

METALLIC SURFACES AND FILMS

PACS numbers: 46.55.+d, 62.20.Qp, 68.35.Gy, 68.60.Bs, 81.40.Lm, 81.40.Pq

Аналіз взаємодії тонкого покриття з абразивом на основі одновимірної моделі

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 для аналітичної оцінки міцності системи «деталь–тонке покриття» в умовах абразивного зношування. Для розрахунків прийнято модель тонкої пластини, що взаємодіє з пружною основою Вінклера. Досліджено розподіл еквівалентних напружень у покритті та в підкладці за локальної дії закріпленого та незакріпленого абразиву.

Ключові слова: тонке покриття, закріплений та незакріплений абразив, напруження, міцність.

The engineering methodology for analytical estimation of the strength of the ‘detail part–thin coating’ system under the conditions of abrasive wearing is developed. The model of a thin plate interacted with Winkler elastic base is taken for calculations. The distribution of equivalent stresses in the coating and in the substrate under a local action of fixed and unfixed abrasives is investigated.

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 Mykitynets'ka Str., UA-76002 Ivano-Frankivsk, Ukraine*

Citation: L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, and M. V. Makoviichuk, Analysis of Interaction of Thin Coating with an Abrasive Using One-Dimensional Model, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 41, No. 5: 647–654 (2019) (in Ukrainian), DOI: 10.15407/mfint.41.05.0647.

Key words: thin coating, fixed and unfixed abrasive, stress, strength.

Разработана инженерная методика для аналитической оценки прочности системы «деталь–тонкое покрытие» в условиях абразивного износа. Для расчётов принята модель тонкой пластины, взаимодействующей с упругим основанием Винклера. Исследовано распределение эквивалентных напряжений в покрытии и в подложке при локальном воздействии закреплённого и незакреплённого абразива.

Ключевые слова: тонкое покрытие, закреплённый и незакреплённый абразив, напряжение, прочность.

(Отримано 22 січня 2019 р.; остаточн. варіант — 25 березня 2019 р.)

1. ВСТУП

За тривалої експлуатації машин і механізмів спостерігаємо нагальну потребу у реновації функціональної здатності деталей. У зв'язку з цим особливої актуальності набувають ремонтно-відновлювальні технології, які базуються на нанесенні зносотривких покриттів, здатних працювати у контакті з абразивовмістним середовищем. Найбільш ефективними у цьому випадку типами покриттів є функціонально-градієнтні покриття, сформовані на основі композиційних матеріалів [1–8], наприклад, дисперсно зміцнені твердосплавні покриття, композиції «кераміка–алюміній», металополімерні покриття тощо.

Сумісна дія нормальних і тангенційних сил у місцях контакту покриття з частинками абразиву сприяє виникненню пластичної деформації та різноманітних дефектів. Вплив покриттів на міцність дефектних структур вивчався у роботах [9–11]. Різноманітні підходи до аналізу утримувальної здатності вкритих деталей за дії локальних навантажень, спричинених дією лезового та шліфувального інструменту, а також контактом з абразивовмістним середовищем, розглянуто в публікаціях [12–18]. На відміну від найновіших підходів [19–22], які містять докладний аналіз напружень у ковзному контакті індентора з вкритими тілами, використовуючи дво- або тривимірні моделі, авторами раніше побудовано інженерні аналітичні оцінки міцності двошарових покриттів на основі одновимірних моделей [17–19]. Метою роботи є розробка в рамках згаданої методології одновимірної моделі взаємодії покриття з частинками закріпленого чи незакріпленого абразиву.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Розглянемо доволі жорсткий шар (покриття) завтовшки h_c , що покриває податливу основу (субстрат, підкладку) завтовшки h_o (рис. 1).

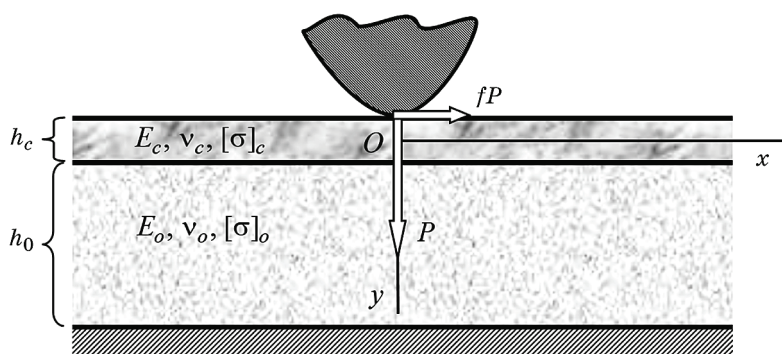


Рис. 1. Схема взаємодії частинки абразиву із вкритою деталлю.

