

**Ю.В. Петраков, д.т.н., проф.**

**В.В. Писаренко, аспір.**

*Національний технічний університет України «КПІ»*

## **ВИЗНАЧЕННЯ БЕЗДЕФЕКТНОГО РЕЖИМУ ШЛІФУВАННЯ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ**

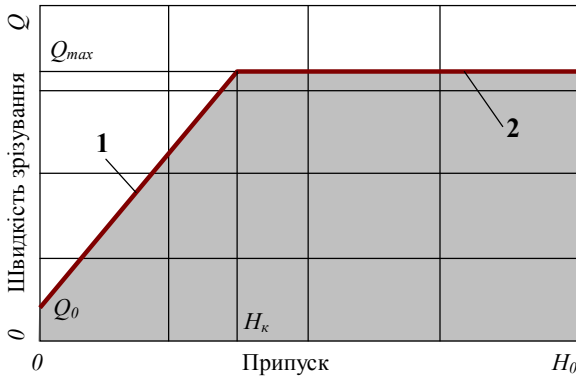
*Наведено методику визначення бездефектного режиму шліфування титанових сплавів, що використовуються для виготовлення імплантатів та протезів, а саме, протезів колінних суглобів людини. Представлено результати експериментальних досліджень зміни структури поверхневого шару при шліфуванні титанового сплаву Grade 5 ALI ASTM F67-89 від режиму різання, що мають формувати границю бездефектного шліфування для визначення закону управління зрізуванням припуску на шліфувальних верстатах з ЧПУ при виготовленні протезів колінних суглобів людини.*

**Вступ.** Імплантати та протези суглобів людини, зокрема колінних суглобів, виготовляються переважно з титанових сплавів, що не відторгаються організмом людини і мають підвищену міцність, твердість та зносостійкість. Протез колінного суглобу має складну робочу поверхню, яка обробляється шліфуванням [1]. За останні роки обробка ортопедичних імплантатів вручну була поступово витіснена шліфувальними верстатами з ЧПУ. Розвиток програмного забезпечення постпроцесорів у вигляді CAD/CAM систем призвело до підвищення продуктивності, проте наразі залишаються не використаними всі можливості такого процесу. Якщо для геометричного формоутворення 3-D поверхні застосовують спеціальні CAD/CAM системи, то визначення режиму шліфування залишається за технологом, який просто не в змозі призначити належне управління на всіх ділянках поверхні і за всією глибиною припуску, що зрізується.

Процес шліфування суттєво відрізняється від лезової обробки і потребує безперервного управління для забезпечення належної якості при максимально можливій продуктивності. Швидкісне мікрорізання при шліфуванні створює велику кількість високотемпературних осередків в поверхневому шарі деталі, що спричиняє його інтенсивний нагрів. Термічний процес в поверхневому шарі деталі характеризується значною швидкістю та високою (до 1300 °C) миттєвою температурою нагріву, короткочасністю витримки при такій температурі й високою швидкістю охолодження. Такі умови провокують структурні зміни поверхневого шару, тобто появу різних дефектів у вигляді припалів, зниження твердості тощо. Тому актуальним є завдання визначення граничних режимів шліфування, що будуть застосовані у CAM системі для автоматичного

проектування закону управління режимом шліфування при зрізуванні припуску і дозволять отримати якісну робочу поверхню деталі з максимальною продуктивністю обробки.

**Постановка задачі.** Відомо, що комплексним показником інтенсивності процесу шліфування є швидкість зрізування припуску і для оптимізації процесу шліфування управління треба вести саме за швидкістю зрізування припуску якомога ближче до граничного алгоритму [2]. Граничний алгоритм будується у фазовій площині «припуск–швидкість зрізування припуску» і складається з двох ліній (рис. 1).



*Рис.1. Граничний алгоритм*

Лінія 2 визначається за умов максимально допустимої сили різання, наприклад, за максимально допустимою деформацією пружної технологічної оброблюючої системи (ТОС), а лінія 1 з умов бездефектного шліфування. Отже процес шліфування має відбуватися спочатку (до критичної величини припуску  $H_k$ , що залишився) зі швидкості зрізування  $Q_{max}$ , а потім за лінією 1 і закінчуватись при деякій швидкості зрізування  $Q_0$ , тобто оптимальний закон управління повинен бути розташований в затемненій області рисунку 1. Таке управління (без виходжування) рекомендується застосовувати на всіх операціях шліфування і його ефективність підтверджена на практиці відомими фірмами, що випускають шліфувальні верстати з ЧПУ, наприклад, фірмою Studer [3]. Таким чином, одним з важливих завдань для оптимізації процесу шліфування є визначення границі бездефектного шліфування, зокрема титанових сплавів для виготовлення імплантатів. Така задача може бути вирішена

експериментально, при класичній постановці за методикою планування двофакторного експерименту.

