doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000189 **7.** *Voshoughi, A. R., Malekzadeh, P., Banan, Mo. R.* (2011). Thermal postbuckling of laminated composite skev plates with temperature-dependent properties. J. Thin Walledstructuresv, Vol. 47, No 7, 804–811. **8.** *Thuç, P. Vo., Thai Huu-Tai.* (2012). Vibration and buckling of composite beams using refined shear deformation theory. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 62, No 1, 67–76. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2012.06.001 **9.** *Asadi, H., Aghdam, M. M.* (2014). Large amplitude vibration and post-buckling analysis of variable cross-section composite beams on nonlinear elastic foundation. Intern. Journal of Mechanical Sciences, Vol. 79, 47–55. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2013.11.017 **10.** *Isayev, F. Q., Memmedli, R. E.* (2014). Vibration of nonhomogeneous three-layered rods against the effect of thermo-mechanical stress in anisotropic foundation. Journal of QafqazUniversity Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 2, No 2, 112–117.

Поступила (received) 20.11.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Исалы Биллура Элман кызы – докторант кафедры "Инженерная механика", Университет Кавказ; ул. Гасан Алиева, 120, г. Хырдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101; e-mail: fisayev@qu.edu.az.

Ісали Біллура Елман кизи - докторант кафедри "Інженерна механіка", Університет Кавказ; вул. Гасан Алієва, 120, м. Хирдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101; e-mail: fisayev@qu.edu.az.

Isali Billura Elman kizi – doctorant departament of Engineering Mechanics Qafqaz University, Qasan Aliyev str.120, Khirdalan, Baku, Absheron, Azerbaijan, AZ0101; tel.: (+99412) 448-28-62; e-mail: fisayev@qu.edu.az.

Мамедли Рамил Элман оглы – докторант кафедры "Инженерная механика" Университет Кавказ; ул. Гасан Алиева, 120, г. Хырдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101, e-mail: fisayev@qu.edu.az.

Мамедлі Каміл Елман огли – докторант кафедри "Інженерна механіка" Університет Кавказ; вул. Гасан Алієва, 120, м Хирдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101, e-mail: fisayev@qu.edu.az.

Mamedli Ramil Elman oqli – doctorant departament of Engineering Mechanics, Qafqaz University, Qasan Aliyev str.120, Khirdalan, Baku, Absheron, Azerbaijan, AZ0101; e-mail: fisayev@qu.edu.az.

УДК 539.3

Ф. К. ИСАЕВ, В. Г. РАДЖАБОВ

УСТОЙЧИВОСТЬ НЕОДНОРОДНЫХ НАНО-МИКРО ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ НЕЛОКАЛЬНОЙ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ

В представленной статье исследуется устойчивость неоднородных нано-микро элементов на основе не локальной теории упругости. Здесь как элемент конструкции принять прямолинейный стержень и для него принята теория стержней Эйлера-Бернулли. Предполагается, что модуль упругости материала стержня является непрерывной функцией координаты толщины. При получении уравнений устойчивости на основе теории стержня Эйлера-Бернулли был использован уравнения состояния нелокальной теории упругости предложенные Эрингеном. Для различных случаев граничных условий получены уравнения устойчивости рассмотренных стержней. После решения полученных уравнений найдены аналитические формулы для определения критической нагрузки и проведены различные анализы.

Ключевые слова: нано-микро элемент, неоднородный, теория стержней Эйлера-Бернулли, устойчивость, критическая нагрузка, нелокальная теория упругости

Введение. Различные вопросы устойчивости и прочности одно и многослойных стержневых элементов конструкций из однородных материалов в научной литературе исследованы достаточно. В этих работах в основном использованы классические соотношения теории упругости [1–3].

В последние годы в технике интенсивно используются новые композитно- искусственные материалы. Поэтому эти процессы ставить перед конструкторами-исследователями повышенные требования к оценке прочности ,устойчивости и колебании, так как при различных условиях работы и режимах нагружения возникает ряд вопросов, которое требует решения новых задач напряженно-деформированного состояния и определения критических параметров. Во многих случаях слоистые элементы конструкции изготавливаются из различных неоднородно упругих материалов. Причиной появления неоднородности могут быть технология изготовления конструкций, термическая обработка материалов, неоднородность составов и т.д. Учет этих факторов при решении задач устойчивости и колебании конструкций является очень существенным. Поэтому при решении многих задач устойчивости и колебании элементов конструкций из неоднородных композиционных материалов требуется использовать более уточненные гипотезы или теории. Одной из таких теорий является теория нелокальной теории упругости предложенной А. К. Эрингеном [5, 6].

