doi: 10.32620/oikit.2025.105.07

УДК 621.9: 519 256

О. М. Гнитько, А. В. Кузнецова, О. В. Косенко

Моделювання коефіцієнта опору переміщенню металевої стружки

Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут»

У статті представлено теоретичні та практичні дослідження направлені на встановлення закономірностей зміни коефіцієнта опору переміщенню стружки в області можливої зміни параметрів системи комплексного використання мастильно-охолоджувального технологічного середовища. При проведенні експериментальних досліджень параметри, що варіюються, змінювалися в діапазонах: параметр шорсткості Rz = 1…500 мкм (Rz = 1, 25, 100, 300, 500); тиск у обсязі накопиченої стружки p = 0.00275…0.00975 МПа (p = 0.00275, 0.0055, 0.0075, 0.00975); вологість змінювалася на двох рівнях (надлишкова наявність і повна відсутність води). Результати досліджень показали, що найбільший вплив виявляє варіювання параметра шорсткості (збільшення коефіцієнта опору переміщенню стружки приблизно в 3 рази). Істотний вплив виявляє також змочування (збільшення коефіцієнта опору переміщенню стружки в 2 - 3 рази). Найменший вплив з розглянутих параметрів виявляє зміна тиску в обсязі стружки, що переміщується (зменшення коефіцієнта опору переміщенню стружки приблизно в 1.8 рази). Максимальна зміна значень коефіцієнта опору переміщенню стружки у дослідженому діапазоні варіювання параметрів становить 0.23…1.36, тобто, приблизно в 6 разів. На основі результатів експериментальних досліджень розроблені регресійні моделі зміни коефіцієнта опору переміщенню металевої стружки, які якісно добре співвідносяться з відомими в триботехніці закономірностями зміни кінематичного коефіцієнта тертя металу по металу й адекватно встановлюють відповідні кількісні співвідношення в дослідженому діапазоні можливої зміни параметрів системи силового впливу мастильно-охолоджувального технологічного середовища. Отримані моделі можуть бути використані для рішення широкого кола завдань, пов'язаних з оптимальним проєктуванням систем комплексного використання мастильно-охолоджувального технологічного середовища.

***Ключові слова*:** шорсткість, мастильно-охолоджувальне технологічне середовище, МОТС, тиск, змочування, регресійні моделі.

Вступ

Стійкою тенденцією сучасного машинобудівного виробництва є безперервне підвищення його продуктивності і якості продукції, що випускається. Це визначає актуальність пошуку шляхів підвищення ефективності технологічних операцій машинобудування, що не вимагають масштабних витрат на вдосконалювання основного устаткування й пристроїв.

Одне з напрямків реалізації цієї тенденції ґрунтується на концепції комплексного використання мастильно-охолоджувального технологічного середовища (МОТС) в умовах автоматизованого виробництва [1, 2]. Концепція передбачає одночасне використання МОТС для змащення й охолодження зони різання, силового впливу на оброблювані поверхні, відокремлювану стружку і т.і. з метою підвищення продуктивності обробки і якості поверхонь.

Моделювання систем силового впливу МОТС на металеву стружку з метою їх оптимального проєктування припускає встановлення закономірностей зміни коефіцієнта її опору переміщенню по оброблюваних поверхнях та по базових поверхнях. Незважаючи на наявність значної кількості фундаментальних робіт в

області триботехніки [3, 4, 5], закономірності впливу основних параметрів технологічних систем (шорсткості *Rz*, тиску в обсязі накопиченої стружки *p*, вологості *W* і т.п.) на опір переміщенню стружки практично не встановлені. Найменшою мірою досліджений спільний вплив цих параметрів.

Викладене визначає актуальність проведення спеціальних досліджень, спрямованих на встановлення закономірностей зміни коефіцієнта опору переміщенню стружки в області можливої зміни параметрів систем комплексного використання МОТС. Конкретною метою цієї роботи є моделювання коефіцієнта опору переміщенню металевої стружки для рішення завдань оптимального проєктування систем комплексного використання МОТС.