**Вирішення задачі.** Умови та обладнання для проведення експерименту:

- заготовка – циліндричні заготовки з титанового сплаву Grade 5 ALI ASTM F67-89, хімічний склад та фізико механічні властивості наведено в таблиці 1. У зв'язку з високою вартістю матеріалів, всі заготовки діаметром 10 мм та довжиною 60 мм;
- круги: ПП 250x25x76 64С 35 СТ1 – для шліфування титану;
- верстат, на якому буде проводитися експеримент: плоско шліфувальний моделі КПША, фото верстату представлено на рисунку 2;
- змащувально-охолоджуюча рідина – емульсія.

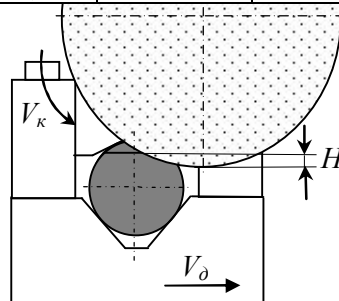
Таблиця 1

*Хімічний склад та фізико-механічні властивості  
Grade 5 ALI ASTM F67-89*

Хімічний склад							
Fe <sub>max</sub>	O <sub>max</sub>	N <sub>max</sub>	C <sub>max</sub>	H <sub>max</sub>	Al	V	Ti
0,25	0,13	0,05	0,08	0,015	5,5–6,5	3,5–4,5	Залишок
Механічні властивості							
межа міцності при розтягу $R_M = N/mm^2$		0,2 % межа текучості $R_{p0,2} = N/mm^2$			відносне подовження $A_5 = \% \text{ min}$		
825–860		760–795			8–10		
Фізичні властивості							
густина, г/см <sup>3</sup>	відносна теплоємність, °С	коефіцієнт лінійного теплового розширення, мм/°С	теплопровідність, Втм/°С	відносний електричний опір, Ом мм <sup>2</sup> /м	модуль еластичності, КН/мм <sup>2</sup>		
4,45	0,56	$8,9 \cdot 10^{-6}$	7,1	1,71	114		



а)



б)

Рис. 2. Загальний вигляд верстату (а) і схема шліфування для проведення експериментів (б)

Як зазначалося раніше, через високу вартість титанового сплаву для проведення експерименту плоским шліфуванням було запропоновано шліфування лиски на циліндричній заготовці, закріпленій в призмі, котра встановлена на магнітний стіл плоскошліфувального верстату (рис. 2).

Для визначення швидкості зрізування припуску можна скористатися такою формулою, що визначає цей параметр через режим різання:

$$Qv = Q \cdot V_o \cdot B, \quad (1)$$

де  $Q$  – аналог швидкості зрізування припуску,  $\text{мм}^2$ ;  $V_o$  – швидкість подачі столу верстату,  $\text{мм/с}$ ;  $B$  – ширина шліфування,  $\text{мм}$ .

Аналог швидкості зрізування припуску розраховується за формулою [2]:

$$Q = 0,5L_k^2, \quad (2)$$

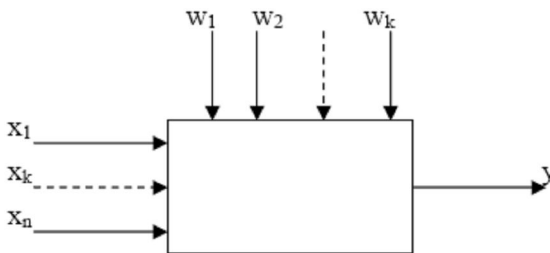
де  $L_k$  – дуга контакту деталі й шліфувального круга,  $\text{мм}$ .

В свою чергу, дуга контакту для плоского шліфування визначається за формулою:

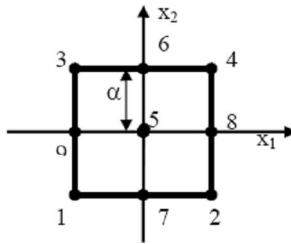
$$L_k = R_k \cdot \arccos\left(\frac{R_k - H}{R_k}\right), \quad (3)$$

де  $R_k$  – радіус шліфувального круга,  $\text{мм}$ ;  $H$  – припуск, який знімається за один прохід,  $\text{мм}$ .