В работе [4] были рассмотрены некоторые задачи изгиба и прочности неоднородных нано-микро элементов. В данной работе исследуется задача устойчивости неоднородных стержней на основе нелокальной теории Эрингена [5]

Постановка задачи. Известно, что уравнения движения Коши однородно упругих тел на основе нелокальной теории упругости сочтоит из следующих уравнений [5]:

$$\tau_{kl,l} + \rho\left(f_i - \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}\right) = 0\,, \tag{1}$$

здесь физические соотношения имеют следующий вид:

$$\tau_{kl}(x) = \int_v \varepsilon_{klmn}(x - x')\,\varepsilon_{mn}\,dv(x')\ , \tag{2}$$

где τ_{kl} -компоненты тензора напряжений, ρ – плотность массы тела, f - плотность массового сила, u -компоненты вектора перемещения, v – обьем тела , t -время, ε_{kl} -компоненты тензора деформации и определяются по следующими формулами:

$$\varepsilon_{kl} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k}\right). \tag{3}$$

Как видно ε_{klmn} являются функциями вектора x-x' ,и напряжения в точках x- зависять от деформаций и перемещений в точках x'.

Связь между компонентами напряжений и деформаций в точках x' – орпеделяются на основе обобщенного закона Гука / 5 /:

$$\tau(x') = \lambda\varepsilon_{mn}(x')\delta_{ke} + 2\mu\varepsilon_{ke}(x'), \tag{4}$$

$$\varepsilon_{kl}(x') = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_k(x')}{\partial x'_l} + \frac{\partial u_l(x')}{\partial x'_k}\right)$$

Уравнения состояния нелокальной теории упругости предложенной К.А.Эрингеном имеють следующий вид / 5-6 /:

$$\left[1-(l_0 a)^2\nabla^2\right]\sigma_{kl} = \tau_{kl}, \tag{5}$$

$$\left[1-(l_0 a)^2\nabla^2\right]\tau_{kl} = \lambda\varepsilon_{kl}\delta_{kl} + 2\mu\varepsilon_{kl}$$

Здесь l_0 – характерная внутренная длина , a– постоянная материала.

Из (5) для стержня можно получить:

$$\left[1-(l_0 a)^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right]\sigma_{xx} = E\varepsilon_{xx}, \tag{6}$$

$$\left[1-(l_0 a)^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right]\tau_{xx} = 2G\varepsilon_{xz}$$

Предположим ,что материал стержня является неоднородным т.е., $E = E(z)$ (модуль упругости материала стержня является непрерывной функцией координаты толщины).

Если рассмотреть теории стержней Эйлера-Бернулли,то можно записать:

$$\sigma_{xx} = E\left(\frac{\partial u}{\partial x} - z\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right), \tag{7}$$

Здесь u -перемещения по направлении оси, w -прогиб оси стержня.

В рассматриваемом случае компоненты усилий и момента вычисляются по формулам:

$$P = \int_A \sigma_{xx}dA, \quad N = \int_A \tau_{xx}dA, \quad M = \int_A \sigma_{xx}z\,dA, \tag{8}$$

где S-площадь поперечпого сечения стержня.

С учетом (7) из (8) для момента получается:

$$M = KI\frac{d^2w}{dx^2}, \quad \text{KI=} \tag{9}$$

Здесь KI -обобщенная жесткость рассматриваемого стержня .Если неоднородность имеет вид: $E = E_0\left(1+\gamma\dfrac{z^2}{h^2}\right)$ тогда получим:

$$KI = E_0 I\left(1+\gamma\frac{3}{20}\right), \tag{10}$$

где $E_0 I$ – изгибная жесткость однородного стержня.