Експериментальна частина

Для досягнення поставленої мети на спеціальному повнорозмірному стенді виконаний комплекс експериментальних досліджень. У відповідність із проведеним плануванням експерименту, дослідження виконані у формі повнофакторного експерименту (ПФЕ) вигляду 3^4. При проведенні досліджень параметри, що варіюються, змінювалися в діапазонах:

- параметр шорсткості *Rz* = 1…500 мкм (*Rz* = 1, 25, 100, 300, 500);
- тиск у обсязі накопиченої стружки *p* = 0.00275…0.00975 МПа (*p* = 0.00275, 0.0055, 0.0075, 0.00975);
- вологість *W* змінювалася на двох рівнях (надлишкова наявність і повна відсутність води).

З метою варіювання фізико-механічних властивостей матеріалу, що транспортується, використовувалися сталева й алюмінієва спіральна стружка, що має форму пружини різної довжини й чавунна елементна стружка різного перетину. Результати експериментального визначення значень коефіцієнта опору переміщенню стружки f_c представлені на рис. 1, 2.

У результаті проведення експериментальних досліджень встановлене наступне.

1. Збільшення значення параметра шорсткості приводить до росту значення коефіцієнта опору. Так, при зміні *Rz* в дослідженому діапазоні *Rz* = 1…500 мкм, значення f_c (при *p* = 0.0055 МПа) змінюються в межах 0.32…1.0 (для сталі), 0.32…0.73 (для алюмінію), 0.36…0.91 (для чавуну).

2. Збільшення значення тиску в переміщуваному обсязі стружки приводить до зменшення значення коефіцієнта опору (приблизно в 1.8 рази). Так, при зміні *p* в діапазоні 0.00275…0.00975 МПа, значення f_c змінюються в межах 0.82…0.51 (для сталі), 0.73…0.41 (для алюмінію), 0.91…0.51 (для чавуну).

3. Змочування стружки приводить до істотного збільшення коефіцієнта опору для всіх типів стружки. Значення fc (для сталі, алюмінію й чавуну при Rz = 1 мкм) зростають: для p = 0.00275 МПа – приблизно в 2 рази; для p = 0.0055, 0.0075 і 0.00975 МПа – в 2,5… 3 рази.

4. Тип стружки (у дослідженому діапазоні її фізико-механічних властивостей) виявляє менш істотний вплив на значення коефіцієнта опору. При варіюванні значень тиску *p*, значення f_c відповідно для сталі, алюмінію й чавуну становлять (без змочування): при *p* = 0.00275 МПа – 0.82, 0.73, 0.91; при *p* = 0.0055 МПа – 0.64, 0.50, 0.64; при *p* = 0.0075 МПа – 0.60, 0.47, 0.60; при *p* = 0.00975 МПа – 0.51, 0.41, 0.51. При варіюванні значень параметра шорсткості *Rz*, значення f_c відповідно для сталі, алюмінію й чавуну становлять (без змочування): *Rz* = 1 мкм – 0.32, 0.32, 0.36; *Rz* = 25 мкм – 0.64, 0.50, 0.64;

Rz = 100 мкм – 0.82, 0.68, 0.82; *Rz* = 300 мкм – 0.69, 0.64, 0.75; *Rz* = 500 мкм – 1.0, 0.73, 0.91.

