

PACS numbers: 46.50.+a, 62.20.M-, 68.60.Bs, 81.05.Je, 81.15.Rs, 81.65.Mq

Вплив товщини оксидного шару на опір кераміко-алюмінійового покриття індентуванню

Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький*, М. В. Маковійчук*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15,*

76019 Івано-Франківськ, Україна

**Івано-Франківський відділ Інституту прикладних проблем механіки
і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України,*

вул. Микитинецька, 3,

76002 Івано-Франківськ, Україна

Розроблено інженерну методіку розрахунку напруженого стану та міцності двошарових кераміко-алюмінієвих покриттів, навантажених цупким індентором. Досліджено вплив товщини оксидного шару на величину допустимого довільно орієнтованого навантаження. Розраховано оптимальну товщину оксидного шару, яка забезпечує найбільший спротив покриття індентуванню.

Ключові слова: плазмово-електролітичне оксидування, індентування, міцність, двошарове покриття, кераміка, алюміній.

An engineering methodology for calculating both the stress state and the strength of the double-layer ceramic–aluminium coatings loaded with a hard indenter is developed. Influence of the oxide-layer thickness on the permissible arbitrarily oriented loading value is studied. An optimal thickness of the

Corresponding author: Lyubomyr Yaroslavovych Ropyak

E-mail: l_ropjak@ukr.net

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska Str., UA-76019 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

**Ivano-Frankivsk Department of the Pidstryhach Institute for Applied Problems
of Mechanics and Mathematics, N.A.S. of Ukraine,
3 Mykytynets'ka Str., 76002 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Please cite this article as: L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, and M. V. Makoviichuk, Influence of the Oxide-Layer Thickness on the Ceramic–Aluminium Coating Resistance to Indentation, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 4: 517–524 (2017) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.39.04.0517.

oxide layer, which provides the maximum resistance of coating to indentation, is calculated.

Keywords: plasma–electrolytic oxidation, double-layer coating, indentation, strength, ceramics, aluminium.

Разработана инженерная методика расчёта напряжённого состояния и прочности двухслойных керамико-алюминиевых покрытий, нагружённых жёстким индентором. Исследовано влияние толщины оксидного слоя на величину допустимой произвольно ориентированной нагрузки. Рассчитана оптимальная толщина оксидного слоя, которая обеспечивает наибольшее сопротивление покрытия индентированию.

Ключевые слова: плазменно-электролитическое оксидирование, индентирование, прочность, двухслойное покрытие, керамика, алюминий.

(Отримано 31 січня 2017 р.)

1. ВСТУП

Плазмово-електролітичне оксидування (ПЕО) є ефективним технологічним способом формування захисних покриттів на алюмінії та його стопах, а також на металах вентильної групи. Для одержання оксидних покриттів на деталях із сталей та інших конструкційних матеріалів на їх робочу поверхню попередньо наносять шар алюмінію та здійснюють його механічне оброблення (точіння, фрезерування, шліфування тощо). Після цього верхню частину шару алюмінію оксидують, перетворюючи його в кераміку, а нижню частину (підшар) залишають неоксидованою. ПЕО проводять в електроліті. За рахунок прикладання високої напруги між деталем та електродом на поверхні деталю виникають мікродугові розряди, які хаотично мігрують. Внаслідок перебігу плазмохімічних реакцій в каналах розрядів формуються дисперсні оксиди, які містять у своєму складі різні фази, в тому числі й високотемпературні α - Al_2O_3 .

Фізико-механічні властивості оксидних покриттів залежать від хімічного складу матеріалу основи та електроліту і від електричних параметрів процесу. Слід зазначити, що при одержанні оксидних покриттів на їх поверхні утворюється розпушений шар, який складається із низькотемпературних фаз оксидів та шпінелей, утворених із хімічних елементів основи та електроліту. Для забезпечення якості поверхні оксидного покриття та точності геометричних розмірів деталей верхній розпушений шар знімають механічним обробленням лезовим (різцем, фрезою) або абразивним (шліфувальним кругом) діамантовим інструментом. Перша й друга задачі передбачають розгляд питання взаємодії цупкого індентора з оксидною компонентою покриття $\text{Al}-\text{Al}_2\text{O}_3$.