После некоторых преобразований из (6) –можно получить:

$$\left[1-(e_0 a)^2\frac{\partial^2}{\partial x^2}\right]KI = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}, \tag{11}$$

Уравнения движения рассматриваемого стержня имеет вид:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + f = m_0\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \tag{12}$$

$$\frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + q - \frac{\partial}{\partial x}\left(P\frac{\partial w}{\partial x}\right) = m_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2\frac{\partial^2 w}{\partial x^2\partial t^2} \tag{13}$$

Где обозначено:P-осевая сжимающая сила,q-равномерно распределенная сила,

$$m_0 = \int_s \rho ds = \rho s; \qquad m_2 = \int_s z^2 ds = \rho s\frac{h^2}{12} \tag{14}$$

Здесь для усилия и момента можно получить следующие выражения:

$$P = Ks\frac{\partial U}{\partial x} + \mu\frac{\partial}{\partial x}\left(m_0\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - f\right) \tag{15}$$

$$M = -KI\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(P\frac{\partial w}{\partial x}\right) - q - m_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial t^2}\right] \tag{16}$$

Подставляя выражения для момента (16) в уравнение (13) получим следующую уравнению движения рассматриваемого неоднородного стержня:

$$\begin{aligned}&\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left(-KI\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}\right) + \\ &+\mu\frac{\partial^2}{\partial x^2}\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(P\frac{\partial w}{\partial x}\right) - q + m_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial t^2}\right] + , \\ &+q - \frac{\partial}{\partial x}\left(P\frac{\partial w}{\partial x}\right) = m_0\frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - m_2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial t^2}\end{aligned} \tag{17}$$

Присоединяя этому уравнению граничные условия получим общую постановку рассмотренной задачи.

Решение задачи устойчивости сжатого стержня.

В общем случае решение уравнения (17) связано с больщими математическими трудностями. Поэтому рассмотрим случай ,когда на стержен действует только сжимающая нагрузка(т.е.q=0).В этом случае уравнение (17) упрощается и получится в виде:

$$\begin{aligned}&\frac{d^2}{dx^2}\left(KI\frac{d^2 w}{dx^2}\right) + \frac{d}{dx}\left(P\frac{dw}{dx}\right) + \\ &+\mu\frac{d^2}{dx^2}\left[\frac{d}{dx}\left(P\frac{dw}{dx}\right)\right] = 0\end{aligned} \tag{18}$$

Дважды интегрируя это уравнение получим

$$EI\frac{d^2 w}{dx^2} - \mu P\frac{d^2 w}{dx^2} + Nw = k_1 x + k_2 \tag{19}$$

где k_1, k_2 .-постоянные интегрирования.

Если рассмотреть однородное уравнение, получим:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} + \lambda^2 w = 0 \tag{20}$$

Здесь обозначено:

$$\lambda^2 = \frac{P}{KI - \mu P} \quad \text{или} \quad P = \frac{\lambda^2}{1+\mu\lambda^2}KI \tag{21}$$

Общее решение уравнения (19) получается в виде:

$$w = c_1 \sin\lambda x + c_2 \cos\lambda x + \frac{1}{\lambda^2}\left(k_1 x + k_2\right) \qquad (22)$$

где постоянные интегрирования определяются из граничных условий задачи.

Рассмотрим случай ,когда концы стержня жестко закреплены.При этом граничные условия имеють вид:

$$w=0; \quad и \quad \frac{dw}{dx} = 0 \quad при \quad x=0;\ a\ , \qquad (23)$$

С учетом (22) из (23) получается следующее трансцендентное уравнение:

$$\lambda a \ \sin\lambda a + 2cos\lambda a - 2 = 0; \qquad (24)$$

Как видно решением уравнение (24) являетсяметодом Ньютона можно показать ,что λ =2П.Тогда для критической нагрузки получим формулу:

$$P = KI \times \frac{4\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2}{1 + 4\mu\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2} \qquad (25)$$

Отсюда минимального значения критической нагрузки получим формулу:

$$P_{kr} = \frac{KI}{a^2}\left(\frac{4\pi^2}{1+4\mu\pi^2}\right) \qquad (26)$$

Следует отметить,что при $\mu = 0$,из (26) получается решение аналогичной задачи на основе классической теории упругости.

С учетом (10) из (26) находим:

$$P_{kr} = \left(1 + \gamma\frac{3}{20}\right)P_{krR} \ . \qquad (27)$$

где $P_{krR} = \frac{EI}{a^2}\left(\frac{4\pi^2}{1+4\mu\pi^2}\right)$ – критическая нагрузка Редди для рассмотренного однородного стержня Эйлера-Бернулли / 5 /.