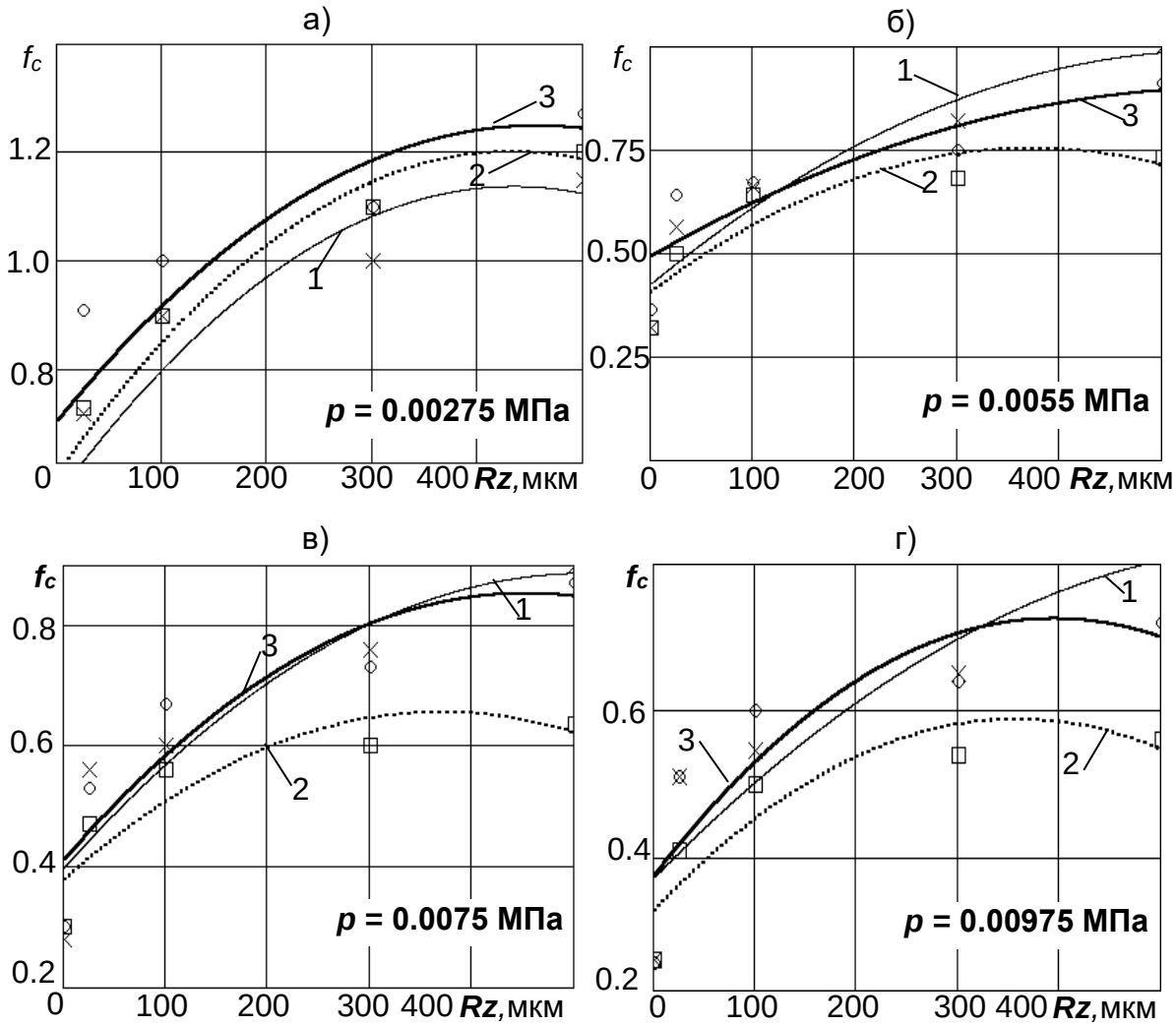

Рис. 1. Графіки зміни коефіцієнта опору як функції параметру шорсткості (*W* = 0 %) при тиску: а) *p* = 0.00275 МПа; б) *p* = 0.0055 МПа; в) *p* = 0.0075 МПа; г) *p* = 0.00975 МПа (1 - сталь (×); 2 - алюміній (□); 3 - чавун (◊))

Отримані експериментальні результати, у цілому, добре співвідносяться з наявними традиційними уявами про якісний характер протікання досліджуваних процесів.