Об'єкт дослідження можна представити у вигляді системи «чорний ящик» (рис. 3), математична модель якого складається з вивчення залежності відгуку системи  $Y$  на зміну входних вимірювальних та керованих параметрів  $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$  при дії випадкових факторів  $W(w_1, w_2, \dots, w_k)$ , які називають «шумом» об'єкта. Комплекс параметрів  $X$  називають основним, він визначає умови експерименту. Вихідним параметром  $Y$  можуть бути будь-які технологічні або технічні показники процесу, що досліджується.



*Рис. 3. Система «чорний ящик»*



*Рис. 4. Композиційний ортогональний план другого порядку для  $k = 2$*

Випадковим буде вважатися будь-який фактор, що не увійшов в основний комплекс параметрів [4]. При опису області, близької до екстремуму, частіше використовують поліноми другого порядку, що пов'язано в першу чергу з тим, що поліноми другого порядку легко піддаються систематизації та дослідженню на екстремум. При цьому кількість дослідів  $N$  повинно бути не менше числа коефіцієнтів, які визначаються в рівнянні регресії другого порядку для  $k$  факторів:

$$y(x_1, \dots, x_k) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k b_{ij} \cdot x_i^2 \quad (4)$$

За методикою, представленою в [4], з метою скорочення кількості дослідів доцільно використовувати композиційні (послідовні) плани. Композиційний план складається з експериментів ПФЕ  $2k$  ( $k \leq 5$ ), до яких додаються експеримент у центрі плану та в  $2k$  зіркових точках, розташованих на осях фіктивного простору. Умовно, композиційний план можна представити у такому вигляді (рис. 4.).

Загальна кількість дослідів розраховується за формулою:

$$N = N_0 + 2k + n_0, \quad (5)$$

де  $n_0$  – кількість дослідів в центрі плану,  $k$  – кількість факторів,  $N_0$  – кількість дослідів повного факторного експерименту  $2k$ .

Відповідно до (5), для запланованого експерименту достатньо провести  $N = 4 + 2 \cdot 2 + 1 = 9$  дослідів.

Для двофакторного експерименту рівняння регресії (4) прийме такий вигляд:

$$y(x_1, x_2) = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2. \quad (6)$$

Отже, при проведенні експериментів для плоского шліфування у якості параметрів, що варіюються були прийняті швидкість подачі столу (деталі)  $x_1$  і глибина різання  $x_2$ . Швидкість подачі столу змінювалась у діапазоні  $V_d = 2 \dots 10$  мм/с; глибина різання – у діапазоні  $H = 0,02 \dots 0,08$  мм.

Після шліфування зразків за обраною схемою зміни режиму різання наступним кроком проведення експерименту є підготовка високоякісних шліфів для подальшого їх дослідження. Для виготовлення шліфів в обойму пресувального пристрою моделі Simpli Met 1000 (рис. 5, а), вставляються раніше відрізані зразки, вони розташовуються рівномірно по площині кола, щоб бакелітова зв'язка максимально повністю заповнила порожнини між зразками. Після того як зразки встановлено, в обойму засипається порошок бакелітової зв'язки та включається режим спікання та пресування обойми зі зразками.

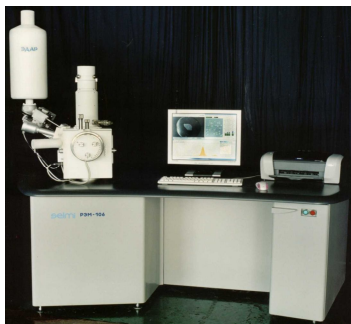
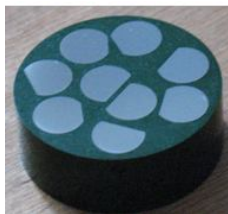
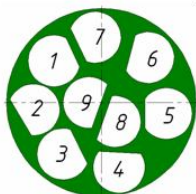
Робочу поверхню запресованих в обойму зразків необхідно довести до якості, яка гарантує гарне зображення на електронному мікроскопі, та перевірити відсутність на поверхні подряпин та нерівностей. Доведення зразка здійснюється на шліфувально-полірувальному верстаті моделі Buehler GP beta (рис. 5, б), за 8 етапів. Спочатку шліфування крупними абразивами, потім меншими і полірування здійснюється на фетровому крузі зі застосуванням пасти з оксидами алюмінію.