Причисленных расчетах для характерных параметров приняты следующие значения:

p =2300 kg/m^3; E$_0$=1000GPA; ν=0.19; G=420GPA; d=1.0$\times$10^{-9}m; I=4.91$\times$10^{-38} m^4; A=7.85$\times$10^{-19}m^2; l$_0$=1.5$\times$10^{-9}m

Результаты численных расчетов представлена табл. 1.

Таблица 1– Зависимость параметра нагрузки от параметра длины

a/l$_i$		10	20	30	40	50
l$_0$=0.5	ɣ=0	0.9102	0.9758	0.9853	0.9938	0.9561
	ɣ=0.5	0.9785	1.049	1.0635	1.0683	1.0708
	ɣ=1	1.046	1.1222	1.1377	1.1429	1.1455
	ɣ=5	1.5929	1.7077	1.7312	1.7352	1.7432
l$_0$=1	ɣ=0	0.7172	0.9102	0.5583	0.5758	0.9844
	ɣ=0.5	0.771	0.9785	1.030	1.0489	1.058
	ɣ=1	0.8248	1.0467	1.1020	1.1222	1.1321
	ɣ=5	1.2551	1.5928	1.6770	1.7077	1.7227

Выводы. В статье дана общая постановка задачи устойчивости нано-микро элементов типа неоднородных стержней Эйлера-Бернулли с использованием уравнений состояния нелокальной теории упругости К. А. Эрингена. Получено решения задачи устойчивости рассмотренных стержней при осевом сжатии. При жестком закреплении краев стержня найдена формула для определения критической нагрузки. Анализ численных расчетов показывает, что свойства неоднородности материала элемента может оказать существенное влияние на значения критических параметров элемента.

Список литературы: **1.** Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А. С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.**2.** *Ломакин, В. А.* Теория упругости неоднородных тел [Текст] / *В. А. Ломакин.* – М.: изд – во МГУ, 1978. – 245 с.**3.** *Алфутов, Н. А.* Расчеты многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов [Текст] / *Н. А. Алфутов, П. А. Зиновьев, Б. Г. Попов.* – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с. **4.** *Isayev, F. Q.* Bending and stability of nonhomogeneous nano-micro elements based on nonlocal elasticity theory Eringen.Journal of Qafqaz University [Text] / *F. Q. Isayev, V. Q. Radjabov* // Mechanical and Industrial Engineering. – 2015. – Vol. 3, No 1. – pp. 80–85. **5.** *Reddy, J. N.* Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams [Text] / *J. N. Reddy* // İnternational Journal of Engineering Science. –2007. – Vol. 45. – pp. 288–307. **6.** *Reddy, J. N.* Nonlocal continuum theories of beams for the analysis of carbon nanotubes [Text] / J. N. Reddy, S. D. Pang // Journal of Applied Physics. – *2008.* – No 103(2). – pp. 023511-1–023511-16. **7.** *Naderi, A.* Nonlocal postbuckling analysis of graphene shects in a nonlinear polymer medium [Text] / *A. Naderi, R. Saidi* // İnternational Journal of Engineering Science. – 2014. – Vol. 81. – pp. 49–65. **8.** *Rahman, O.* Analysis and modeling the size effect on vibration of functionally graded nanobeams based on nonlocal Timoshenko beam theory [Text] / *O. Rahman, O. Pedram* // İnternational Journal of Engineering Science. – 2014. – Vol. 77. – pp. 55–70. **9.** *Ashrafi, M. Zenkour.* Abouelregal.Vibration of FG nanobeams induced by sinusoidal pulse-heating vian a nonlocal thermoelastic model [Text] / *M. Zenkour Ashrafi, E. Ahmed* // Journal Acta Mechanica. – 2014. – Vol. 225, No 12. – pp. 3409–3421. **10.** Keivan, Kiani. Axial buckling analysis of vertically aligned ensembles of single-walled carbon nanotubes using nonlocal discrete and continuous models [Text] / Keivan Kiani // Journal Acta Mechanica. – 2014. – Vol. 225, No 12. – pp. 3569–3589. **11.** *Reddy, J. N.* Eringens nonlocal theories of beams accounting for moderate rotations [Text] / *J. N. Reddy, El-Borgi Sami* // İnternational Journal of Engineering Science. – 2014. – Vol. 82. – pp. 159–177. **12.** *Ghorbanpour, Arani A.* Nonlinear vibration of conpled nano and microstrustures convenying fluid based on Timoshenko beam model under two dimensional magnetic field [Text] / *Arani A. Ghorbanpour, P. Dashti, S. Amir, M. Yousefi //* Journal Acta Mechanica. – 2015. – Vol. 226, No 8. – pp. 1737–1756. **13.** *Dai, H. I.* On nonlinear behavior an buckling of fluid-transporting nanotubes [Text] / *H. I. Dai, L. Wang, A. Abdelkefi, Q. Ni* // İnternational Journal of Engineering Science. – 2015. – Vol. 87. – pp.13–22. **14.** *Amir, Mehdi* Dehrouyen-Semnami,Mohammad Dehrouyen,Mostafa Torabi-Kafshgari,Mansour Nikkhah-Bahrami.Adamped sandwich beam model based on symmetric-deviatoric couple stress theory [Text] / *Amir Mehdi* // İnternational Journal of Engineering Science. – 2015. – Vol. 92. – pp. 83-94. **15.** *Li, Li.* Buckling analysis of size-dependent nonlinear beams based on a nonlocal strain gradient theory [Text] / *Li Li, Yu Jin Hu.* // International Journal of Engineering Science. – 2015. – Vol. 97. – pp. 84–94.

