

УДК 539.3; 621.793

Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук
ОЦІНКА МІЦНОСТІ ДВОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ
ПІД ЛОКАЛЬНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Розроблено інженерну методику розрахунку напруженого стану та міцності двошарових покриттів під дією локального довільно орієнтованого навантаження. Проведено оцінку допустимих навантажень для сталевих деталей, вкритої композицією алюміній – оксид алюмінію.

Ключові слова: двошарове покриття, напруження, міцність, локальне навантаження.

Рис. 5. Форм. 7. Літ. 6.

Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук
ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ДВУХСЛОЙНОГО ПОКРЫТИЯ
ПОД ЛОКАЛЬНОЙ НАГРУЗКОЙ

Разработана инженерная методика расчета напряженного состояния и прочности двухслойного покрытия под действием локальной произвольно ориентированной нагрузки. Выполнена оценка допустимых нагрузок для стальной детали, покрытой композицией алюминий – оксид алюминия.

Ключевые слова: двухслойное покрытие, напряжение, прочность, локальная нагрузка.

L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, M. V. Makoviichuk
STRENGTH ESTIMATION OF TWO-LAYER COATING UNDER LOCAL LOAD

The problems of the two-layer coating strength under the local arbitrarily oriented load caused by the final machining of a covered part or its interaction with abrasive particles during the operation period have been studied. The engineering methods of calculating the stress state and permissible load at which the hard coating layer is modelled by the plate in conditions of bending with tension (compression) and a ductile part of the coating is considered as a Winkler layer with a linear connection between tensions and displacements have been developed.

The stress state of a plate and underlayer by the load, distributed along a line, has been studied. The equivalent stresses in the layers have been calculated according to von Mises` theory. The assessment of allowable loads for a steel part, covered with the system aluminum – aluminum oxide has been made.

Key words: two-layer coating, stress, strenght, local load.

Вступ. Успішна експлуатація машин, механізмів та обладнання в умовах контактних навантажень від спряжених деталей і взаємодії з агресивним чи абразивним середовищем в значній мірі залежить від стану і структури поверхневих шарів. Одним із шляхів поверхневого зміцнення виробів є нанесення функціонально градієнтних покриттів, компоненти яких призначені для виконання різних завдань. До таких неоднорідних структур належать, зокрема, двошарові покриття системи $Al - Al_2O_3$, які формують на поверхні деталей із сталі або інших сплавів [1, 2]. Верхній (оксидний) шар характеризується високою твердістю і забезпечує захист від зношування, а нижній (алюмінієвий) гарантує належний зв'язок із основою, а також сприяє захисту сталі від наводнення в агресивних середовищах. Такі покриття отримують нанесенням на основу шару алюмінію чи сплаву будь-яким відомим методом (газотермічним напиленням, плакуванням, гальванічним способом тощо) і наступним формуванням верхнього оксидного шару мікродуговим (плазмоелектролітичним) оксидуванням.

Відомі публікації з цієї тематики [1, 3, 4] не у повній мірі забезпечують розуміння впливу структури та механічних властивостей компонент двошарового покриття на величину граничних навантажень. Особливо це стосується локалізованих у просторі навантажень, які спричинені дією лезового чи шліфувального інструменту під час фінішної механічної обробки деталі або є наслідком взаємодії з абразивними частинками в контактні під час експлуатації.

Мета цього повідомлення – розробити інженерну методику розрахунку напруженого стану та міцності двошарових покриттів під локальним довільно орієнтованим навантаженням.

Постановка задачі. Розглянемо нанесене на плоску деталь композиційне покриття, яке складається з доволі жорсткого шару завтовшки h_c (власне, покриття) та з податливого шару завтовшки h_o – підкладки (рис. 1). Верхній шар моделюємо пластиною, яка працює на розтяг (стиск) та згин; підкладку трактуємо як прошарок, що підкоряється гіпотезам Вінклера про пропорційність напружень і пружних переміщень. Для простоти основа приймається абсолютно жорсткою. Механічний контакт між компонентами на границях спряжень вважається ідеальним. Композиція навантажена довільно орієнтованими силами P (Н/м), рівномірно розподіленими

вздовж прямої вглиб рисунка. Крім того, припускаємо стан плоскої деформації ($\varepsilon_z = 0$). Слід вивчити розподіл напружень у двошаровій композиції та встановити рівень допустимого локального навантаження.

