

УДК 620.2:667.63

Ємченко І.В., Передрій О.І.

Луцький національний технічний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗАХИСНОГО ПОКРИТТЯ

У статті проаналізовано зміни стану захисного покриття, які відбуваються при нагріванні. Методом математичного розрахунку визначено оптимальне значення товщини вогнестійкого захисного покриття на основі поліалюмосилоксану, яке наноситься на металеві конструкційні вироби.

Постановка проблеми у загальному вигляді і її зв'язок з важливими науковими та практичними завданнями. Захисні покриття спеціального призначення (температуро- та вогнезахисні, атмосферостійкі та ін.) широко використовуються в сучасному будівництві, промисловості. Поряд з існуючими, розробляються нові композиції для отримання захисних покриттів з покращеним комплексом властивостей. Зокрема, в останні роки все більше використовуються захисні покриття на основі силіційорганічних сполук. Для даних покриттів характерні високі показники захисних властивостей, легкість нанесення та довговічність. Проте, існує проблема визначення оптимальної товщини нанесення, при якій покриття зберігало свої експлуатаційні властивості.

Аналіз останніх досліджень, у яких започатковане вирішення проблеми. Дослідження захисних покриттів на основі наповнених силіційорганічних сполук проводять вчені матеріалознавці, механіки, а також і товаровознавці, оскільки, готові композиції для отримання покриттів класифікують як лакофарбові товари. Визначення впливу хімічного складу композиції, фізико-хімічних змін в покритті під час нанесення та експлуатації забезпечить можливість отримання високоефективних покриттів з прогнозованим комплексом характеристичних властивостей, завдяки чому можна розширити асортимент захисних покриттів, більш повно задовольнити потреби споживачів, підвищити довговічність та надійність будівельних конструкцій, конструкційних матеріалів та виробів з них. Дослідження в даній області проводяться вченими Свідерським В.А., Гивлюдом М.М., Ємченко І.В., Мережко Н.В., яким вдалося розкрити механізми формування структури покриття та перехідного шару на межі «покриття-підкладка», розробити ефективні вихідні композиції для покриттів та оцінити вплив кожної складової на властивості готового продукту [1,2].

Цілі статті. Користуючись методом математичного розрахунку, визначити оптимальну товщину нанесення захисного покриття на основі поліалюмосилоксану.

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Дослідження були проведені для покриття на основі наповненого оксидами (Al_2O_3 , ZrO_2), силікатними компонентами (каолін, каолінове волокно) та мінералізатором (TiO_2) поліалюмосилоксану [3]. Для визначення оптимального значення товщини захисного покриття, використано метод математичного розрахунку. Як досліджуваний матеріал використовували сталь Ст3кп.

З метою визначення та дослідження напружено-деформованого стану покриття циліндрична деталь з покриттям моделюється двошаровим коаксіальним циліндром з отвором радіуса R_0 (рис.1).

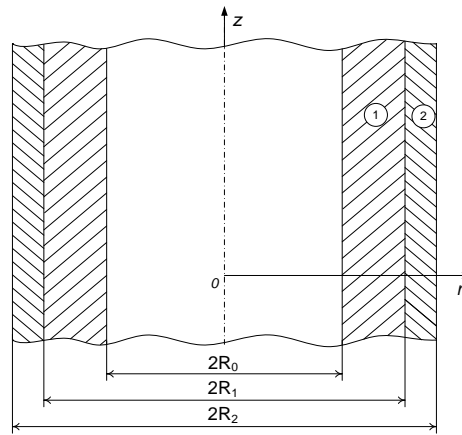


Рис. 1. Осьовий переріз двошарового циліндра

Для аналітичних досліджень виберемо циліндричну систему координат z, r, φ . При нагріванні деталь і покриття збільшують свої розміри за рахунок ТКЛР. Переміщення їх значень у напрямку вісі r (радіальне переміщення) позначимо через U .

Радіальне переміщення можна знайти, розв'язавши диференціальне рівняння (1):

$$\frac{d^2 U_i}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_i}{dr} - \frac{U_i}{r^2} = \frac{1 + \mu_i}{1 - \mu_i} \cdot \alpha_t^{(i)} \cdot \frac{dt}{dr}, \quad (1)$$

де U_i – переміщення i -го шару;

$i = 1, 2$ – кількість шарів;

t – температура;

$\alpha_t^{(i)}$ – коефіцієнт температурного лінійного розширення;

μ_i – коефіцієнт Пуассона.