Bibliography (transliterated): **1.** *Volmir, A. S.* (1967). Ustojchivost deformiruemyx sistem. Moscow: Nauka, 984. **2.** *Lomakin, V. A.* (1978). Teoriya uprugosti neodnorodnyx tel. Moscow: izd – vo MGU, 245. **3.**

Alfutov, N. A. Zinovev, P. A., Popov, B. G. (1984). Raschety mnogoslojnyx plastin i obolochek iz kompozicionnyx materialov. Moscow: Mashinostroenie, 264. **4.** *Isayev, F. Q., Radjabov, V. Q.* (2015). Bending and stability of nonhomogeneous nano-micro elements based on nonlocal elasticity theory Eringen.Journal of Qafqaz University. Mechanical and Industrial Engineering, Vol. 3, No 1, 80–85. **5.** *Reddy, J. N.* (2007). Nonlocal theories for bending, buckling and vibration of beams. İnternational Journal of Engineering Science, Vol. 45, 288–307. **6.** *Reddy, J. N., Pang, S. D.* (2008). Nonlocal continuum theories of beams for the analysis of carbon nanotubes. Journal of Applied Physics, No 103(2), 023511-1–023511-16. **7.** *Naderi, A., Saidi, R.* (2014). Nonlocal postbuckling analysis of graphene shects in a nonlinear polymer medium. İnternational Journal of Engineering Science, Vol. 81, 49–65. **8.** Rahman, O., Pedram, O. (2014). Analysis and modeling the size effect on vibration of functionally graded nanobeams based on nonlocal Timoshenko beam theory. İnternational Journal of Engineering Science, Vol. 77, 55–70. **9.** *Ashrafi, M. Zenkour, Ahmed, E.* (2014). Abouelregal.Vibration of FG nanobeams induced by sinusoidal pulse-heating vian a nonlocal thermoelastic model. Journal Acta Mechanica, Vol. 225, No 12, 3409–3421. **10.** *Keivan, Kiani.* (2014). Axial buckling analysis of vertically aligned ensembles of single-walled carbon nanotubes using nonlocal discrete and continuous models. Journal Acta Mechanica, Vol. 225, No 12, 3569–3589. **11.** *Reddy, J. N., Sami, El-Borgi.* (2014). Eringens nonlocal theories of beams accounting for moderate rotations. İnternational Journal of Engineering Science, Vol. 82, 159–177. **12.** *Ghorbanpour, Arani A., Dashti, P., Amir, S., Yousefi, M.* (2015). Nonlinear vibration of conpled nano and microstrustures convenying fluid based on Timoshenko beam model under two dimensional magnetic field. Journal Acta Mechanica, Vol. 226, No 8, 1737–1756. **13.** *Dai, H. I., Wang, L., Abdelkefi, A., Ni, Q.* (2015). On nonlinear behavior an buckling of fluid-transporting nanotubes. İnternational Journal of Engineering Science, Vol. 87, 13–22. **14.** *Amir, Mehdi.* (2015). Dehrouyen-Semnami,Mohammad Dehrouyen,Mostafa Torabi-Kafshgari,Mansour Nikkhah-Bahrami.Adamped sandwich beam model based on symmetric-deviatoric couple stress theory. İnternational Journal of Engineering Science, Vol. 92, 83-94. **15.** *Li, Li, Yu, Jin Hu.* (2015). Buckling analysis of size-dependent nonlinear beams based on a nonlocal strain gradient theory. International Journal of Engineering Science, Vol. 97, 84–94.