В технічній і патентній літературі описано способи формування

та конструкції двошарових покриттів системи алюміній–кераміка [1–5], однак питання міцності шаруватих композицій під локальним навантаженням вивчено недостатньо [6–14]. Опис індентування як інструментарію для визначення механічних характеристик поверхневих шарів матеріалів на різних масштабних рівнях подано у працях [15–18].

Метою цієї роботи є дослідження впливу товщини сформованого оксидного шару на спротив двошарового покриття локальному індентуванню. Прагнучи здобути аналітичні оцінки, дослідження провели в одновимірній постановці, використовуючи модель пластини на Вінклеровій основі.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо сформоване на плоскому деталі двошарове покриття, яке складається з доволі цупкого робочого шару завтовшки h_c та з податливого шару (підкладинки) завтовшки h_o (рис. 1). Верхній шар моделюємо пластиною, яка працює на розтяг (стиск) та вигин; підкладинку (або підшар) трактуємо як прошарок, що підкоряється Вінклеровим гіпотезам про пропорційність напружень і пружних переміщень. Для спрощення основа вважається абсолютно цупкою. Механічний контакт між компонентами вважається ідеальним. Композицію через цупкий індентор навантажено доволі орієнтованими силами P [Н/м], рівномірно розподіленими вздовж прямої вглиб цього рисунка. Крім того, припускаємо стан плоскої деформації ($\epsilon_z = 0$). Визначаємо розподіл напружень у двошаровій композиції та вплив товщини оксидного шару на рівень допустимого локального навантаження.

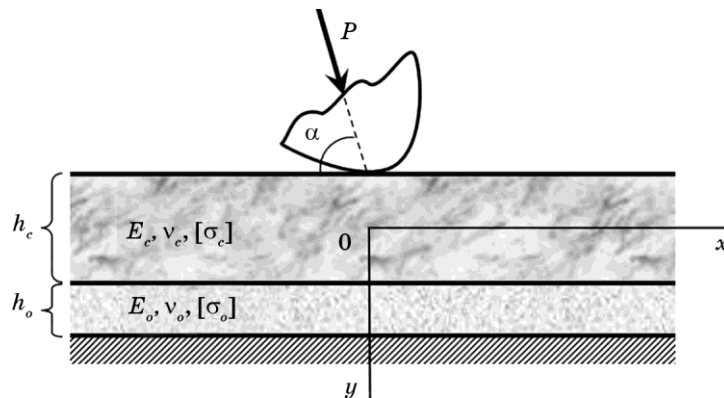


Рис. 1. Схема взаємодії індентора з двошаровим покриттям.

Fig. 1. Scheme of interaction between the indenter and the double-layer coating.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Аналіз напруженого стану. За прийнятих припущень запишемо рівняння рівноваги пластини на пружній основі:

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

Тут u_x, u_y — компоненти вектора пружнього переміщення середньої поверхні пластини, $X = P \cos \alpha$, $Y = P \sin \alpha$, $\delta(x)$ — Діракова функція, $B = E_c h_c / (1 - \nu_c^2)$, $D = E_c h_c^3 / (12(1 - \nu_c^2))$ — цупкості на розтяг і вигин, $k_x = G_o / h_o = E_o / (2(1 + \nu_o)h_o)$, $k_y = E_o / h_o$ — коефіцієнти постелі, E_c, ν_c і E_o, ν_o — модулі Юнга та Пуассонові коефіцієнти матеріалів робочого шару та підкладинки відповідно.

На нескінченості зусилля та моменти загасають:

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

Розв'язок крайової задачі (1), (2) знайшли у вигляді:

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

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

Переміщенням (3) відповідають зусилля та моменти:

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

Зокрема, для напружень у підшві покриття ($y = h_c/2$) одержали 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 підкладинці є такими:

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

Міцність кожного з шарів оцінимо за Мізесовим критерієм. Так, умова міцності для пласко-деформованого покриття буде:

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

а для вінклерівської підкладки:

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

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

Аналіза напруженого стану композиції за різних кутів орієнтації (α) навантаження засвідчила, що у пропонованій постановці найбільш небезпечною є точка $x = -0$, $y = h/2$ [6].