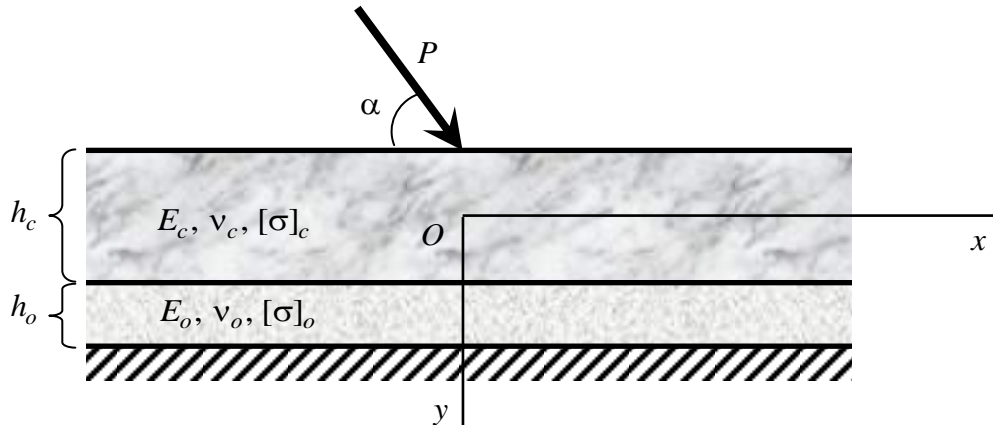


Рис. 1. Двошарове покриття під довільно орієнтованим навантаженням

За прийнятих припущень запишемо рівняння рівноваги покриття на пружній основі:

$$B \frac{d^2 u_x}{dx^2} - k_x u_x = -X \delta(x),$$

$$D \frac{d^4 u_y}{dx^4} - k_y u_y = Y \delta(x), \quad x \in \mathbf{R}^2. \quad (1)$$

Тут u_x, u_y – компоненти вектора пружного переміщення серединної поверхні пластини; $X = P \cos \alpha, Y = P \sin \alpha$; $\delta(x)$ – функція Дірака; $B = E_c h_c / (1 - \nu_c^2), D = E_c h_c^3 / (12(1 - \nu_c^2))$ – жорсткості на розтяг та згин; $k_x = G_o / h_o = E_o / (2(1 + \nu_o)h_o), k_y = E_o / h_o$ – коефіцієнти постелі; E_c, ν_c і E_o, ν_o – модуль Юнга та коефіцієнт Пуассона матеріалів покриття і підкладки відповідно.

На безмежності зусилля та моменти загасають:

$$B \frac{du_x}{dx}(\pm\infty) = 0, \quad D \frac{d^2 u_y}{dx^2}(\pm\infty) = 0, \quad D \frac{d^3 u_y}{dx^3}(\pm\infty) = 0. \quad (2)$$

Побудова розв’язку. Розв’язок крайової задачі (1), (2) знайшли у вигляді:

$$u_x(x) = \frac{X}{2B\lambda_x} e^{-\lambda_x |x|},$$

$$u_y(x) = \frac{Y}{8D\lambda_y^3} e^{-\lambda_y |x|} (\cos \lambda_y x + \sin \lambda_y |x|), \quad (3)$$

де $\lambda_x = \sqrt{\frac{k_x}{B}}, \lambda_y = \sqrt{\frac{k_y}{B}}$ – коефіцієнти защемлення з розмірністю, оберненою до довжини.

