

Оптимізація міцності двошарового покриття для локального навантаження

І. П. Шацький^{а,1}, Л. Я. Роп'як^{б,2}, М. В. Маковійчук^{а,3}

^а Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, Івано-Франківськ, Україна

^б Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, Україна

¹ ipshatsky@gmail.com

² ropjak@ukr.net

³ makoviy@ua.fm

Розроблено інженерну методику розрахунку напружено-деформованого стану двошарових покриттів під дією довільно орієнтованого локального навантаження. Методику використано при побудові раціональної структури шаруватого покриття. Установлено оптимальну товщину підкладки, яка забезпечує найбільшу величину допустимого навантаження.

Ключові слова: інженерна методика, двошарове покриття, постіль Вінклера, система кераміка–алюміній, розподіл напружень, оптимальна товщина підкладки, знос.

Вступ. Роботоздатність машин, механізмів та обладнання в умовах контактних навантажень і взаємодії з агресивним чи абразивним середовищем суттєво залежить від стану та структури поверхневих шарів деталей. Традиційним способом поверхневого зміцнення виробів є нанесення функціонально градієнтних покриттів, компоненти яких мають різну функцію. До таких неоднорідних структур належать, зокрема, двошарові покриття системи кераміка–алюміній, які наносять на поверхню сталевих деталей [1, 2]. Верхній (оксидний) шар характеризується високою твердістю і забезпечує захист від механічного зносу, нижній (алюмінієвий) – гарантує потрібний зв'язок з основою і сприяє захисту сталі від наводнення в агресивних середовищах.

Аналіз відомих літературних джерел свідчить, що наведені в них дані не в повній мірі дозволяють зрозуміти вплив структури та механічних властивостей компонент двошарового покриття на величину граничних навантажень [3–5]. Особливо це стосується локалізованих у просторі впливів. Раніше [6] описано підхід до розрахунку локальних напружень у двошаровому покритті як у пластині на вінклеровій основі та встановлено допустиме навантаження від інструмента під час фінішної механічної обробки вкритої деталі. Метою даної роботи є розробка методики раціонального проектування двошарового покриття для локальних навантажень, які є, зокрема, наслідком взаємодії з абразивними частинками в контактній зоні під час експлуатації.

Постановка задачі. Розглянемо нанесене на плоску деталь двошарове покриття, яке складається з доволі жорсткого робочого шару завтовшки h_c (власне, покриття) та з податливого шару зовтовшки h_o (підкладка) – рис. 1.

Верхній шар моделюємо пластиною, яка працює на розтяг (стиск) та згин, підкладку розглядаємо як прошарок, що відповідає гіпотезам Вінклера щодо пропорційності напружень і пружних переміщень. Для простоти основу приймаємо абсолютно жорсткою. Механічний контакт між компонентами вважаємо ідеальним. Двошаровий композит навантажений довільно орієнтованими силами P (Н/м), рівномірно розподіленими вздовж прямої (рис. 1). Окрім того, припускаємо стан плоскої

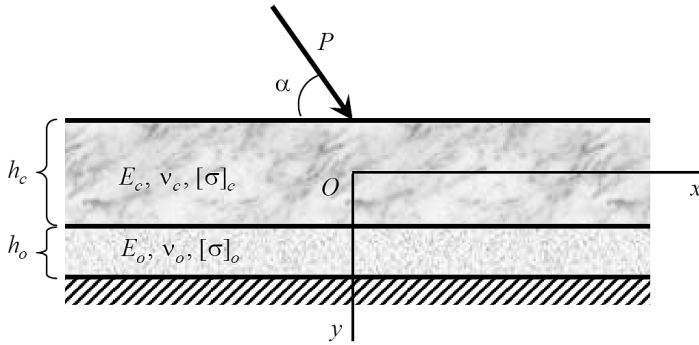


Рис. 1. Двошарове покриття під довільно орієнтованим навантаженням.

деформації ($\epsilon_z = 0$). Визначимо розподіл напружень у двошаровій композиції та вплив товщини прошарку на рівень допустимого локального навантаження.