Аналіза міцності двошарового покриття. Врахувавши, що $\max_x \sigma_{\text{eq},c}(x) = \sigma_{\text{eq},c}(-0)$, $\max_x \sigma_{\text{eq},o}(x) = \sigma_{\text{eq},o}(0)$, із умов (6), (7) знайшли допустимі навантаження P_{*c} і P_{*o} , за яких забезпечується цілісність відповідно верхнього і нижнього шарів покриття. За допустиме навантаження для даної композиції слід вибрати меншу з цих величин:

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

За фіксованих значень безрозмірних комплексів від механічних

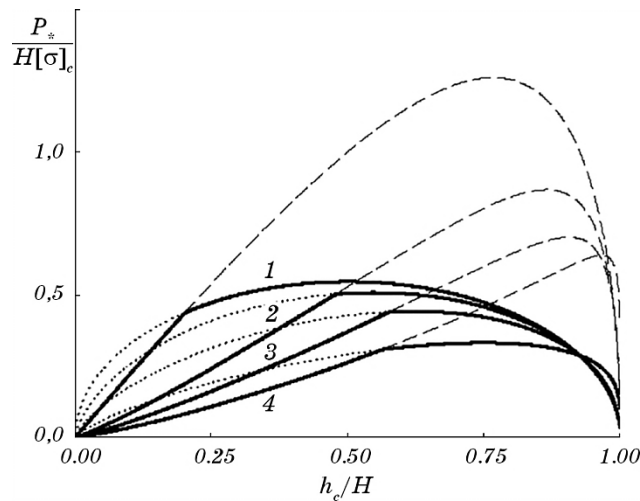


Рис. 2. Вплив товщини оксидного шару на допустиме навантаження: 1 — $\alpha = 0^\circ$, 2 — $\alpha = 30^\circ$, 3 — $\alpha = 60^\circ$, 4 — $\alpha = 90^\circ$; штрихові залежності — за міцністю керамічного шару, пунктирні — за міцністю алюмінійового підшару, суцільні лінії — менше із допустимих навантажень.

Fig. 2. Influence of the oxide-layer thickness on the permissible loading: 1 — $\alpha = 0^\circ$, 2 — $\alpha = 30^\circ$, 3 — $\alpha = 60^\circ$, 4 — $\alpha = 90^\circ$; dashed lines represent the strength of ceramic layer, dotted lines represent the strength of aluminium layer, and solid lines correspond to the minor of permissible loadings.

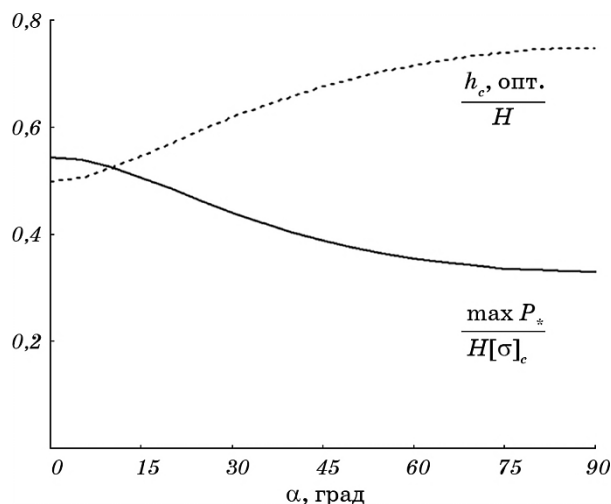


Рис. 3. Оптимальна товщина кераміки та найбільше допустиме навантаження, яке нею забезпечується.

Fig. 3. The optimal thickness of ceramic layer and the maximal permissible loading provided with it.