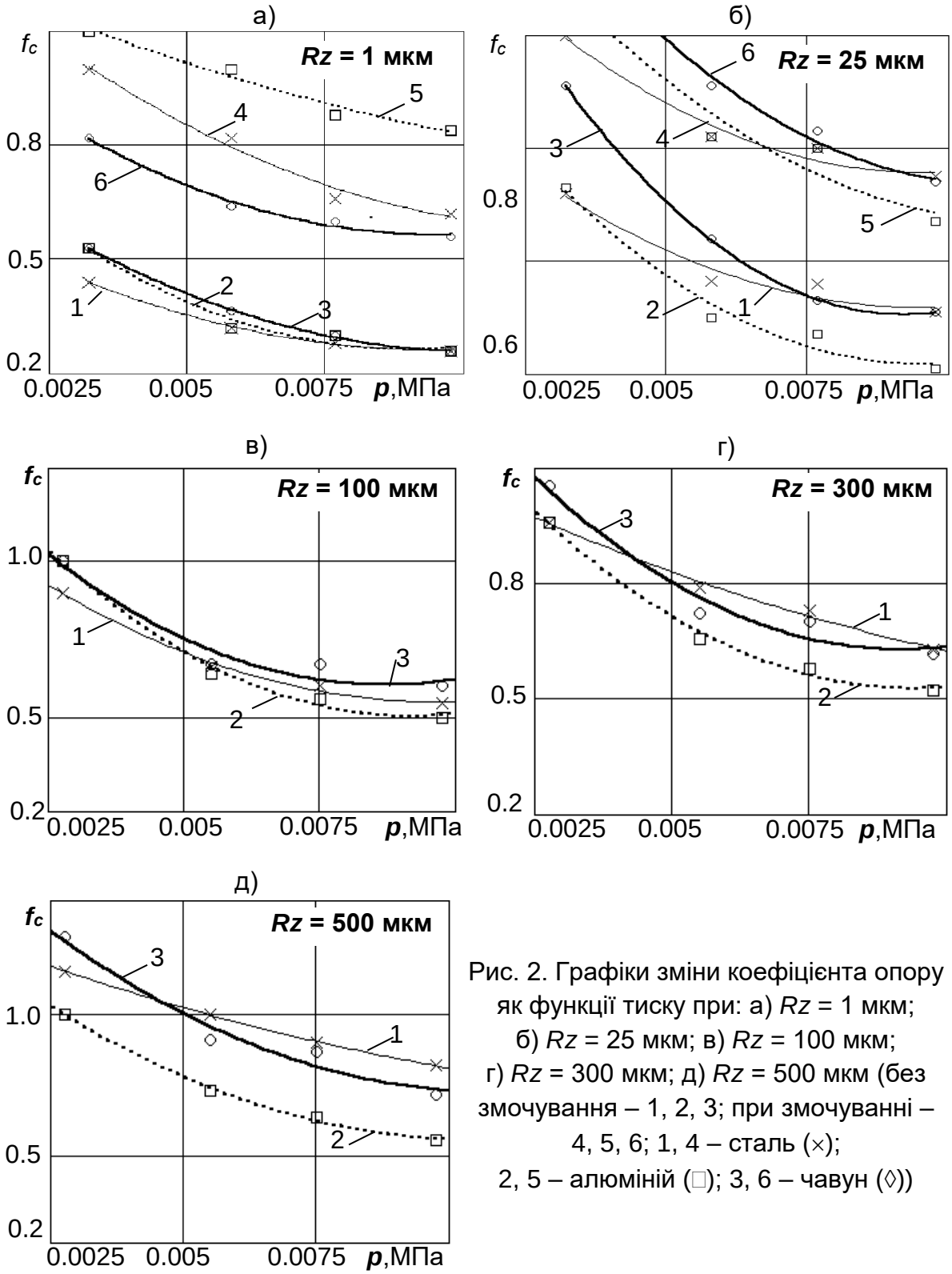

Рис. 2. Графіки зміни коефіцієнта опору як функції тиску при: а) *Rz* = 1 мкм; б) *Rz* = 25 мкм; в) *Rz* = 100 мкм; г) *Rz* = 300 мкм; д) *Rz* = 500 мкм (без змочування – 1, 2, 3; при змочуванні – 4, 5, 6; 1, 4 – сталь (×); 2, 5 – алюміній (□); 3, 6 – чавун (◊))

Викладене дозволяє зробити наступні висновки:

- отримані експериментальні дані відображають досліджувані процеси з достатнім ступенем вірогідності;
- серед досліджених параметрів найбільш вагомими є шорсткість *Rz*, тиск *p* і вологість *W*.