Значення, які відносяться до деталі будемо позначати індексом «1», а до покриття – індексом «2». Для знаходження розв'язку рівняння (1) проінтегруємо його двічі за r . В результаті одержимо:

$$U_i = A_i \cdot r + \frac{B_i}{r} + \frac{1 + \mu_i}{1 - \mu_i} \cdot \alpha_t^{(i)} \cdot \frac{1}{r} \cdot \int_{R_i}^r t \cdot r dr, \quad (2)$$

де A_i, B_i – сталі інтегрування ($i = 1, 2$), які знаходяться із граничних умов.

При нагріванні деталь і покриття змінюють свої розміри залежно від їх фізико – механічних характеристик ($E_i, \alpha_t^{(i)}, \mu_i$), оскільки між деталлю і покриттям утворився ідеальний механічний і тепловий контакт, тому на поверхні їх контакту виникають температурні напруження, які можуть обумовити руйнування покриття і деталі.

Для знаходження напружень, що діють у радіальному σ_r , кільцевому σ_φ та осьовому σ_z напрямках з врахуванням виразу для переміщень (2), скористаємося виразами:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(i)} &= -\frac{\alpha_t^{(i)} \cdot E_i}{1 - \mu_i} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_{R_i}^r t \cdot r dr + \frac{E_i}{1 + \mu_i} \cdot \left[\frac{A_i}{1 - 2\mu_i} - \frac{B_i}{r^2} \right], \\ \sigma_\varphi^{(i)} &= \frac{\alpha_t^{(i)} \cdot E_i}{1 - \mu_i} \cdot \frac{1}{r^2} \cdot \int_{R_i}^r t \cdot r dr + \frac{E_i}{1 + \mu_i} \cdot \left[\frac{A_i}{1 - 2\mu_i} + \frac{B_i}{r^2} \right] - \frac{\alpha_t^{(i)} \cdot E_i \cdot t}{1 - \mu_i}, \\ \sigma_z^{(i)} &= \varepsilon_{zi} \frac{E_i (1 - \mu_i)}{(1 + \mu_i)(1 - 2\mu_i)} + A_i \frac{2E_i \mu_i}{(1 + \mu_i)(1 - 2\mu_i)} - \frac{E_i \alpha_t^{(i)} T(r)}{(1 - \mu_i)}, \end{aligned} \quad (3)$$

де E_i – модуль Юнга;

μ_i – коефіцієнт Пуассона;

$\alpha_i^{(i)}$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення для заданих матеріалів;

$i = 1, 2$.

Постійні інтегрування A_i, B_i знайдемо з рівності переміщень (2) і радіальних напружень (σ_r) (3) на стику деталі і покриття, а також рівності нулю радіальних напружень при $r=R_0$ і $r=R_2$. Тобто:

$$\begin{aligned} \sigma_r^{(1)} &= 0 && \text{при } r=R_0 \\ U_1 &= U_2, \quad \sigma_r^{(1)} = \sigma_r^{(2)} && \text{при } r=R_1, \\ \sigma_r^{(2)} &= 0 && \text{при } r=R_2 \end{aligned} \quad (4)$$

Підставивши вирази (2) і (3) в умови (4) одержимо систему алгебраїчних рівнянь, яку розв'яжемо методом Крамера.