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 на алюмінієвому підшарі», побудували залежності P_{*c} , P_{*o} та P_* від відносної товщини оксидного шару для різних кутів α за фіксованої сумарної товщини H двошарової композиції (рис. 2). Для кожного α є значення $h_{c, \text{опт}}$, яке забезпечує $\max P_*$ для двошарового покриття (рис. 3), а найбільша несуча здатність композиції визначається міцністю підкладинки: $\max_{h_c/H} P_* = \max_{h_c/H} P_{*o}$.

4. ВИСНОВКИ

Розроблена методика розрахунку уможливорює в аналітичній формі відслідковувати вплив товщини оксидного шару, сформованого плазмово-електролітичним оксидуванням, на напружений стан та граничну рівновагу двошарового покриття з фіксованою товщиною. Принциповим моментом у пропонованій схемі є використання критеріїв міцності до обох компонентів кусково-однорідного тіла.

Встановлено наявність оптимальної глибини оксидування, яка забезпечує максимальне допустиме значення довільно орієнтованого локального навантаження від цупкого індентора при виконанні обмежень на еквівалентні напруження у двошаровому покритті.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Л. С. Саакіян, А. П. Ефремов, Л. Я. Роп'як, А. В. Епельфельд, *Применение поверхностного упрочнения алюминиевых сплавов и покрытий для повышения коррозионно-механической стойкости деталей нефтегазопромыслового оборудования* (Москва: ВНИИОЭНГ: 1986).
2. И. В. Суминов, А. В. Эпельфельд, В. Б. Людин, Б. Л. Крит, А. М. Борисов, *Микродуговое оксидирование (Теория, технология, оборудование)* (Москва: ЭКОМЕТ: 2005).
3. М. Д. Клапків, М. М. Студент, В. І. Похмурський, Г. М. Никифорчин, В. М. Посувайло, П. Я. Сидор, *Спосіб одержання керамічних покриттів: Патент на корисну модель 17243 Україна, МПК С23С 14/00 (Бюл. «Промислова власність», № 9: 2) (2006).*
4. М. М. Студент, В. М. Довгунік, М. Д. Клапків, В. М. Посувайло, В. В. Шмирко, А. Р. Киця, *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, **48**, № 2: 55 (2012).
5. В. І. Похмурський, М. М. Студент, В. В. Шмирко, В. М. Довгунік, М. Д. Клапків, *Проблеми трибології*, № 1: 11 (2014).
6. Н. А. Долгов, *Проблеми прочності*, № 4: 121 (2005).
7. В. С. Антонюк, Е. Б. Сорока, В. И. Калиниченко, *Сверхтвёрдые материалы*, № 2: 79 (2008).
8. Н. А. Долгов, *Сопротивление деформированию и разрушению материалов с функциональными покрытиями* (Тернополь: Крок: 2010).
9. А. С. Величкович, Т. М. Даляк, *Химическое и нефтегазовое машиностроение*, № 3: 28 (2015).
10. Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук, *Наукові нотатки*, № 50: 148 (2015).
11. И. Г. Горячева, Е. В. Торская, Ю. В. Корнев, И. Н. Ковалева, Н. К. Мышкин, *Трение и износ*, **36**, № 3: 340 (2015).
12. Н. А. Долгов, *Проблеми прочності*, № 5: 84 (2016).
13. D. Lutsak, P. Prysyzhnyuk, M. Burda, and V. Aulin, *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*, **5**, № 7 (83): 19 (2016).
14. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Proc. of 15th Int. Conf. 'Modelling in Mechanics 2017' (January 19–20, 2017, Ostrava)*, p. 65.
15. С. И. Бульчев, В. П. Алехин, *Испытание материалов непрерывным вдавливанием индентора* (Москва: Машиностроение: 1990).
16. Yu. V. Milman, B. A. Galanov, and S. I. Chugunova, *Acta Metal. Mater.*, **41**, No. 9: 2523 (1993).
17. С. Н. Дуб, А. Л. Майстренко, А. А. Исаков, *Завод. лаборатория*, № 4: 58 (1993).
18. С. Н. Дуб, Н. В. Новиков, *Сверхтвёрдые материалы*, № 6: 16 (2004).