Fig. 1. Scheme of interaction of abrasive particle with a covered detail part.

Верхній шар моделюємо пластиною, яка працює на розтяг (стиск) та згин; підкладку підкоряємо гіпотезам Вінклера про пропорційність напружень і пружних переміщень. Для простоти нижня грань підкладки закріплена абсолютно жорстко. Механічний контакт між компонентами вважається ідеальним. Через жорсткий індентор, що ковзає, імітуючи частинку абразиву, композиція навантажена вертикальною силою P (Н/м) та горизонтальною силою тертя fP , рівномірно розподіленими вздовж прямої вглиб рисунка. Крім того, припускаємо стан плоскої деформації ($\epsilon_z = 0$). Визначаємо розподіл напружень у двошаровій композиції та вплив закріплення абразиву на рівень допустимого навантаження. У запропонованій моделі великі значення коефіцієнта тертя f відповідатимуть ковзанню закріпленого абразиву в режимі мікрорізання, а малі значення — ковзанню незакріпленого абразиву з можливим перекочуванням.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

За прийнятих припущень запишемо рівняння рівноваги пластини на пружній основі:

$$B \frac{d^2 u_x}{dx^2} - k_x u_x = -fP \delta(x), \quad D \frac{d^4 u_y}{dx^4} + k_y u_y = P \delta(x), \quad x \in (-\infty, \infty), \quad (1)$$

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

Тут u_x, u_y — горизонтальне та вертикальне переміщення серединної поверхні пластини, $\delta(x)$ — функція Дірака, $B = E_c h_c / (1 - \nu_c^2)$, $D = E_c \times$

$\times h_c^3 / (12(1 - \nu_c^2))$ — жорсткості на розтяг та згин, $k_x = G_o/h_o = E_o / (2(1 + \nu_o)h_o)$, $k_y = G_o/h_o$ — коефіцієнти постелі, E_c , ν_c і E_o , ν_o — модулі Юнга та коефіцієнти Пуассона матеріалів зміцненого покриття та основи відповідно.

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

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

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

Переміщенням (3) відповідають напруження у підшві покриття ($y = h_c/2$)

$$\sigma_x = -\frac{fP}{2h_c} \operatorname{sgn} x e^{-\lambda_x|x|} + \frac{3P}{2h_c^2\lambda_y} e^{-\lambda_y|x|} (\cos \lambda_y x - \sin \lambda_y |x|) \quad (4)$$

та у підкладці

$$\tau_{xy} = \frac{fP}{2} \lambda_x e^{-\lambda_x|x|}, \quad \sigma_y = -\frac{P}{2} \lambda_y e^{-\lambda_y|x|} (\cos \lambda_y x + \sin \lambda_y |x|). \quad (5)$$

Міцність компонент оцінювали за критерієм Губера–Мізеса–Генкі для плоско деформованого покриття:

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

та для вінклерової основи:

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

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

Результати (4)–(7) аналізували для двошарової конструкції, яка складається із композиційного (60% твердий сплав, 40% сталевий зв'язок) покриття з жорсткістю, обчисленою за правилом суміші

$$E_c = 0,6 \cdot 6 \cdot 10^{11} + (1 - 0,6) \cdot 2 \cdot 10^{11} = 4,4 \cdot 10^{11} \text{ Па},$$

й параметрами $h_c = 2$ мм, $\nu_c = 0,3$, $[\sigma]_c = 600$ МПа, та зі сталевій деталі з параметрами $h_o = 10$ мм, $E_o = 2 \cdot 10^{11}$ Па, $\nu_o = 0,3$, $[\sigma]_o = 260$ МПа.