Переміщенням (3) відповідають зусилля та моменти в покритті:

$$N(x) = \frac{X}{2} \operatorname{sgn} x e^{-\lambda_x |x|},$$

$$M(x) = \frac{Y}{4\lambda_y} e^{-\lambda_y |x|} (\cos \lambda_y x - \sin \lambda_y |x|).$$

Зокрема, для напружень у підшві покриття ($y = h_c / 2$) дістали вираз

$$\sigma_x = \frac{N}{h_c} + \frac{6M}{h_c^2} = \frac{X}{2h_c} \operatorname{sgn} x e^{-\lambda_x |x|} + \frac{3Y}{2h_c^2 \lambda_y} e^{-\lambda_y |x|} (\cos \lambda_y x - \sin \lambda_y |x|). \quad (4)$$

Напруження у підкладці такі:

$$\begin{aligned}\tau_{xy} &= k_x u_x = \frac{X}{2} \lambda_x e^{-\lambda_x |x|}, \\ \sigma_y &= -k_y u_y = -\frac{Y}{2} \lambda_y e^{-\lambda_y |x|} (\cos \lambda_y x + \sin \lambda_y |x|).\end{aligned}\quad (5)$$

Міцність кожного з шарів оцінимо за критерієм Мізеса. Так, умова міцності для плоско деформованого покриття буде:

$$\sigma_{eq}(x) \equiv \sqrt{(1 - \nu_c + \nu_c^2)(\theta_x^2 + \theta_y^2) - (1 + 2\nu_c - 2\nu_c^2)\sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2} \leq [\sigma]_c, \quad (6)$$

а для вінклерової підкладки –

$$\sigma_{eq}(x) \equiv \sqrt{\sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2} \leq [\sigma]_o. \quad (7)$$

Тут $[\sigma]_c$, $[\sigma]_o$ – допустимі напруження для матеріалів покриття та підкладки.

Аналіз результатів. Здобуті аналітичні результати (4)–(7) аналізували для двошарової композиції, яка складається із оксидалюмінієвого покриття з параметрами: $h_c = 1$ мм, $E_c = 350$ ГПа, $\nu_c = 0,34$, $[\sigma]_c = 340$ МПа та алюмінієвої підкладки з параметрами: $h_o = 0,2$ мм, $E_o = 70$ ГПа, $\nu_o = 0,30$, $[\sigma]_o = 85$ МПа.

Характерні безрозмірні комплекси будуть:

$$\begin{aligned}\frac{h_o}{h_c} &= 0,2; \quad \frac{E_o}{E_c} = 0,2; \quad \frac{[\sigma]_o}{[\sigma]_c} = 0,25; \\ \lambda_x h_c &= \sqrt{\frac{E_o h_c}{E_c h_o} \frac{1 - \nu_c^2}{2(1 + \nu_o)}} \approx 0,592; \quad \lambda_y h_c = 4 \sqrt{\frac{E_o h_c}{E_c h_o} 3(1 - \nu_c^2)} \approx 1,285.\end{aligned}$$

Картина напруженого стану композиції за різних кутів орієнтації (α) навантаження подана на рис. 2–4. У пропонованій постановці найбільш небезпечною є точка $x = -0$, $y = h/2$.

Допустимі навантаження P_* знайшли з умов (6), (7), врахувавши, що $\max_x \sigma_{eq}(x) = \sigma_{eq}(-0)$.

Як видно з рис. 5, за прийнятих у розрахунках параметрів композиції спочатку відбудеться перехід у пластичний стан алюмінієвої підкладки.