Аналіз напруженого стану. За прийнятих припущень запишемо рівняння рівноваги покриття на пружній основі [7]:

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

де u_x, u_y – компоненти вектора пружного переміщення серединної поверхні пластини; $X = P \cos \alpha$; $Y = P \sin \alpha$; $\delta(x)$ – функція Дірака; B, D – жорсткості при розтязі та згині, $B = E_c h_c / (1 - \nu_c^2)$, $D = E_c h_c^3 / (12(1 - \nu_c^2))$; k_x, k_y – коефіцієнти постелі, $k_x = G_0 / h_0 = E_0 / (2(1 + \nu_0)h_0)$, $k_y = E_0 / h_0$; E_c, ν_c і E_0, ν_0 – модуль Юнга і коефіцієнт Пуассона матеріалів покриття і підкладки відповідно.

На нескінченності зусилля та моменти гаснуть:

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

Розв'язок крайової задачі (1), (2) має такий вигляд

$$u_x(x) = \frac{X}{2B\lambda_x} e^{-\lambda_x|x|}, \quad u_y(x) = \frac{Y}{8D\lambda_y^3} e^{-\lambda_y|x|} (\cos \lambda_y x + \sin \lambda_y |x|), \quad (3)$$

де λ_x, λ_y – коефіцієнти защемлення з розмірністю, оберненою до довжини, $\lambda_x = \sqrt{k_x / B}$, $\lambda_y = \sqrt[4]{k_y / (4D)}$.

Переміщенням (3) відповідають зусилля та моменти в покритті:

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

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

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

На підставі гіпотез Вінклера напруження у підкладці такі:

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

Міцність кожного з шарів визначимо за критерієм Мізеса. Так, умова міцності для плоскодеформованого покриття буде:

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

а для вінклерової підкладки –

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

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

Виконаний раніше [6] аналіз напруженого стану двошарової композиції за різних кутів орієнтації (α) навантаження показав, що у запропонованій постановці найбільш небезпечною є точка $x = 0$, $y = h/2$.

Рациональний проект двошарового покриття. Ураховавши, що $\max_x \sigma_{eq,c}(x) = \sigma_{eq,c}(0)$, а $\max_x \sigma_{eq,o}(x) = \sigma_{eq,o}(0)$, з умов (6) і (7) знайдемо допустимі навантаження P_{*c} і P_{*o} , за яких забезпечується цілісність відповідно покриття та підкладки. Для даної композиції за допустиме навантаження слід вибрати меншу з цих величин:

$$P_* = \min\{P_{*c}, P_{*o}\} = \min\left\{\frac{[\sigma]_c}{\sigma_{eq,c}(0)/P}, \frac{[\sigma]_o}{\sigma_{eq,o}(0)/P}\right\}.$$

За фіксованих значень безрозмірних показників механічних характеристик матеріалів $E_o/E_c = 0,2$, $[\sigma]_o/[\sigma]_c = 0,25$, $\nu_o = 0,3$, $\nu_c = 0,34$, які відповідають парі керамічне покриття та алюмінієва підкладка, побудовано залежності P_{*c} , P_{*o} і P_* від відносної товщини підкладки за різних кутів α (рис. 2). При цьому розглядали два варіанти: фіксованими є товщина зовнішнього шару h_c або сумарна товщина двошарової композиції $H = h_c + h_o$. У обох випадках для кожного α існує значення $h_{o,опт}$, яке забезпечує $\max P_*$ для двошарового покриття (рис. 3).

Для прийнятих у даній роботі механічних властивостей матеріалів за фіксованої товщини h_c величина $\max P_*$ досягається на перетині кривих P_{*c} і P_{*o} , що свідчить про рівномірність компонент двошарового покриття, а за фіксованої товщини H

$\max_{h_o/H} P_* = \max_{h_o/H} P_{*o}$ – найбільша несівна здатність композиції визначається міцністю підкладки. Збільшення відношення $[\sigma]_o/[\sigma]_c$ може, однак, змінити останню тенденцію.

Відзначимо також, що екстремуми на рис. 2 не є гострими, а оптимальні товщини підкладки та екстремальні значення допустимих навантажень в області небезпечних (не близьких до 0°) α не сильно залежать від кута орієнтації навантажень, що дає певний інтервал у проектуванні. Так, деяке зміщення відносно $h_{o,опт}$ не призводить до суттєвого зниження P_* порівняно з $\max P_*$. Окрім того, якщо кут α не є регламентованим умовами експлуатації та змінюється в широкому інтервалі,