$$M := \begin{bmatrix} d_1 & 0 & -c_1 & 0 & L_1 & 0 \\ d_1 & -d_2 & -c_2 & c_3 & L_1 & -L_2 \\ 1 & -1 & \frac{1}{(R_1)^2} & -\frac{1}{(R_1)^2} & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 & -c_4 & 0 & L_2 \\ h_1 & h_2 & 0 & 0 & h_3 & h_4 \\ p_1 & -p_2 & 0 & 0 & p_3 & -p_4 \end{bmatrix} \quad v := \begin{pmatrix} k_1 \\ k_2 \\ -k_3 \\ k_4 \\ k_5 \\ k_6 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} d_1 &= \frac{E_1}{(1+\mu_1) \cdot (1-2\mu_1)}, & d_2 &= \frac{E_2}{(1+\mu_2) \cdot (1-2\mu_2)}, & c_1 &= \frac{E_1}{R_0^2(1+\mu_1)}, \\ S_1 &= \frac{(1+\mu_1)}{(1-\mu_1)} \cdot \alpha_t^{(1)}, & S_2 &= \frac{(1+\mu_2)}{(1-\mu_2)} \cdot \alpha_t^{(2)}, & c_2 &= \frac{E_1}{R_1^2(1+\mu_1)}, \\ c_3 &= \frac{E_2}{R_1^2(1+\mu_2)}, & c_4 &= \frac{E_2}{R_2^2(1+\mu_2)}, & I_{01} &= t_0 \cdot \left(\frac{R_1^2 - R_0^2}{2}\right), \\ L_1 &= \frac{E_1 \cdot \mu_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)}, & L_2 &= \frac{E_2 \cdot \mu_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)}, & I_{12} &= t_0 \cdot \left(\frac{R_2^2 - R_1^2}{2}\right), \\ h_1 &= \frac{(R_1^2 - R_0^2) E_1 \cdot \mu_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)}, & h_2 &= \frac{(R_2^2 - R_1^2) E_2 \cdot \mu_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)}, \\ h_3 &= \frac{(R_1^2 - R_0^2)(1-\mu_1) E_1}{2 \cdot (1+\mu_1)(1-2\mu_1)}, & h_4 &= \frac{(R_2^2 - R_1^2)(1-\mu_2) E_2}{2 \cdot (1+\mu_2)(1-2\mu_2)}, \\ p_1 &= \frac{(R_1^2 - R_0^2) \mu_1}{(1+\mu_1)(1-2\mu_1)}, & p_2 &= \frac{(R_2^2 - R_1^2) \mu_2}{(1+\mu_2)(1-2\mu_2)}, \\ p_3 &= \frac{(R_1^2 - R_0^2)(1-\mu_1)}{2 \cdot (1+\mu_1)(1-2\mu_1)} + \frac{(R_1^2 - R_0^2)}{2}, & p_4 &= \frac{(R_2^2 - R_1^2)(1-\mu_2)}{2 \cdot (1+\mu_2)(1-2\mu_2)} + \frac{(R_2^2 - R_1^2)}{2}, \\ k_2 &= \frac{E_1 \cdot \alpha_t^{(1)} \cdot I_{01}}{R_1^2(1-\mu_1)}, & k_3 &= \frac{(1+\mu_1) \cdot \alpha_t^{(1)} \cdot I_{01}}{R_1^2(1-\mu_1)}, \\ k_4 &= \frac{E_2 \cdot \alpha_t^{(2)} \cdot I_{12}}{R_2^2(1-\mu_2)}, & k_5 &= \frac{E_2 \cdot \alpha_t^{(2)} \cdot I_{12}}{(1-\mu_2)} + \frac{E_1 \cdot \alpha_t^{(1)} \cdot I_{01}}{(1-\mu_1)}, \end{aligned}$$

$$k_6 = \frac{\alpha_t^{(1)} \cdot I_{01}}{(1 - \mu_1)} - \frac{\alpha_t^{(2)} \cdot I_{12}}{(1 - \mu_2)}$$

Розв'язавши вказану систему (5), знайдемо значення постійних A_1 , A_2 , B_1 та B_2 . Підставивши їх у вирази (3) знаходимо величини напружень (σ_r , σ_φ , σ_z) в залежності від радіуса r . Розраховані напруження зображенні графічно на рис. 2 – 5.

Для розрахунків приймалися такі значення фізико-механічних характеристик матеріалу деталі і покриття:

для деталі (сталь СтЗкп):

$$E_1 = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$$\mu_1 = 0,3$$

$$\alpha_t^{(1)} = 14 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

для покриття:

$$E_2 = 2,5 \cdot 10^{11} \text{ Па}$$

$$\mu_2 = 0,25$$

$$\alpha_t^{(2)} = 5,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$$

Внутрішній радіус деталі дорівнює $R_0 = 26 \cdot 10^{-3}$ м, зовнішній радіус $R_1 = 32 \cdot 10^{-3}$ м. Товщина покриття змінювалась у межах $0,1 \cdot 10^{-3} \leq R_2 - R_1 \leq 0,4 \cdot 10^{-3}$ м. Температура деталі і покриття приймалась постійною і рівною: 1) $t = 973$ К; 2) $t = 1373$ К.