Характерні безрозмірні комплекси будуть:

$$h_o/h_c = 5, \quad E_o/E_c \approx 0,455, \quad [\sigma]_o/[\sigma]_c \approx 0,433,$$

$$\lambda_x h_c = \sqrt{\frac{E_o h_c}{E_c h_o} \frac{1 - \nu_c^2}{2(1 + \nu_o)}} \approx 0,178, \quad \lambda_y h_c = \sqrt[4]{\frac{E_o h_c}{E_c h_o} 3(1 - \nu_c^2)} \approx 0,706.$$

Для незакріпленого абразиву прийняли $f = 0,1$, а для закріпленого — $f = 0,7$.

Картину напруженого стану композиції показано на рис. 2–4.

Найбільш небезпечною є точка $x = -0, y = h/2$. Враховуючи цю обставину, із умов (6) та (7) знайшли допустимі навантаження P_{*c} і P_{*o} , за яких забезпечується цілісність відповідно покриття та субстрату.

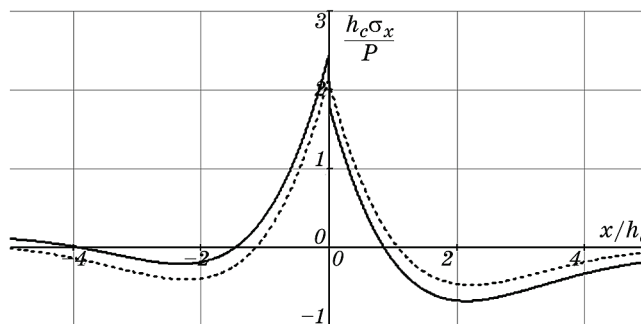


Рис. 2. Розподіл нормальних напружень у підшві покриття: штрихова лінія — незакріплений, суцільна — закріплений абразив.

Fig. 2. Distribution of normal stresses at coating bottom: dashed lines for the unfixed abrasive particle, solid lines for the fixed one.

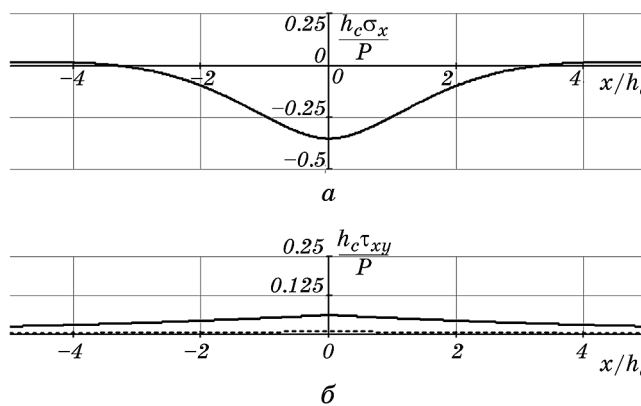


Рис. 3. Розподіл напружень у основі: штрихова лінія — незакріплений, суцільна — закріплений абразив.

Fig. 3. Stress distribution in the substrate: dashed lines for the unfixed abrasive particle, solid lines for the fixed one.

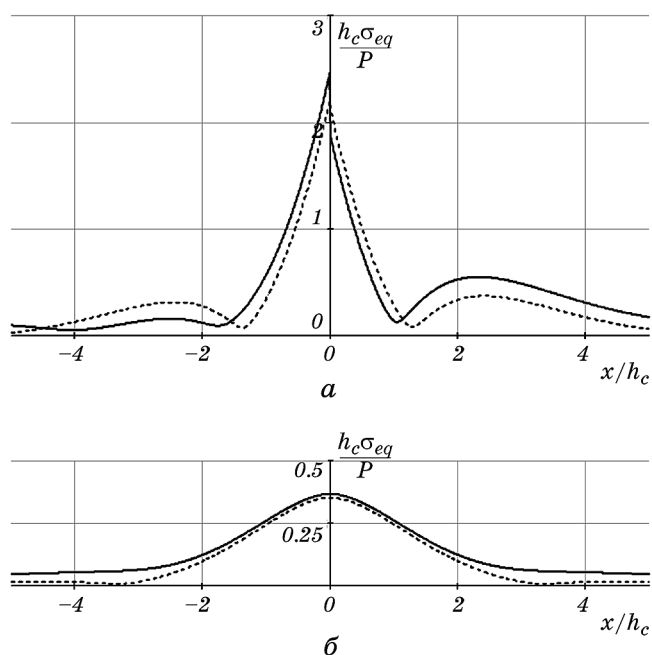


Рис. 4. Розподіл еквівалентних напружень: *a* — у покритті, *б* — в основі; штрихова лінія — незакріплений, суцільна — закріплений абразив.