REFERENCES

1. L. S. Saakiyan, A. P. Efremov, L. Ya. Ropyak, and A. V. Epelfeld, *Primenenie Poverkhnostnogo Uprochneniya Alyuminievykh Splavov i Pokrytiy Dlya Povysheniya Korrozionno-Mekhanicheskoy Stoykosti Detaley Neftegazopromyslovogo Oborudovaniya* [Application of Surface Strengthening of Aluminium Alloys and Coatings for Improving Corrosion and Mechanical

- Resistance of Oil-and-Gas Industrial Equipment Components] (Moscow: VNIIOENG: 1986) (in Russian).
2. I. V. Suminov, A. V. Epelfeld, V. B. Lyudin, B. L. Krit, and A. M. Borisov, *Mikrodugovoe Oksidirovanie (Teoriya, Tekhnologiya, Oborudovanie)* [Micro-Arc Oxidation (Theory, Technology, and Equipment)] (Moscow: EKOMET: 2005) (in Russian).
 3. M. D. Klapkiv, M. M. Student, V. I. Pokhmurskyi, G. M. Nykyforchyn, V. M. Posuvailo, and P. Ya. Sydor, *Sposib Oderzhannya Keramichnykh Pokryttiv* [The Technology of Ceramic Coating Production]: Patent na Korysnu Model 17243 Ukraine, MPK C23C 14/00 (Bull. 'Promyslova Vlasnist', No. 9: 2) (2006) (in Ukrainian).
 4. M. M. Student, V. M. Dovhunyk, M. D. Klapkiv, V. M. Posuvailo, V. V. Shmyrko, and A. P. Kytsya, *Materials Science*, **48**, Iss. 2: 180 (2012).
 5. V. I. Pokhmurskyi, M. M. Student, V. V. Shmyrko, V. M. Dovhunyk, and M. D. Klapkiv, *Problemy Trybologii*, No. 1: 11 (2014) (in Ukrainian).
 6. N. A. Dolgov, *Strength of Materials*, **37**, No. 4: 422 (2005).
 7. V. S. Antonyuk, E. B. Soroka, and V. I. Kalinichenko, *Sverkhtverdye Materialy*, **30**, No. 2: 131 (2008) (in Russian).
 8. N. A. Dolhov, *Sprotyvlenie Deformirovaniyu i Razrusheniyyu Materialov s Funktsionalnymi Pokrytyyami* [Resistance to Strain and Fracture of Materials with Functional Coatings] (Ternopol: Krok: 2010) (in Russian).
 9. A. S. Velichkovich and T. M. Dalyak, *Chemical and Petroleum Engineering*, **51**, No. 3: 188 (2015).
 10. L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, and M. V. Makoviichuk, *Naukovi Notatky*, No. 50: 148 (2015) (in Ukrainian).
 11. I. G. Goryacheva, E. V. Torskaya, Yu. V. Kornev, I. N. Kovaleva, and N. K. Myshkin, *Journal of Friction and Wear*, **36**, No. 3: 262 (2015).
 12. N. A. Dolgov, *Strength of Materials*, **48**, No. 5: 658 (2016).
 13. D. Lutsak, P. Prysyzhnyuk, M. Burda, and V. Aulin, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, **5**, No. 7 (83): 19 (2016).
 14. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Proc. of 15th Int. Conf. 'Modelling in Mechanics 2017' (January 19–20, 2017, Ostrava)*, p. 65.
 15. S. I. Bulychev and V. P. Alekhin, *Ispytanie Materialov Nepreryvnym Vdavlivaniem Indentora* [Material Testing by Continuous Embedding of an Indenter] (Moscow: Mashynostroenie: 1990) (in Russian).
 16. Yu. V. Milman, B. A. Galanov, and S. I. Chugunova, *Acta Metal. Mater.*, **41**, No. 9: 2523 (1993).
 17. S. N. Dub, A. L. Maistrenko, and A. A. Isakov, *Zavod. Laboratoriya*, No. 4: 58 (1993) (in Russian).
 18. S. N. Dub and N. V. Novikov, *Sverkhtverdye Materialy*, No. 6: 16 (2004) (in Russian).