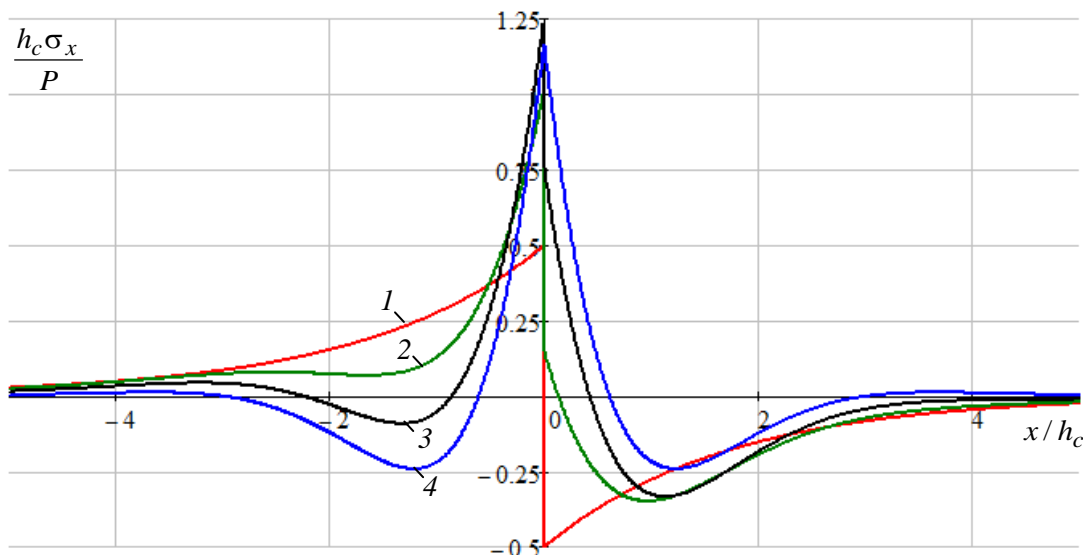


Рис. 2. Розподіл нормальних напружень у покритті на межі контакту шарів ($y = h/2$):

$$1 - \alpha = 0^\circ, \quad 2 - \alpha = 30^\circ, \quad 3 - \alpha = 60^\circ, \quad 4 - \alpha = 90^\circ$$

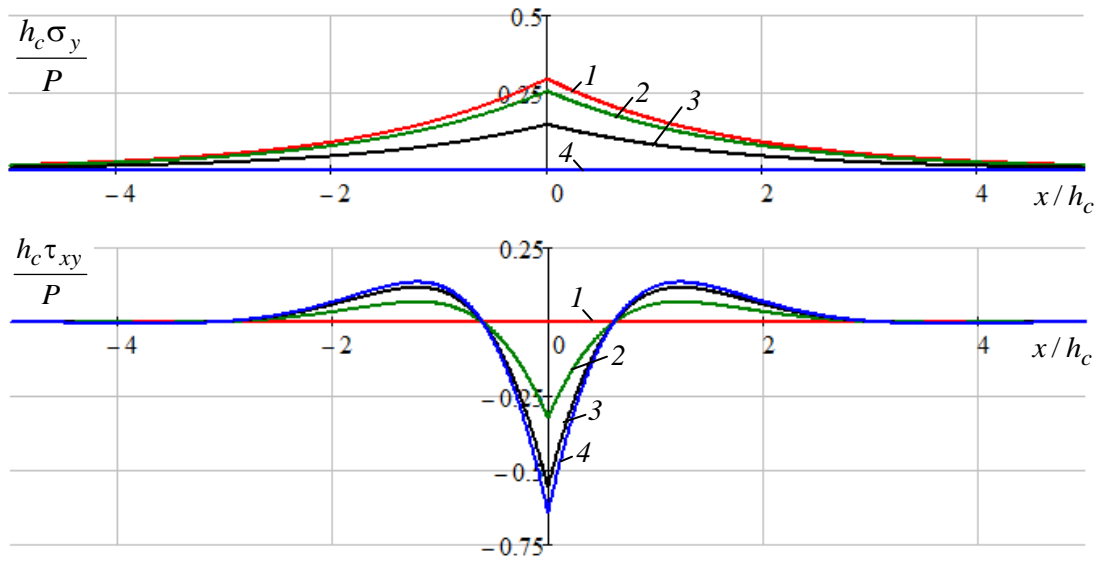


Рис. 3. Розподіл напружень у підкладці:
 1 – $\alpha = 0^\circ$, 2 – $\alpha = 30^\circ$, 3 – $\alpha = 60^\circ$, 4 – $\alpha = 90^\circ$