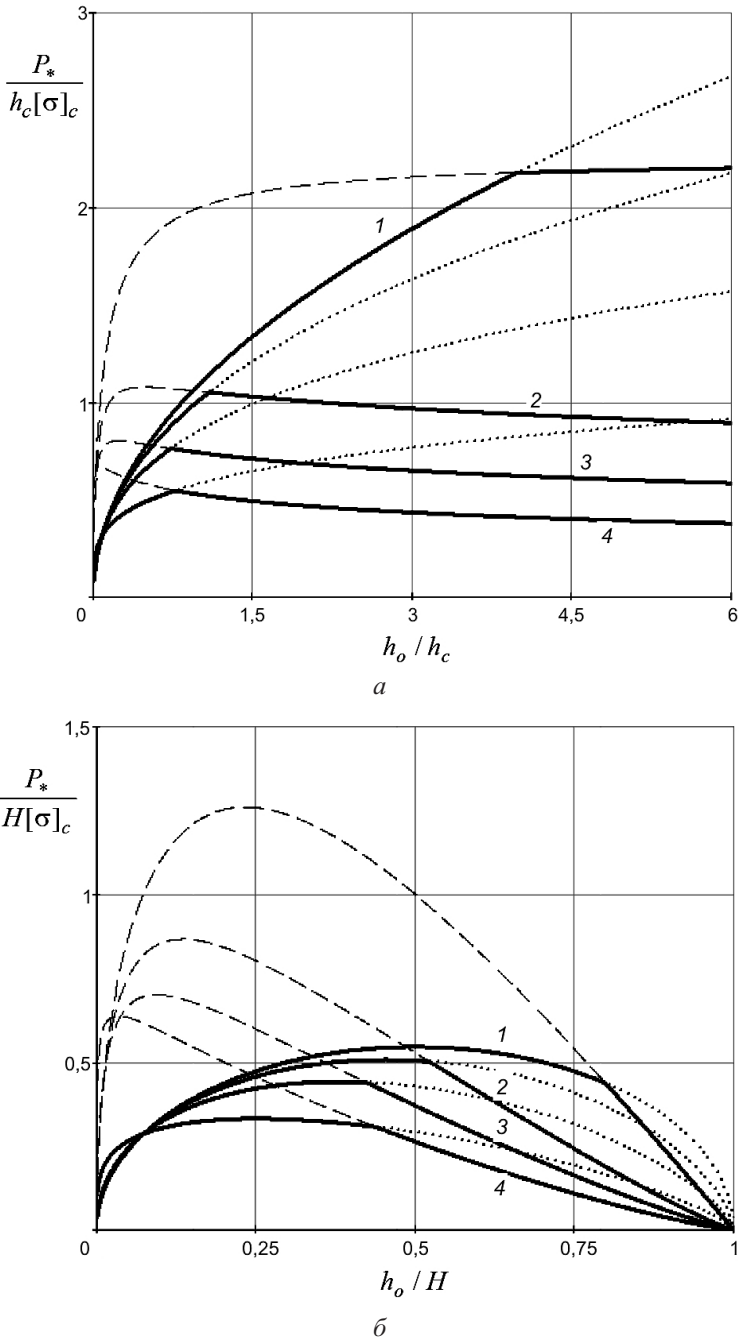


Рис. 2. Вплив товщини підкладки h_o на допустиме навантаження для фіксованої товщини h_c (а) і фіксованої сумарної товщини $H = h_c + h_o$ (б): 1 – $\alpha = 0^\circ$; 2 – $\alpha = 30^\circ$; 3 – $\alpha = 60^\circ$; 4 – $\alpha = 90^\circ$. (За міцністю підкладки – пунктирні лінії, за міцністю верхнього шару покриття – штрихові лінії і за меншим із допустимих навантажень – суцільні лінії.)

розрахунок побудови покриття доцільно вести на “найгірші” навантаження, наприклад, приймаючи силу, перпендикулярною до поверхні покриття. При цьому для інших α буде забезпечено деякий запас міцності.