Поступила (received) 12.12.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Исаев Фахраддин Курбан оглы – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедры “Математика и информатика”, Университет Гафгаз, ул. Гасан Алиева, 120, г. Хырдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

Ісаєв Фахраддін Гурбан огли – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри "Математика та інформатика", Університет Гафгаз, вул. Гасан Алієва, 120, м. Хирдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

Isayev Fakhraddin Gurban oglu – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Head of the Department "Mathematics and Informatics", Qafqaz University, ul. Hasan Aliyev, 120, Khirdalan city, Baku, Absheron, Azerbaijan, AZ0101

Раджабов Вугар Газанфар оглы – докторант кафедры “Инженерная механика” Университет Гафгаз, ул. Гасан Алиева, 120, г. Хырдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

Раджабов Вугар Газанфар огли – докторант кафедри "Інженерна механіка" Університет Гафгаз, вул. Гасан Алієва, 120, м. Хирдалан, Баку, Абшерон, Азербайджан, AZ0101

Rajabov Vugar Ghazanfar ogly – PhD in "Mechanical Engineering" Qafqaz University, ul. Hasan Aliyev, 120, Khirdalan city, Baku, Absheron, Azerbaijan, AZ0101

УДК 616-073.55, 616-073.582, 616-073.65

В .П. МАСЛОВ**, **П. М. ЛИТВИН**, **Т. А. ТУРУ, А. А. КОРЧОВИЙ,Н. В. КАЧУР, А. В. ГУРІН

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ ПЛІВКОВОГО НАГРІВАЧА НА ОСНОВІ ПРОЗОРОЇ ЕЛЕКТРОПРОВІДНОЇ ПЛІВКИ ІТО

Встановлено, що напилене магнетронним способом на скляний зразок віконного флоат - скла прозоре електропровідне ІТО покриття може мати топологічну структурну неоднорідність товщин, шорсткості, розміру зерен та механічних напружень, яка при нагріванні проявляється в нерівномірності температурного поля на ньому. Рекомендується у виробництві віконного скла з ІТО-покриттям проводити поляризаційний контроль механічних напружень в зразках готової продукції.

Ключові слова: тонкоплівковий прозорий нагрівач, нанопокриття окис «індію – олова», флоат-скло, , атомно-силова мікроскопія, термографія, механічні напруження, поляризаційний оптичний контроль.

Вступ. Тонкоплівкові прозорі електропровідні покриття на скляній поверхні на основі оксиду олова та індію (ІТО) використовуються в мікроелектроніці та «сонячній» енергетиці.

В конструкціях сонячних батарей такі покриття можуть використовуватись як ізолюючі для уникнення шунтування структур приладу [0] або при інших співвідношеннях компонентів в якості електричних контактів в екранах дисплеїв, а також для нагрівання цих дисплеїв з метою забезпечення їх роботи при мінусових температурах [0, 0]. Ці покриття використовуються також в якості нагрівальних елементів для видалення крапель вологи на об’єктивах оптичних приладів.

Одним з актуальних напрямків використання ІТО є енергозбереження в комунальному господарстві, а саме в якості тепловідбиваючого покриття ІТО для стекол, завдяки якому відбувається зменшення теплопередачі випромінюванням із побутових приміщень на вулицю. Тепловідбиваючі плівки мають здатність пропускати короткохвильову сонячну радіацію в діапазоні від 0,4 до 2,5 мкм і майже повністю (до 80-90 %) відбивають довгохвильову теплову інфрачервону радіацію в діапазоні від 2,5 до 25 мкм, яка і є основним компонентом теплових втрат. Для порівняння: