину отрезка d_i , при накоплении в нем критической поврежденности.

Число циклов до разрушения N_p определяется из кривых усталости при соответствующей температуре. Приращения повреждаемости за один цикл нагружения определяются по формуле

$$\Delta\Pi(x_i) = \frac{1}{N_p(x_i)}. \quad (1)$$

Число циклов до разрушения в ближайшем к вершине трещины отрезке d_i определяется по формуле

$$N_i = \frac{1 - \Pi(x_i)}{\Delta\Pi(x_i)}, \quad (2)$$

где $\Pi(x_i)$ – накопленная повреждаемость в вершине трещины за время ее подрастания до текущей длины l . Число циклов, за которые трещина достигла длины l_i , определяется следующим образом:

$$N(l_i) = \sum N_i. \quad (3)$$

После разрушения отрезка d_i повреждаемость в других точках x_i на пути движения трещины определяется по формуле

$$\Pi(x_{i+1}) = \Pi(x_{i+1}) + \Delta\Pi(x_{i+1})N_i. \quad (4)$$

Изложенная схема решения повторяется для длины трещины, увеличенной на шаг подрастания d_i .

Результаты исследований

Исследуется кинетика кольцевой трещины в сплошном цилиндре радиусом $r = 10$ см и высотой 24 см (рис. 2), изготовленного из стали 25Х1М1Ф ($T = 535$ °С). Начальная длина трещины $l = 2$ см.

К цилиндру прикладывается циклическое нагружение с максимальным растягивающим напряжением $\sigma_{z\max} = 100$ МПа. Принимались следующие варианты нагружения с коэффициентами асимметрии цикла:

$$R = \sigma_{z\min}/\sigma_{z\max} = 0,5; 0,2; 0; -0,2; -0,5; -1,$$

где $\sigma_{z\min}$ – минимальное напряжение в цикле.

В случае сжимающего полуцикла нагружения учитывается возможное контактирование берегов трещины решением контактной задачи. При этом используется термоконтактный конечный элемент [12], позволяющий моделировать взаимодействие между контактирующими телами, зависящее от напряженного состояния, величины и характера распределения контактного давления в соединении.

Амплитуды упруго-пластических деформаций, полученные в центрах конечных элементов x_m , на пути развития трещины за симметричный цикл нагружения приводятся в табл. 1.

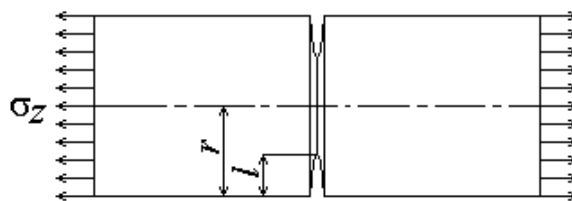


Рис. 2 – Схема цилиндра с кольцевой трещиной

Диаграммы малоциклового усталости для материала 25X1M1Ф при разных температурах приведены на рис. 3 [13].

Подрастание кольцевой трещины в цилиндре показано сплошными линиями на рис. 4 при нагружении с положительными (рис. 4а) и отрицательными (рис. 4б) коэффициентами асимметрии цикла.

Полученные результаты сравниваются с данными расчетов по методу Ньюмана [7], который позволяет учитывать асимметрию цикла нагружения и свойства материала, характеризующие зону пластичности. В соответствии с ним, расчетная формула для скорости роста трещины для рассматриваемого случая

$$\frac{dl}{dN} = 42,691 \cdot 10^{-10} K^{3,846} \quad (5)$$

где ΔK – размах коэффициента интенсивности напряжений, который вычисляется методом конечных элементов по распределению напряжений и перемещений в окрестности вершины трещины [14]. Для трещин длиной 2; 3; 4 и 5 см ΔK равняется соответственно 31,59; 42,65; 76,67 и 109,07 МПа $\sqrt{м}$ при отнулевом цикле нагружения.

Таблица 1 – Значения амплитуд интенсивности деформаций

x_m , мм	Длина трещины l , мм				
	20	30	40	45	50
0,025	1,5559	2,3268	3,3879	4,1835	5,3839
0,075	0,6190	0,9717	1,4810	1,8831	2,4908
0,125	0,2858	0,4528	0,7085	0,9268	1,2611
0,18	0,1682	0,2464	0,3678	0,4758	0,6482
0,255	0,1238	0,1644	0,2327	0,2863	0,3726
0,3722	0,1027	0,1245	0,1659	0,2038	0,2545
0,5456	0,0891	0,1062	0,1277	0,1567	0,2002
0,7883	0,0781	0,0948	0,1106	0,1249	0,1603
1,1281	0,0675	0,0830	0,0990	0,1082	0,125
1,6039	0,0582	0,0723	0,0877	0,0961	0,1080
2,2699	0,0519	0,0628	0,0773	0,0846	0,0962
3,2023	0,0482	0,0550	0,0678	0,0753	0,0851
4,5077	0,0459	0,0496	0,0591	0,0671	0,0754
6,3353	0,0444	0,0464	0,0521	0,0588	0,0669
8,8939	0,0436	0,0446	0,0473	0,0515	0,0594
11,6887	0,0431	0,0435	0,0448	0,0469	0,0534
14,8932	0,0431	0,0430	0,0438	0,0449	0,0495

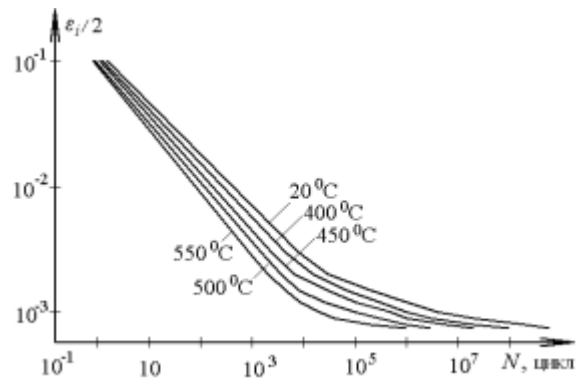


Рис. 3 – Диаграммы малоциклового усталости для материала 25X1M1Ф

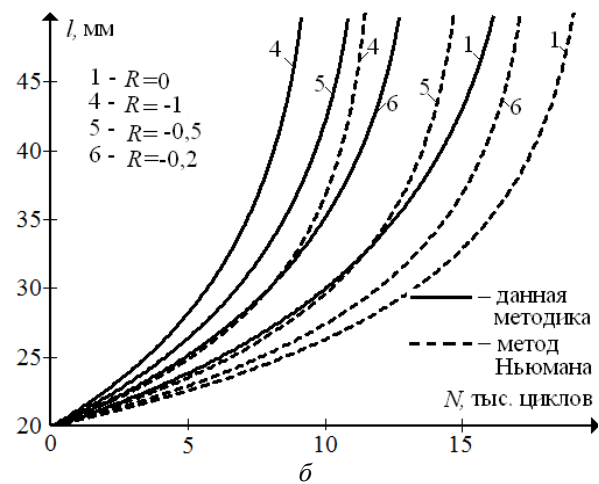
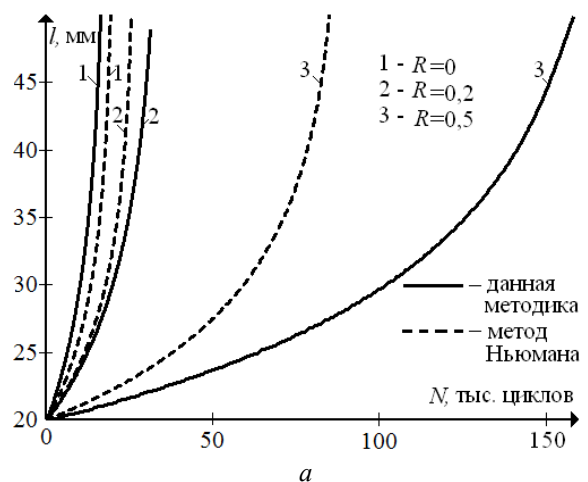


Рис. 4 – Подрастание трещины при нагружении с коэффициентом асимметрии цикла: а – положительным; б – отрицательным

Результаты подрастания трещины, полученные по методу Ньюмана, приведены пунктирными линиями с положительным (рис. 4а) и отрицательным (рис. 4б) коэффициентом асимметрии цикла нагружения.

Полученные результаты согласуются с результатами по методу Ньюмана. Их отличие может быть объяснено влиянием разных факторов. Например, характеристики сталей, по которым определялись параметры для обеих методик, могли отличаться между собой за счет термообработки и химического состава.

Выводы

Применяемая методика оценки роста трещин основана на концепции накопления рассеянных повреждений в материале. Она позволяет рассматривать асимметричное циклическое нагружение с учетом контакта берегов трещины при сжимающих полциклах нагружения. Упруго-пластическое деформирование материала в районе вершины трещины моделируется методом конечных элементов, а для расчета кинетики трещины используются диаграммы усталостного разрушения гладких образцов.

Результаты согласуются с полученными результатами по методу Ньюмана.

Данная методика может быть использована для оценки живучести элементов паровых турбин (тепловых канавок роторов на пуско-остановочных режимах, замковых соединений лопаток с дисками и др.).

Список литературы

1. СОУ-Н МЕВ 40.1–21677681–52: 2011. *Визначення розрахункового ресурсу та оцінка живучості роторів і корпусних деталей турбін*: методичні вказівки. Чинний від 2011-07-07. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», 2011. 42 с. (Нормативний документ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України).
2. Shul'zhenko M. G., Gontarovskiy P. P., Garmash N. G., Melezhyk I. I., Protasova T. V. Thermostressed state and crack growth resistance of rotors of the NPP turbine K-1000-60/1500. *Strength of materials*. 2010. Vol. 42, No 1. pp. 114–119.
3. Кобаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*. Москва: Машиностроение, 1985. 234 с.
4. Черепанов Г. П. *Механика хрупкого разрушения*. Москва: Наука, 1974. 640 с.
5. Пестриков В. М., Морозов Е. М. *Механика разрушения твердых тел*. Санкт-Петербург: Профессия, 2002. 320 с.
6. ASME Boiler and Pressure Vessel Code. *Section XI, Appendix A, The American Society of Mechanical Engineers, 31 December, New York*. New York, 1990, Addenda, p. 28.
7. Bloom J. M. An approach to account for negative R-ratio effects in fatigue crack growth calculations for pressure vessels based on crack closure concepts. *Trans. ASME*. 1994. Vol. 116. pp. 30–35.
8. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Мележик І. І. Розрахункова оцінка розвитку тріщини з контактними берегами в плоских елементах конструкцій. *Вісник Запорізького національного університету. Серія: Фізико-математичні науки*. Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2017, № 1. С. 365–373.
9. Шульженко М. Г., Гонтаровський П. П., Гармаш Н. Г., Мележик І. І. Оцінка розвитку тріщини при циклічному навантаженні пластинчатих елементів із використанням параметрів розсіяних пошкоджень матеріалу. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Харків: НТУ «ХП», 2017. № 9(1231). С. 41–
44. Бібліогр.: 5 назв. ISSN 2078-774X. doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.06.
10. Подгорный А. Н., Гонтаровский П. П., Киркач Б. Н., Матюхин Ю. И., Хавин Г. Л. *Задачи контактного взаимодействия элементов конструкций*. АН УССР, Ин-т проблем машиностроения. Киев: Наук. думка, 1989. 232 с.
11. Москвитин В. В. *Пластичность при переменных нагружениях*. Москва: Изд-во московского университета, 1965. 263 с.
12. Гонтаровский П. П., Гармаш Н. Г. К решению контактных задач МКЭ с учетом фрикционного нагрева. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Динаміка та міцність машин. Харків: НТУ «ХП», 2001. № 25. С. 67–74. ISSN 2078-9130.
13. *Детали паровых стационарных турбин. Расчет на малоцикловую усталость: РТМ 108.021.103-85*. Введен 01.07.86. Москва: Министерство энергетического машиностроения, 1986. 49 с.
14. Шульженко Н. Г., Гонтаровский П. П., Мележик И. И. Расчет трещиностойкости элементов конструкций методом конечных элементов. *Вісник НТУ «ХП»*. Серія: Динаміка та міцність машин. Харків: НТУ «ХП», 2005. № 21. С. 127–132. ISSN 2078-9130.

References (transliterated)

1. SOU-N MEV 40.1 –21677681–52: 2011. (2011), *Viznachennyya rozrakhunkovogo resursu ta otsinka zhivuchosti rotoriv i korpusnyh detaley turbyn. Metodichny vkazivki* [Defining resource calculation and assessment of survivability rotors and body parts turbines. Guidelines], OEP "GRIFRE", Kiev.
2. Shul'zhenko, M. G., Gontarovskiy, P. P., Garmash, N. G., Melezhyk, I. I. and Protasova, T. V. (2010), "Thermostressed state and crack growth resistance of rotors of the NPP turbine K-1000-60/1500", *Strength of materials*, Vol. 42, No 1. pp. 114–119, ISSN 0039-2316.
3. Kogaev, V. P., Mahutov, N. A. and Gusenkov, A. P. (1985), *Raschety detaley mashin i konstruktсий na prochnost' i dolgovечnost'* [The calculations of machine parts and structures for strength and durability], Mashynostroenie, Moscow, Russia.
4. Cherepanov, G. P. (1974), *Mekhanika hrupkogo razrusheniya* [Brittle fracture mechanics], Nauka, Moscow.
5. Pestrikov, V. M. and Morozov, E. M. (2002), *Mekhanika razrusheniya tverdykh tel* [Fracture mechanics of solid bodies], Professija, SPb.
6. (1990), "ASME Boiler and Pressure Vessel Code", *Section XI, Appendix A, The American Society of Mechanical Engineers, 31 December, New York*. New York, Addenda, p. 28.
7. Bloom, J. M. (1994), "An approach to account for negative R-ratio effects in fatigue crack growth calculations for pressure vessels based on crack closure concepts", *Trans. ASME*, Vol. 116, pp. 30–35.
8. Shulzhenko, N. G., Gontarovskiy, P. P., Garmash, N. G. and Melezhyk, I. I. (2017), "Rozrakhunkova otsinka rozvytku trishchyny z kontaktuyuchymy berehamy v ploskykh elementakh konstruktсий [Computation estimation of the crack development with crack edges contact of plane structural elements]", *Visnyk Zaporiz'koho natsional'noho universytetu. Fiziko-matematichni nauki*, no. 1, pp. 365–373, ISSN 2413-6549.
9. Shulzhenko, M., Gontarovskiy, P., Garmash, N. and Melezhyk, I. (2017), "Evaluation of the Crack Development at a Cyclic Loading of Plate Elements Using the Parameters of Scattered Damages of the Material", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Power and heat engineering processes and equipment*, No. 9(1231), pp. 41–44, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2017.09.06.
10. Podgorny, A. N., Gontarovskiy, P. P., Kirkach, B. N., Matjuhin, Yu. I. and Havin, G. L. (1989), *Zadachi kontaktного vzaimodeystviya elementov konstruktсий* [Problems of contact interaction of structural elements], AN USSR, In-t problem mashynostroyeniya, Nauk. dumka, Kiev.
11. Moskvitin, V. V. (1965), *Plastichnost' pri peremennykh nagruzheniayah* [Plasticity at variable loadings], Izdatelstvo moskovskogo universiteta, Moscow, Russia.

12. Gontarovskiy, P. P. and Garmash, N. G. (2001), "K resheniyu kontaknykh zadach MKE s uchetom friktsionnogo nagreva [To the solution of contact problems of FEM with allowance for frictional heating]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines*, no. 25, pp. 67–74, ISSN 2078-9130.
13. (1986), *Detali parovyih statsionarnyih turbin. Raschet na malotsiklovuyu ustalost: RTM 108.021.103-85* [Details of stationary steam-turbines. Calculation on a low-cycle fatigue], Ministerstvo energeticheskogo mashinostroeniya, Moscow, 49 p.
14. Shulzhenko, N. G., Gontarovskiy, P. P. and Melezhyk, I. I. (2005), "Raschet treshchinostoykosti elementov konstruktivnykh metodom konechnykh elementov [Calculation of the crack resistance of structural elements by the finite element method]", *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Dynamics and strength of machines*, no. 21, pp. 127–132, ISSN 2078-9130.

Посмунула (received) 12.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Гонтаровський Павло Петрович (Гонтаровский Павел Петрович, Gontarovskiy Pavel Petrovich) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, старший науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень, м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Шульженко Микола Григорович (Шульженко Николай Григорьевич, Shulzhenko Nikolay Grigor'evich) – доктор технічних наук, професор, м. Харків, Україна; e-mail: shulzh@ipmach.kharkov.ua.

Гармаш Наталія Григорівна (Гармаш Наталия Григорьевна, Garmash Nataliya Grigor'evna) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, старший науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень, м. Харків, Україна; e-mail: garm_nataly@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4890-8152>.

Мележик Ірина Іванівна (Мележик Ирина Ивановна, Melezhyk Irina Ivanovna) – кандидат технічних наук, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного Національної академії наук України, старший науковий співробітник відділу вібраційних та термоміцнісних досліджень, м. Харків, Україна; e-mail: melezhyk@online.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8968-5581>.