На рис. 2 показана зміна величини температурних напружень σ_r , σ_φ , σ_z за товщиною деталі і покриття, за температури нагрівання $T = 1373$ К і $T = 973$ К. Величини напружень, обумовлених нагріванням до температури 1373 К, зображені суцільною лінією, а до 973 К – штриховою. Товщина покриття приймалась $R_2 - R_1$ рівною $0,3 \cdot 10^{-3}$ м. Аналіз графіків показує, що найбільші напруження виникають на поверхні контакту деталі і покриття. При тому найбільші за значенням є осьові напруження σ_z (рис. 2 в). В деталі вони є стискаючими, а у покритті – розтягуючими.

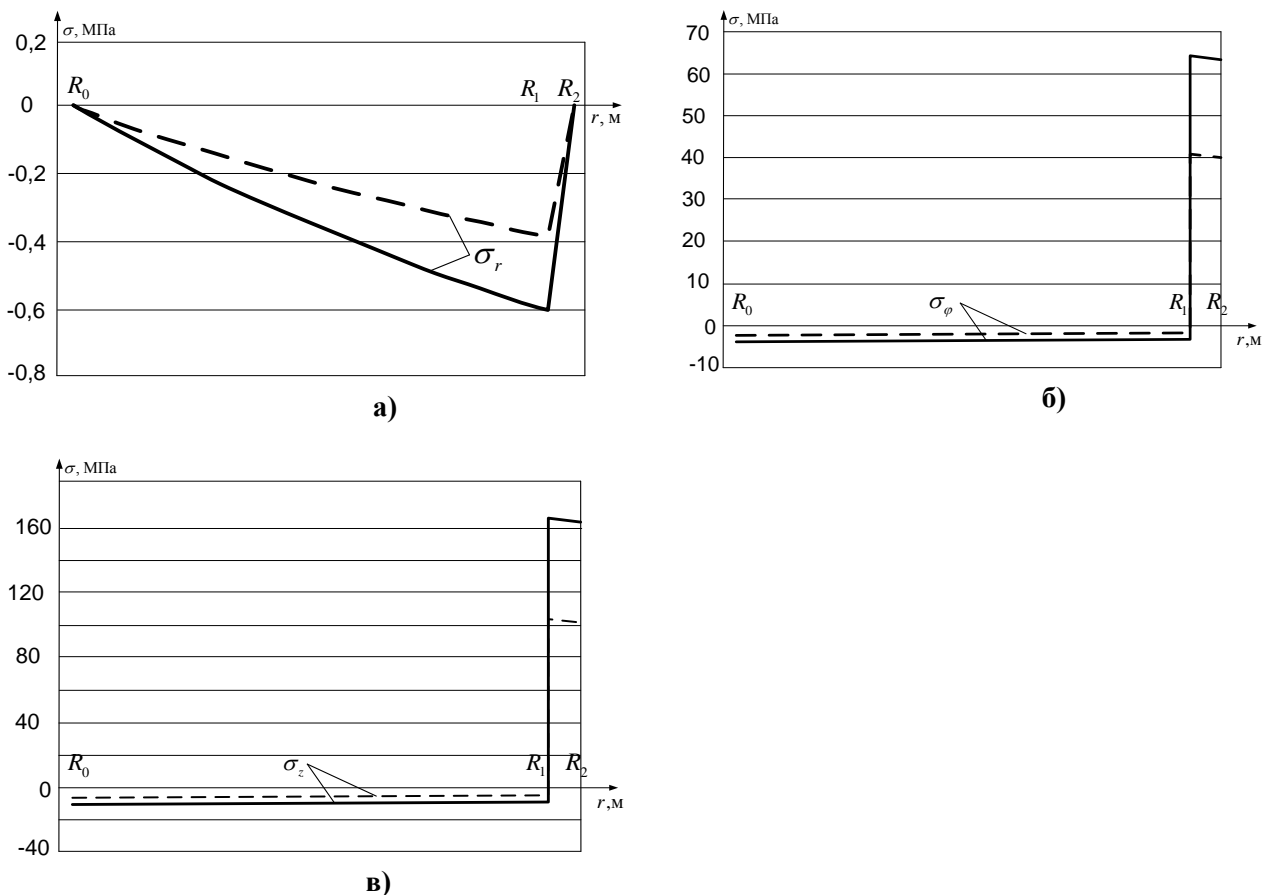