Теоретична частина

Найбільш зручною для практичного використання формою представлення функціонального зв'язку між досліджуваними параметрами є залежність

$$f_c = F(Rz, p, W). \quad (1)$$

Однак, моделі такого вигляду не дозволяють виконати їхню графічну інтерпретацію й візуалізацію. Тому, використовуючи сучасні засоби автоматизації створення моделей, на основі результатів експериментальних досліджень створені тривимірні нелінійні поліноміальні моделі множинної регресії другого порядку (табл. 1) для визначення значень коефіцієнта опору переміщенню металевої стружки вигляду

$$f_c = F(Rz, p) = \sum_{j=0}^{k} b_j \cdot Rz^{I_j} \cdot p^{J_j}, \quad (2)$$

де b_j – коефіцієнти рівняння множинної регресії (j = 0, 1…k); I_j, J_j – показники ступеня при незалежних змінних рівняння регресії; k – число членів рівняння регресії.

Таблиця 1

Параметри тривимірних нелінійних поліноміальних моделей множинної регресії другого порядку (W = 0)

j	I_j	J_j	b_j	j	I_j	J_j	b_j	j	I_j	J_j	b_j
Сталева стружка				*Алюмінієва стружка*				*Чавунна стружка*			
0	1	1	-0,039	0	1	1	-0,04	0	1	1	-0,057
1	0	2	3,949·103	1	0	2	8,709·103	1	0	2	7,642·103
2	0	1	-81,846	2	0	1	-156,587	2	0	1	-143,007
3	0	0	0,775	3	0	0	1,02	3	0	0	1,039
4	1	0	2,249·10-3	4	1	0	-2,179·10-3	4	1	0	2,459·10-3
5	2	0	-1.958·10-6	5	2	0	-2,726·10-6	5	2	0	-2,456·10-6

На рис. 3 представлена їхня графічна інтерпретація.

Моделі (1) представлені також у вигляді

$$f_c = F'(Rz, p) = c \cdot Rz^{k_1} \cdot p^{k_2}, \quad (3)$$

де c – коефіцієнт рівняння регресії; k1, k2 – показники ступеня відповідно для параметрів Rz і p.

Моделі виду (2), відповідаючи вимогам адекватності, мають більшу наочність і компактністю, мають прийнятну для інженерних розрахунків похибку.

W = 0 %

Сталева стружка

$$f_c = 0{,}057 \cdot Rz^{0{,}168} \cdot p^{-0{,}334} \quad \Delta_{\text{сер}} = 5{,}04\ \% \quad \Delta_{\max} = 10{,}4\ \% \quad (4)$$

Алюмінієва стружка

$$f_c = 0{,}026 \cdot Rz^{0{,}123} \cdot p^{-0{,}501} \quad \Delta_{\text{сер}} = 4{,}1\ \% \quad \Delta_{\max} = 12{,}1\ \% \quad (5)$$

Чавунна стружка

$$f_c = 0{,}034 \cdot Rz^{0{,}151} \cdot p^{-0{,}46} \quad \Delta_{\text{сер}} = 5{,}35\ \% \quad \Delta_{\max} = 11{,}7\ \%. \quad (6)$$