*Рис. 5. Загальний вигляд обладнання для підготовки шліфа: а) пресувальний пристрій Simpli Met 1000; б) шліфувально-полірувальний верстат Buehler GP beta*

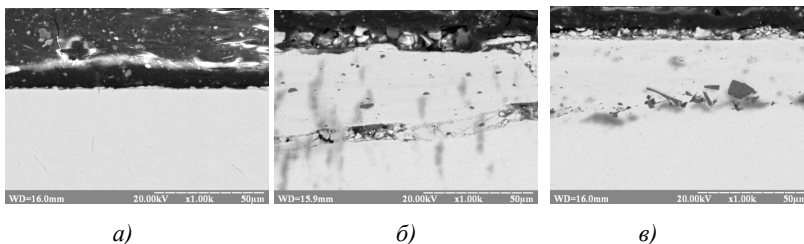
Застосована технологія підготовки шліфів зразків гарантує якісне розпізнавання структури поверхневого шару на електронному

мікроскопі. Розташування зразків у обоймі та фото готової обойми показано на рисунку 6.



*Рис. 6. Розташування зразків у бакелітовій обоймі та загальний вигляд електронного мікроскопу Selmi РЭМ-106И*

Після ретельної підготовки зразків був досліджений поверхневий шар шліфованої поверхні, в поперечному напрямі до осі деталі, та визначена глибина дефектного шару при різних режимах шліфування (рис. 7).



*Рис. 7. Фото шліфів: а) швидкість зрізування – 935 мм<sup>3</sup>/с, глибина дефектного шару – 0,70 мкм; б) швидкість зрізування – 1558 мм<sup>3</sup>/с, глибина дефектного шару – 33,9 мкм; в) швидкість зрізування – 2500 мм<sup>3</sup>/с, глибина дефектного шару – 42,3 мкм*

*Таблиця 2*

*Результати експериментів для шліфування титану*

№ досліду	Глибина різання $H$ , мм	Швидкість деталі $V_d$ , мм/с	Дуга контакту $L_k$ , мм	Аналог швидкості різання $Q_p$ , мм <sup>2</sup>	Швидкість зрізування припуску $Q_v$ , мм <sup>3</sup> /с	Глибина дефектного шару $H_d$ , мкм
1	0,02	2	2,24	2,50	125	0,020
2	0,08	2	4,47	10,0	500	0,300

3	0,02	10	2,24	2,50	625	0,650
4	0,08	10	4,47	10,0	2500	42,30
5	0,05	6	3,53	6,23	935	0,700
6	0,08	6	4,47	10,0	1500	33,40
7	0,02	6	2,24	2,50	375	0,150
8	0,05	10	3,53	6,23	1558	33,90
9	0,05	2	3,53	6,23	311	0,08

*Примітка: діаметр шліфувального круга 250 мм, ширина шліфування 25 мм*

Аналіз структури поверхневого шару прошліфованих зразків показав, що при режимі обробки до швидкості зрізування припуску 935 мм<sup>3</sup>/с дефектний шар майже відсутній, при збільшенні інтенсивності процесу з'являється дефектний шар у вигляді припалів, а при швидкості зрізування 2500 мм<sup>3</sup>/с в дефектний шар навіть занурюються зерна абразиву шліфувального круга (рис. 7, в), тобто спостерігається явище шаржирування поверхневого шару заготовки при шліфуванні.

За результатами експерименту і вимірів на електронному мікроскопі була побудована матриця ортогонального планування для 2-х факторів, що представлена в таблиці 2.

**Визначення рівняння регресії.** Для побудови математичної моделі необхідно визначити вектор оцінок коефіцієнтів регресії. Згідно з методом найменших квадратів, вектор отримується з виразу (7):

$$s = (X^T X)^{-1} X^T Y. \tag{7}$$

Матриця  
X:

1	0.02	2
1	0.08	2
1	0.02	10
1	0.08	10
1	0.05	6
1	0.08	6
1	0.02	6
1	0.05	10
1	0.05	2

Матриця  
Y:

0.02
0.3
0.65
42.3
0.7
33.4
0.15
33.9
0.08

Матриця X<sup>T</sup>:

1	1	1	1	1	1	1	1	1
0.02	0.08	0.02	0.08	0.05	0.08	0.02	0.05	0.05
2	2	10	10	6	6	6	10	2

Після перемноження матриць (X<sup>T</sup>X) :



$$\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X} = \begin{vmatrix} 9 & 0,45 & 54 \\ 0,45 & 0,28 & 2,7 \\ 54 & 2,7 & 420 \end{vmatrix}.$$

В матриці,  $(\mathbf{X}^T\mathbf{X})$  число 9, що знаходиться на перетині 1-ї строки й 1-го стовпця, отримане як суму множення елементів 1-ї строки матриці  $\mathbf{X}^T$  й 1-го стовпця матриці  $\mathbf{X}$ .