Fig. 4. Distribution of the equivalent stresses: *a*—in the coating, *б*—in the substrate; dashed lines for the unfixed abrasive particle, solid lines for the fixed one.

Для незакріпленого абразиву

$$P_{*c} = \frac{[\sigma]_c h_c}{2,219} = \frac{600 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{2,219} = 5,41 \cdot 10^6 \text{ Н/м},$$

$$P_{*o} = \frac{[\sigma]_o h_c}{0,353} = \frac{260 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{0,353} = 1,47 \cdot 10^7 \text{ Н/м},$$

а для закріпленого

$$P_{*c} = \frac{[\sigma]_c h_c}{2,488} = \frac{600 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{2,488} = 4,82 \cdot 10^6 \text{ Н/м},$$

$$P_{*o} = \frac{[\sigma]_o h_c}{0,369} = \frac{260 \cdot 10^6 \cdot 0,02}{0,369} = 1,41 \cdot 10^7 \text{ Н/м}.$$

За допустиме навантаження для даної композиції слід вибрати меншу з цих величин:

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

Очікувано, величина граничного навантаження закріпленим абразивом є меншою від такої ж величини для незакріпленого абразиву (у розглянутому прикладі на 11%).

4. ВИСНОВКИ

Таким чином, розроблена методика розрахунку дозволяє в аналітичній формі відслідкувати вплив параметрів покриття на напружений стан та граничну рівновагу вкритої деталі за умов взаємодії з частинками абразиву. Отримані результати якісно підтверджують слабшу дію незакріпленого абразиву за рахунок зменшення сил тертя у ковзному контакті (з імовірним перекочуванням). Важливим етапом розрахунку у запропонованій схемі є також використання критеріїв міцності до усіх компонент гетерогенного тіла.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. V. I. Kopylov, Yu. V. Kolesnikov, I. V. Govorov, I. V. Gurei, and L. A. Parkhomenko, *Soviet Mater. Sci.*, **27**, No. 4: 424 (1992).
2. В. С. Антонюк, *Сверхтвёрдые материалы*, № 4: 72 (1998).
3. Ya. A. Kryl' and P. M. Prysyzhnyuk, *J. Superhard Mater.*, **35**, Iss. 5: 292 (2013).
4. L. Ropyak and V. Ostapovych, *Eastern European J. Enterprise Technol.*, **2**, No. 5 (80): 50 (2016).
5. P. N. Belkin, A. Yerokhin, and S. A. Kusmanov, *Surf. Coat. Technol.*, **307**, Part C: 1194 (2016).
6. M. M. Student, V. M. Dovhunyuk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 3: 359 (2017).
7. S. I. Krysh'topa, D. Y. Petryna, I. M. Bogatchuk, I. B. Prun'ko, and V. M. Mel'nyk, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 3: 351 (2017).
8. В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Е. В. Конопляченко, Н. С. Евтушенко, В. О. Герасименко, *Металлофиз. новейшие технол.*, **40**, № 6: 795 (2018).
9. I. P. Shatskii, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **30**, Iss. 5: 828 (1989).
10. I. P. Shats'kyi and M. V. Makoviichuk, *Mater. Sci.*, **39**, Iss. 3: 371 (2003).
11. I. P. Shats'kyi, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 3: 322 (2015).
12. V. A. Shevchuk, *Strength Mater.*, **32**, Iss. 1: 92 (2000).
13. V. V. Shyrovok and O. V. Maksymuk, *Mater. Sci.*, **38**, Iss. 1: 62 (2002).
14. N. A. Dolgov and E. B. Soroka, *Strength Mater.*, **36**, Iss. 6: 636 (2004).
15. R. Kul'chyts'kyi-Zhyhailo and A. Bajkowski, *Mater. Sci.*, **49**, Iss. 5: 650 (2014).
16. I. P. Shatskyi, L. Y. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, *Strength Mater.*, **48**, Iss. 5: 726 (2016).
17. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Transactions of the VŠB-TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.*, **17**, No. 2: 109 (2017).