Рис. 2. Зміна температурних напружень за товщиною деталі і покриття у напрямі: а – радіальному σ_r ; б – кільцевому σ_φ ; в – осьовому σ_z

На рис. 3 зображена зміна температурних напружень σ_r і σ_φ у покритті на поверхні контакту з деталлю.

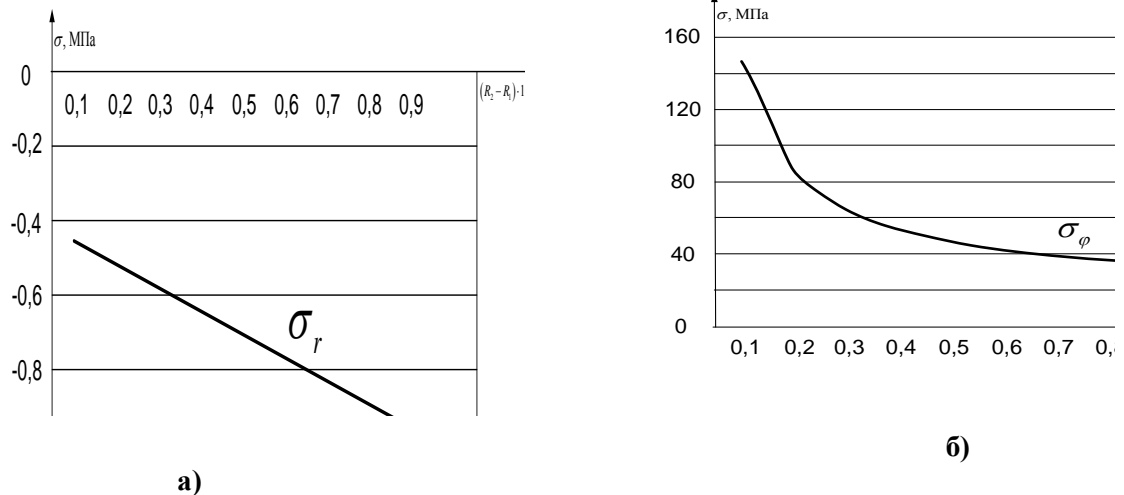


Рис.3. Температурна залежність напружень на поверхні покриття у напрямках: а – радіальному σ_r ; б – кільцевому σ_φ

Як видно з рис. 3 із збільшенням товщини покриття напруження σ_r – збільшуються, а напруження σ_φ – зменшуються.

На рис.4 показана зміна температурних напружень σ_z в деталі (а) і покритті (б) залежно від товщини покриття.