Аналогічно, після перемноження матриць  $(\mathbf{X}^T\mathbf{Y})$ :

$$\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y} = \begin{vmatrix} 111,5 \\ 7,83 \\ 974,8 \end{vmatrix}.$$

Отже, зворотна матриця  $(\mathbf{X}^T\mathbf{X})^{-1}$  має вигляд:

0.95	-9.26	-0.0625
-9.26	185.19	0
-0.0625	0	0.0104

Таким чином, вектор оцінок коефіцієнтів регресії дорівнює

$$s = (\mathbf{X}^T \cdot \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \cdot \mathbf{Y} = \begin{vmatrix} 0,949 & -9,259 & -0,063 \\ -9,259 & 185,185 & 0 \\ -0,063 & 0 & 0,01 \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} 111,5 \\ 7,83 \\ 974,8 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -27,607 \\ 417,667 \\ 3,185 \end{vmatrix}.$$

В результаті виконаних математичних перетворень було отримане рівняння регресії, що пов'язує глибину  $Y$  дефектного шару зі швидкістю подачі столу ( $x_1$ ) та глибиною різання ( $x_2$ ):

$$y = -27,607 + 417,667x_1 + 3,185x_2.$$

Для визначення закону управління режимом різання, що забезпечуватиме бездефектне шліфування можна скористатися безпосередньо залежністю (8) з урахуванням діапазонів зміни параметрів, що управляються. Проте, підхід, що базується на застосуванні головного комплексного показника процесу шліфування, яким є швидкість зрізування припуску (дивись залежності (1)–(3)) надає можливість звести вирішувану задачу до однофакторної моделі (з урахуванням отриманого рівняння (8)). У графічному вигляді отримані результати представлено на рисунку 8.

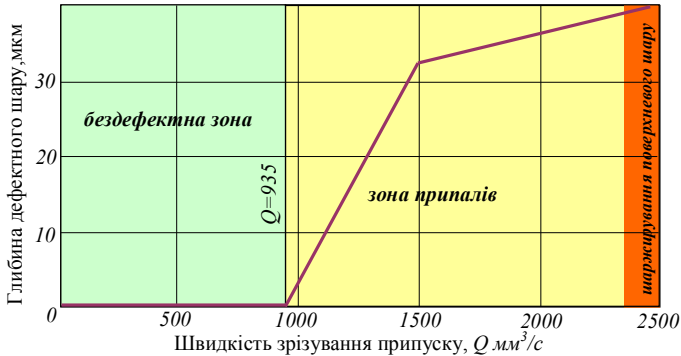


Рис. 8. Графік залежності глибини дефектного шару від швидкості зрізування припуску

### Висновки:

1. Запропонована методика визначення режиму бездефектного шліфування, яка дозволяє отримати одночасно як математичну модель, що зв'язує глибину дефектного шару зі складовими режиму різання, так і зв'язок з комплексним показником інтенсивності процесу шліфування – швидкістю зрізування припуску – який об'єктивно відображає реальний процес різання при шліфуванні складних 3D поверхонь, якими є поверхні протезів колінних суглобів людини.
2. Експериментально визначено зміну структури поверхневого шару від режиму різання при шліфуванні титанового сплаву марки Grade 5 ALI ASTM F67-89. Визначено границю бездефектного шліфування для формування закону управління зрізуванням припуску на шліфувальних верстатах з ЧПУ, що складає 935 мм<sup>3</sup>/хв. Таким чином, створені всі умови для формування закону управління шліфувального верстата з ЧПУ при виготовленні протезів колінного суглоба людини.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Сайт фірми ANCA. Применение в медицине // <http://www.anca.com>.
2. Петраков Ю.В. Автоматичне управління процесами обробки матеріалів різанням / Ю.В. Петраков. – К. : УкрНДІАТ, 2004. – 383 с.
3. Петраков Ю.В. Розвиток САМ-систем автоматизованого програмування верстатів з ЧПУ / Ю.В. Петраков. –К. : Січка, 2011. – 221 с.

4. *Гайдадин А.Н.* Использование метода композиционного планирования эксперимента для описания технологических процес сов / *А.Н. Гайдадин, С.А. Єфремова.* – Волгоград, 2008. – 16 с.

ПЕТРАКОВ Юрій Володимирович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- управління процесами оброблення (лезвийна, абразивна тощо) деталей на верстатах з ЧПУ;
- інтегровані CAD/CAM-системи.

ПИСАРЕНКО Василь Віталійович – аспірант кафедри технології машинобудування Національного технічного університету України «КПІ».

Наукові інтереси:

- управління процесами виготовлення складних поверхонь, зокрема, протезів колінних суглобів людини на верстатах з ЧПК.

Подано 11.05.2011