18. Л. Я. Роп'як, І. П. Шацький, М. В. Маковійчук, *Металлофиз. новейшие технol.*, **39**, № 4: 517 (2017).
19. F. I. Stepanov and E. V. Torskaya, *Mechanics Solids*, **53**, Iss. 1: 60 (2018).
20. H. Song, L. Ke, Y. Wang, J. Yang, and H. Jiang, *Int. J. Appl. Mechanics*, **10**, No. 5: 1850049 (2018).
21. S. S. Volkov, A. S. Vasiliev, and E. V. Sadyrin, *Abstr. XIV Int. Sci.-Techn. Conf. 'Dynamic of Technical Systems' (2018, MATEC Web Conf.)*, vol. 226: 03018-1.
22. T.-J. Liu and P. Li, *Appl. Math. Model.*, **69**: 1 (2019).

REFERENCES

1. V. I. Kopylov, Yu. V. Kolesnikov, I. V. Govorov, I. V. Gurei, and L. A. Parkhomenko, *Soviet Mater. Sci.*, **27**, No. 4: 424 (1992).
2. V. S. Antonyuk, *Sverkhtverdye Materialy*, No. 4: 72 (1998) (in Russian).
3. Ya. A. Kryl' and P. M. Prysyzhnyuk, *J. Superhard Mater.*, **35**, Iss. 5: 292 (2013).
4. L. Ropyak and V. Ostapovych, *Eastern European J. Enterprise Technol.*, **2**, No. 5 (80): 50 (2016).
5. P. N. Belkin, A. Yerokhin, and S. A. Kusmanov, *Surf. Coat. Technol.*, **307**, Part C: 1194 (2016).
6. M. M. Student, V. M. Dovhunyk, V. M. Posuvailo, I. V. Koval'chuk, and V. M. Hvozdet's'kyi, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 3: 359 (2017).
7. S. I. Krysh'topa, D. Y. Petryna, I. M. Bogatchuk, I. B. Prun'ko, and V. M. Mel'nyk, *Mater. Sci.*, **53**, Iss. 3: 351 (2017).
8. V. B. Tarel'nyk, O. P. Gaponova, Ye. V. Konoplyanchenko, N. S. Yevtushenko, and V. O. Herasymenko, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **40**, No. 6: 795 (2018) (in Russian).
9. I. P. Shatskii, *J. Appl. Mech. Tech. Phys.*, **30**, Iss. 5: 828 (1989).
10. I. P. Shats'kyi and M. V. Makoviichuk, *Mater. Sci.*, **39**, Iss. 3: 371 (2003).
11. I. P. Shats'kyi, *Mater. Sci.*, **51**, Iss. 3: 322 (2015).
12. V. A. Shevchuk, *Strength Mater.*, **32**, Iss. 1: 92 (2000).
13. V. V. Shyrovokov and O. V. Maksymuk, *Mater. Sci.*, **38**, Iss. 1: 62 (2002).
14. N. A. Dolgov and E. B. Soroka, *Strength Mater.*, **36**, Iss. 6: 636 (2004).
15. R. Kul'chyts'kyi-Zhyhailo and A. Bajkowski, *Mater. Sci.*, **49**, Iss. 5: 650 (2014).
16. I. P. Shatskyi, L. Y. Ropyak, and M. V. Makoviichuk, *Strength Mater.*, **48**, Iss. 5: 726 (2016).
17. I. Shatskyi, M. Makoviichuk, and L. Ropyak, *Transactions of the VŠB-TU Ostrava, Civ. Eng. Ser.*, **17**, No. 2: 109 (2017).
18. L. Ya. Ropyak, I. P. Shatskyi, and M. V. Makoviichuk, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, **39**, No. 4: 517 (2017) (in Ukrainian).
19. F. I. Stepanov and E. V. Torskaya, *Mechanics Solids*, **53**, Iss. 1: 60 (2018).
20. H. Song, L. Ke, Y. Wang, J. Yang, and H. Jiang, *Int. J. Appl. Mechanics*, **10**, No. 5: 1850049 (2018).
21. S. S. Volkov, A. S. Vasiliev, and E. V. Sadyrin, *Abstr. XIV Int. Sci.-Techn. Conf. 'Dynamic of Technical Systems' (2018, MATEC Web Conf.)*, vol. 226: 03018-1.
22. Liu Tie-Jun and Li Peixing, *Appl. Math. Model.*, **69**: 1 (2019).