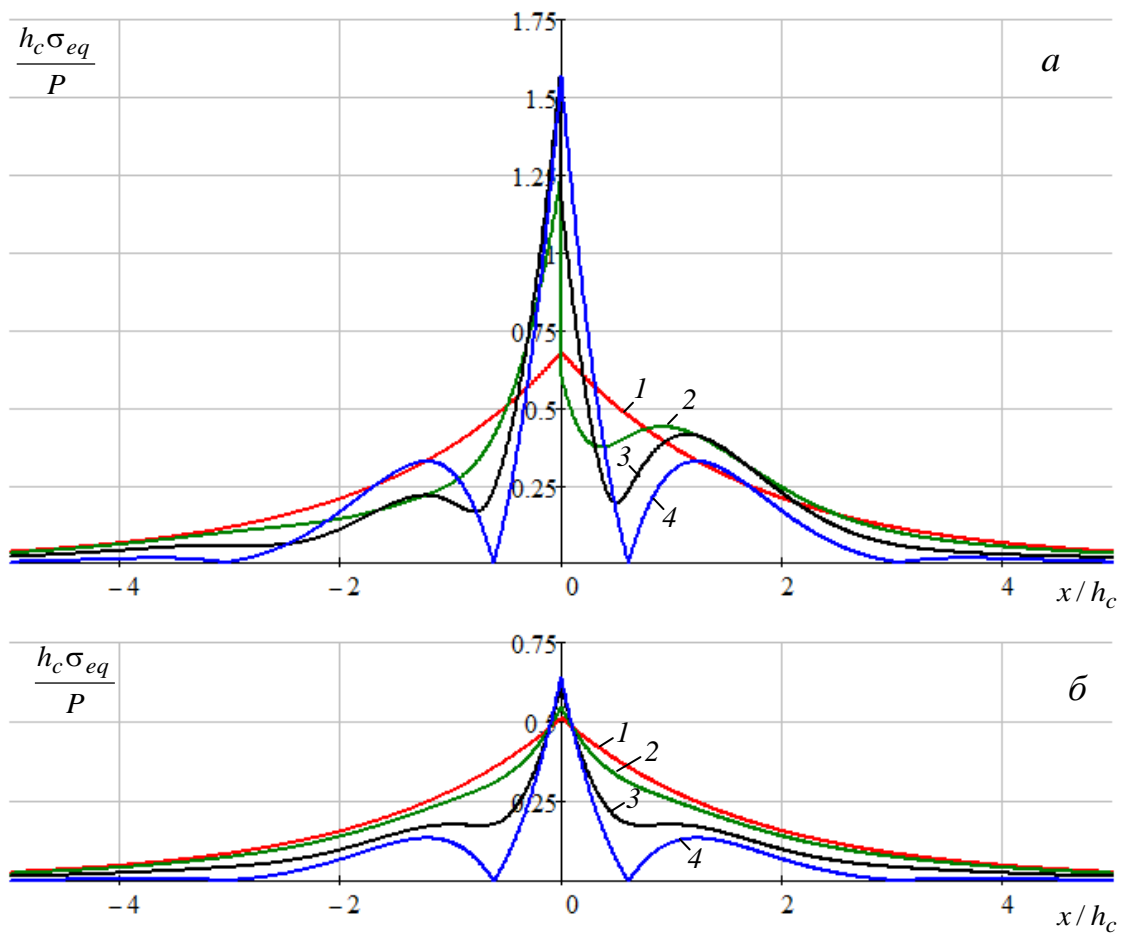


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень:
 а – у покритті при $y = h/2$, б – у підкладці; 1 – $\alpha = 0^\circ$, 2 – $\alpha = 30^\circ$, 3 – $\alpha = 60^\circ$, 4 – $\alpha = 90^\circ$