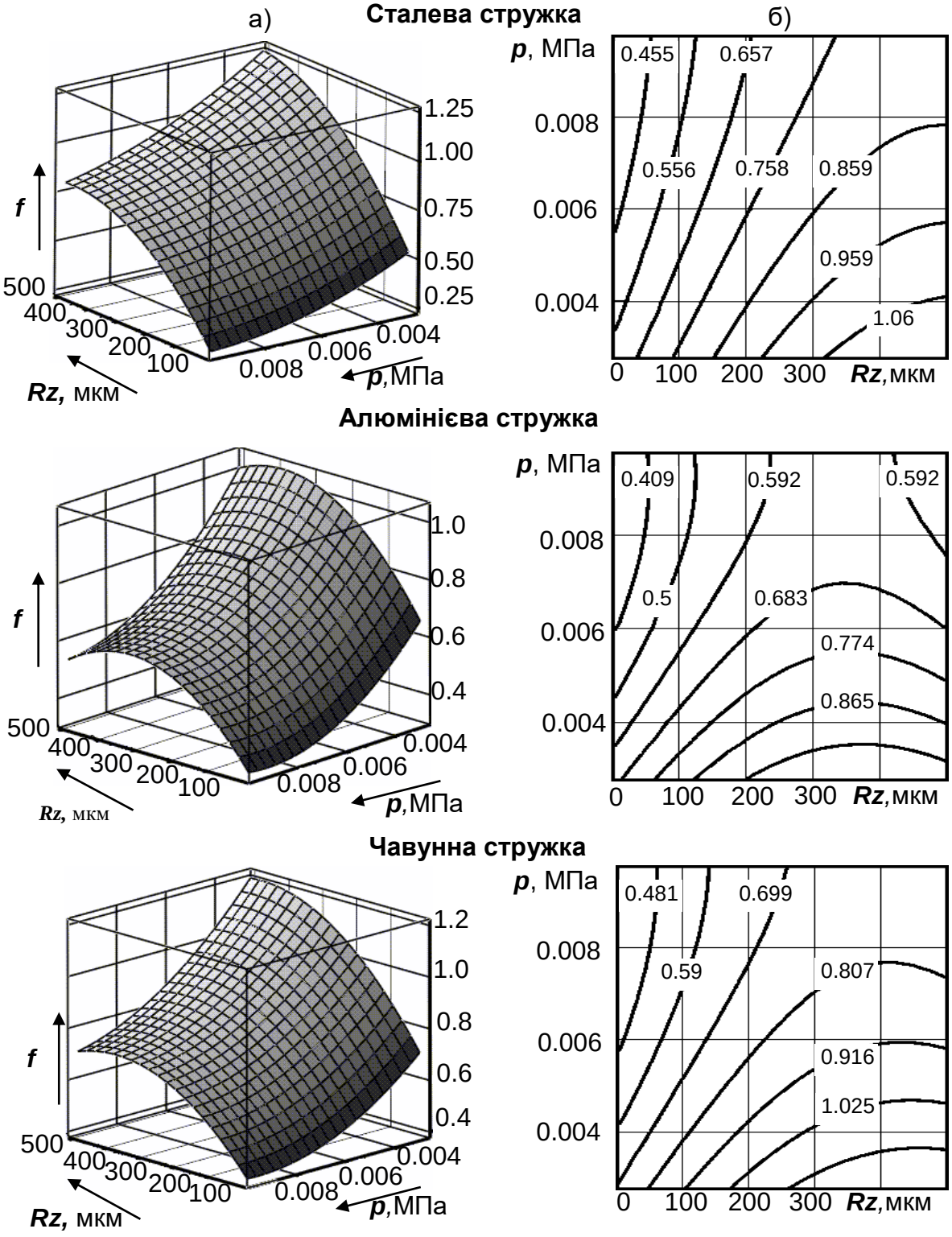

Рис. 3. Графічна інтерпретація тривимірних моделей множинної регресії зміни коефіцієнта опору переміщенню стружки для значення вологості *W* = 0 % (а – графіки поверхонь; б – карти ліній рівнів)

Висновки

1. Встановлено вплив варіювання основних параметрів систем силового впливу МОТС на значення коефіцієнта опору переміщенню металевої стружки. Найбільший вплив виявляє варіювання параметра шорсткості (збільшення f_c приблизно в 3 рази). Істотний вплив виявляє також змочування (збільшення f_c в 2 – 3 рази). Найменший вплив з розглянутих параметрів виявляє зміна тиску в обсязі стружки, що переміщується (зменшення f_c приблизно в 1.8 рази).

2. Максимальна зміна значень f_c у дослідженому діапазоні варіювання параметрів становить 0.23…1.36, тобто змінюється приблизно в 6 разів.

3. Розроблені регресійні моделі зміни коефіцієнта опору переміщенню металевої стружки.

4. Найбільш прийнятними для практичного використання з метою рішення поставлених завдань є поліноміальні нелінійні моделі множинної регресії 2-го порядку.