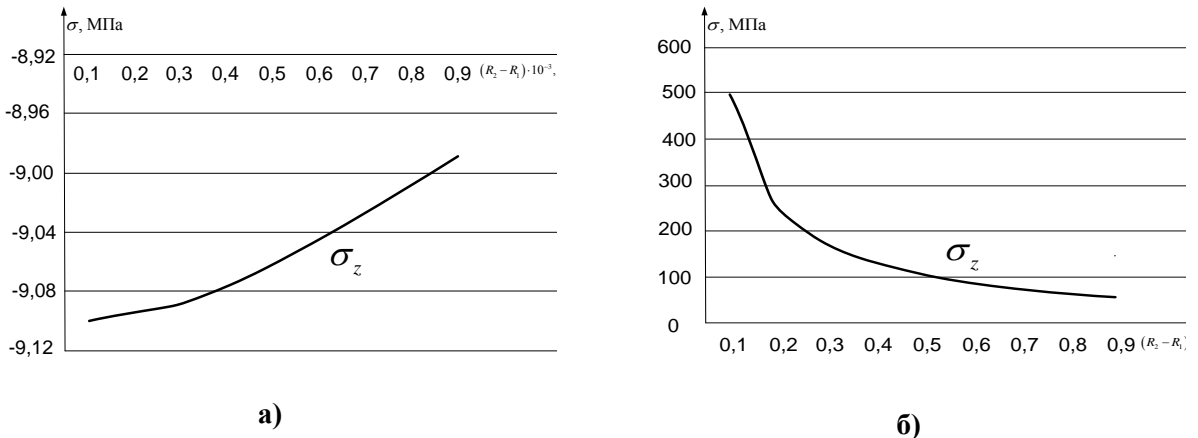


Рис. 4. Залежність температурних напружень в деталі і покритті на поверхні контакту від товщини покриття: а – в деталі $\sigma_z^{(1)}$ при $r=R_1$; б – в покритті $\sigma_z^{(2)}$ при $r=R_1$

Аналіз цих графіків показує, що із збільшенням товщини покриття напруження значно зменшуються.

На рис. 5 показана залежність величини напружень σ_z в деталі ($\sigma_z^{(1)}$) і покритті $\sigma_z^{(2)}$ на поверхні їх контакту від товщини покриття.

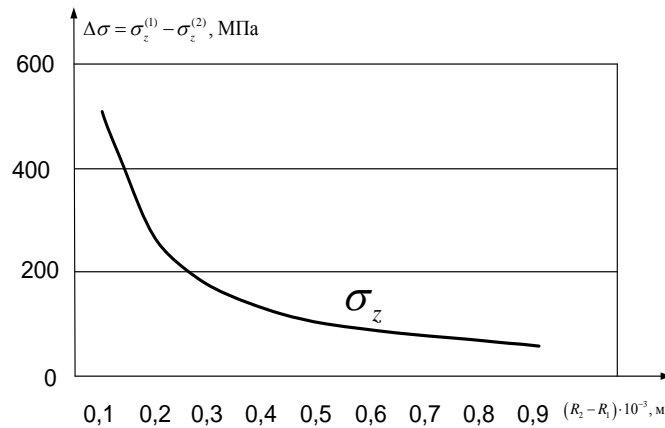


Рис. 5. Залежність зміни величини напружень σ_z на межі контакту «покриття-підкладка» від товщини покриття

Аналіз приведених графіків на рисунках показує, що напруження σ_r і σ_φ на поверхні контакту є стискаючими і із збільшенням товщини покриття зростають за величиною. Напруження σ_z є розтягуючи ми та із збільшенням товщини покриття від 0,1 до 0,4 мм значно зменшуються. Оскільки напруження σ_z (розтягу) за величиною значно більші за напруження σ_r і σ_φ (стиску), то оптимальною товщина покриття буде за таких значень $0,2 \leq R_2 - R_1 \leq 0,5$ мм [4].

Висновки. Розрахунковим методом встановлено, що мінімальні значення термодинамічних напружень у захисних покриттях на основі поліалюмосилоксану виникають за температури нагрівання до 1473 К зі швидкістю 20 град/хв та за товщини покриття 200...500 мкм, яка рекомендується для подальшого нанесення на будівельні конструкційні матеріали.

Література:

1. Ємченко І. В. Шляхи регулювання властивостей оксидної кераміки, одержаної із наповнених силіційорганічних композицій / І. В. Ємченко, М. М. Гивлюд // Вісник Донецького державного університету економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського (технічні науки). – 2006. – № 1. – С. 148–152.
2. Сви́дерский В. А. Полифункциональные кремнийорганические защитные покрытия на основе оксидов и силикатов / В. А. Сви́дерский. – Киев, 1987. – 466 с.
3. Пат. на корисну модель № 42264 України, МПК C09D 5/18. Композиція для терможаростійкого захисного покриття / І. В. Ємченко, О.І. Передрій, М. М. Гивлюд (Україна) ; Луцький нац. технічн. ун-т. – и 2009 01215 ; заявл. 16.02.2009 ; опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12 – 4 с.
4. Каріян В. Визначення напружено-деформованого стану кріплень гідротурбін / Каріян В., Сулим Г., Пастернак Я. // Сучасні проблеми механіки та математики . – Львів. – 2008 (Т. 2.) – С. 276–278.