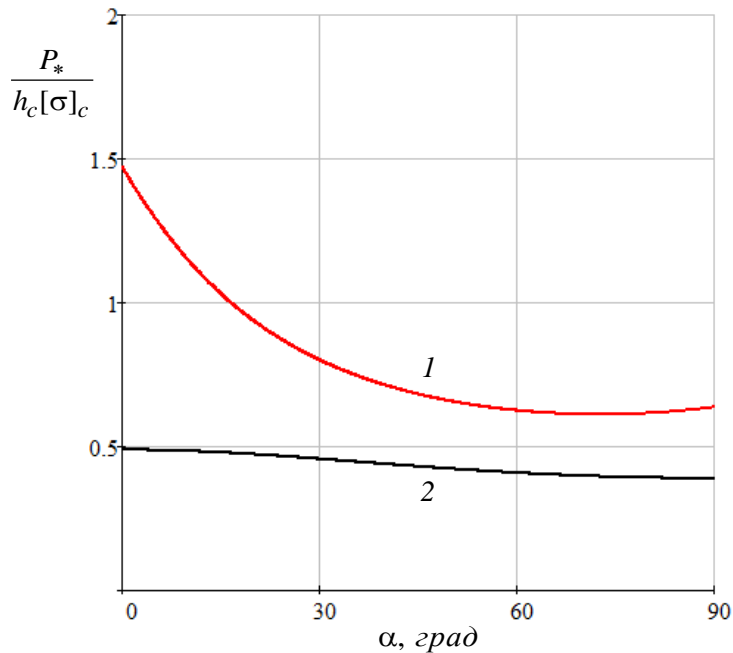


Рис. 5. Допустиме навантаження: 1 – для покриття, 2 – для підкладки

Висновки. Розроблена методика розрахунку дозволяє в аналітичній формі відслідкувати вплив співвідношень геометричних і механічних характеристик шарів на напружений стан та граничну рівновагу двошарового покриття. Принциповим моментом у пропонуваній схемі є використання критеріїв міцності до обох компонент кусково-однорідного тіла. За необхідності врахування податливості основної деталі можна також скористатись тактикою урахування пружних характеристик неоднорідної вглиб основи [5, 6]. Ступінь адекватності прийнятої тут практично одновимірної моделі доцільно встановити на підставі тривимірного числового аналізу з використанням сучасних програмних комплексів.

1. Саакян Л. С. Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионно-механической стойкости деталей нефтегазопромышленного оборудования / Л. С. Саакян, А. П. Ефремов, Л. Я. Роп'як, А. В. Эпельфельд. – М.: ВНИИОЭНГ. 1986. – 61 с.
2. Пат. на корисну модель 17243 Україна, МПК (2006) С 23 С 14/00. Спосіб одержання керамічних покриттів / М. Д. Клапків, М. М. Студент, В. І. Похмурський та ін.; заявник і патентовласник Фіз.-мех. інст. ім. Г. В. Карпенка НАН України. – № 200603390; заявл. 27.03.2006; опубл. 15.09.2006, Бюл. № 9. – 2 с.
3. Величкович А. С., Роп'як Л. Я. Оцінка міцності вкритої шаруватим покриттям ділянки штока бурового насоса з урахуванням позаштатних напружень // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – 2013. – № 772. – С. 182–191.
4. Похмурський В. І. Вплив виду шліфування на параметри шорсткості та трибологічні характеристики оксидо-керамічних шарів / В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. В. Шмирко та ін. // Проблеми трибології. – 2014. – № 1. – С. 116–122.
5. Шацький І. П. Локальні напруження у покритті неоднорідної основи / І. П. Шацький, Л. Я. Роп'як // Прогресивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. трудов. Донецк: ДонНТУ. – 2004. – Вып. 28. – С. 277–282.
6. Роп'як Л. Про згин пластинки на неоднорідній вінклерівській основі / Л. Роп'як, І. Шуляр, І. Шацький // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2007. – Т. 12, № 3. – С. 22–26.

Стаття надійшла до редакції 27.03.2015.