Таким чином, отримані моделі можуть бути використані для розв’язання широкого кола завдань, пов'язаних з оптимальним проєктуванням систем комплексного використання МОТС.

References

1. Cheatham, J.B., and Yarbrough J.G. Chip Removal by a Hydraulic Jet. SPE J., 4, 1964, 21–25. doi: https://doi.org/10.2118/782-PA.

2. Zili Zhang, Chunjin Wang, Jiang Guo, Chi Fai Cheung. Micro-milling tool mark removal mechanism by fluid jet polishing and its application for the precision manufacturing of micro-fluidic chip molds. Tribology International. Volume 189, 2023, 108913. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108913.

3. Peter J Blau. The significance and use of the friction coefficient, Tribology International, Volume 34, Issue 9, 2001, Pages 585-591. https://doi.org/10.1016/S0301-679X(01)00050-0.

4. Nam P. Suh, Mohsen Mosleh, Phillip S. Howard, Control of friction, Wear, Volume 175, Issues 1–2, 1994, Pages 151-158. https://doi.org/10.1016/0043-1648(94)90178-3.

5. David Tabor. Friction—The Present State of Our Understanding. J. of Lubrication Tech. Apr 1981, 103(2). 169-179. https://doi.org/10.1115/1.3251622.

Надійшла до редакції 26.08.2025, розглянута на редколегії 26.08.2025

Modeling the coefficient of resistance to the movement of metal chips

The article presents theoretical and practical studies aimed at establishing the patterns of changes in the coefficient of resistance to chip movement in the area of possible changes in the parameters of the system of complex use of the lubricating and cooling technological environment. When conducting experimental studies, the varying parameters changed in the ranges: roughness parameter Rz = 1…500 μm (Rz = 1, 25, 100, 300, 500); pressure in the volume of accumulated chips p = 0.00275…0.00975 MPa (p = 0.00275, 0.0055, 0.0075, 0.00975); humidity changed at two levels (excessive presence and complete absence of water). The results of the studies showed that the greatest influence is exerted by the variation of the roughness

parameter (an increase in the coefficient of resistance to chip movement by approximately 3 times). Wetting also has a significant effect (an increase in the resistance coefficient to chip movement by 2-3 times). The smallest effect of the considered parameters is exerted by the change in pressure in the moving volume of chips (a decrease in the resistance coefficient to chip movement by approximately 1.8 times). The maximum change in the resistance coefficient to chip movement within the studied range of parameter variation is from 0.23 to 1.36, which represents approximately a sixfold increase. Based on the results of experimental studies, regression models of the change in the resistance coefficient to metal chip movement have been developed, which qualitatively correspond well with the known laws of the change in the kinematic coefficient of metal-on-metal friction in tribotechnics and adequately establish the corresponding quantitative ratios in the studied range of possible changes in the parameters of the force effect system of the lubricating and cooling technological environment. The obtained models can be used to solve a wide range of problems related to the optimal design of systems for the complex use of the lubricating and cooling technological environment.

Keywords: roughness, lubricating and cooling technological medium, MOTS, pressure, wetting, regression models.

Відомості про авторів:

Гнитько Олександр Миколайович – доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; o.gnytko@khai.edu; ORCID: 0000-0002-6560-3262.

Кузнецова Анна Вадимівна – доцент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; a.kuznetsova@khai.edu; ORCID: 0000-0001-5843-6569.

Косенко Оксана Валеріївна – асистент кафедри теоретичної механіки, машинознавства та роботомеханічних систем, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут» м. Харків, Україна; o.kosenko@khai.edu; ORCID: 0009-0007-6264-5778.

About the Author:

Gnytko Oleksandr – Associate Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; o.gnytko@khai.edu; ORCID: 0000-0002-6560-3262.

Kuznetsova Anna – Associate Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; a.kuznetsova@khai.edu; ORCID: 0000-0001-5843-6569.

Kosenko Oksana – Assistant of Professor of Department of Theoretical Mechanics, Engineering and Robomechanical Systems, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine; o.kosenko@khai.edu; ORCID: 0009-0007-6264-5778.