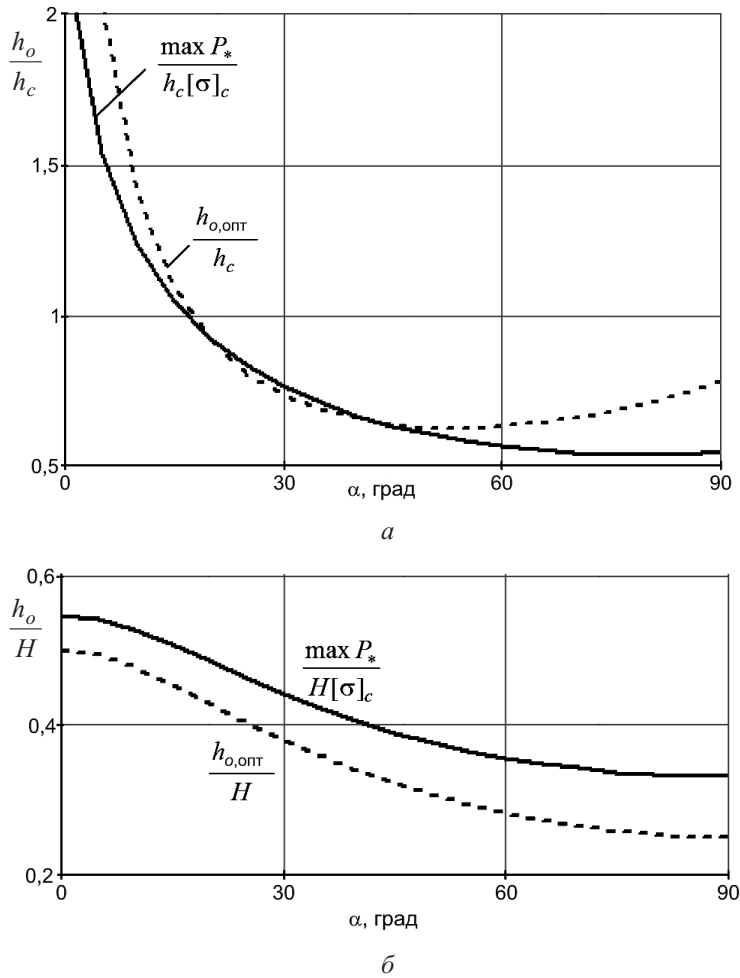


Рис. 3. Оптимальна товщина підкладки h_o , що забезпечує найбільше допустиме навантаження: a – для фіксованої товщини h_c ; b – для фіксованої сумарної товщини $H = h_c + h_o$.

Висновки

1. Розроблено методику розрахунку, що дозволяє в аналітичній формі відслідковувати вплив співвідношень геометричних і механічних характеристик шарів на напружений стан та граничну рівновагу двошарового покриття. Принциповим моментом у запропонованій схемі є використання критеріїв міцності для обох компонент кусково-однорідного тіла.

2. Установлено оптимальну товщину підкладки, що забезпечує максимальне значення допустимого довільно орієнтованого локального навантаження при обмеженнях на еквівалентні напруження у двошаровому покритті. Для розрахованого двошарового покриття кераміка–алюміній можна прийняти $h_{o,opt} \approx h_c / 2 \approx H / 3$.

Резюме

Розроблена инженерная методика расчета напряженно-деформированного состояния двухслойных покрытий под действием произвольно ориентированной локальной нагрузки. С помощью методики построена рациональная структура слоистого покры-

тия. Установлена оптимальная толщина подложки, которая обеспечивает наибольшую величину допустимой нагрузки.

1. Саакян Л. С., Ефремов А. П., Ропяк Л. Я., Эпельфельд А. В. Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионно-механической стойкости деталей нефтегазопромыслового оборудования. – М.: ВНИИОЭНГ, 1986. – 61 с.
2. Пат. 17243 Україна, МПК (2006) С 23 С 14/00. Спосіб одержання керамічних покриттів / М. Д. Клапків, М. М. Студент, В. І. Похмурський та ін. – Чинний від 15.09.2006.
3. Долгов Н. А. Сопротивление деформированию и разрушению материалов с функциональными покрытиями. – Тернополь: Крок, 2010. – 231 с.
4. Величкович А. С., Роп'як Л. Я. Оцінка міцності вкритої шаруватим покриттям ділянки штока бурового насоса з урахуванням позаштатних напружень // Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. – 2013. – № 772. – С. 182–191.
5. Похмурський В. І., Студент М. М., Шмирко В. В. та ін. Вплив виду шліфування на параметри шорсткості та трибологічні характеристики оксидокерамічних шарів // Пробл. трибології. – 2014. – № 1. – С. 116–122.
6. Роп'як Л. Я., Шацький І. П., Маковійчук М. В. Оцінка міцності двошарового покриття під локальним навантаженням // Міжвуз. зб. “Наукові нотатки” ЛНТУ. – 2015. – № 50. – С. 148–152.
7. Власов В. З., Леонтьев Н. Н. Балки, плиты и оболочки на упругом основании. – М.: Физматгиз, 1960. – 491 с.

Поступила 10. 11. 2015