

УДК 621.822

С.А. Мороз, В.В. Пташенчук
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА ЯКІСТЬ ПОВЕРХНІ
ДЛЯ ОПЕРАЦІЇ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ

В статті наведені експериментальні дослідження процесу алмазного вигладжування з використанням вигладжуючих інденсторів з синтетичного алмазу типу АКТМ. Проведений чотирьохфакторний експеримент та побудована регресійна модель взаємозв'язку шорсткості поверхні та технологічних режимів алмазного вигладжування.

Ключові слова: алмазне вигладжування, шорсткість, технологічні режими.

Рис. 2. Табл. 3. Форм. 9. Літ. 10.

С.А. Мороз, В.В. Пташенчук
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТИ
ДЛЯ ОПЕРАЦИИ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ

В статье приведены экспериментальные исследования процесса алмазного выглаживания индентором с синтетического алмаза типа АКТМ. Проведенный четырёхфакторный эксперимент и построена регрессионная модель взаимосвязи шероховатости поверхности с технологическими режимами алмазного выглаживания.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, шероховатость, технологические режимы.

S.A. Moroz, V. V. Ptashenchuk
INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE QUALITY OF SURFACE
SMOOTHING OPERATION

The paper presents the experimental research of smoothing operation using synthetic diamond indenter type AKTM. Four-factory experiment conducted and constructed regression model the relationship of surface roughness and technological modes of smoothing operation.

Keywords: smoothing operation, roughness, technological regimes.

Аналіз досліджень і публікацій, в яких вирішувалася дана проблема. Практичними дослідженнями процесу алмазного вигладжування для синтетичних алмазів типу АСБ та АСПК було встановлено ряд експериментальних залежностей, що пов'язували між собою величини технологічних режимів, параметри початкового мікропрофілю поверхні та вигладженої поверхні [3], [6] – [8], [10]. Однак, взаємозв'язки між якістю вигладженої поверхні інструментом із синтетичного алмазу типу АКТМ та режимами алмазного вигладжування невідомі.

Постановка проблеми. Надійність та довговічність роботи машин та механізмів у великій мірі пов'язана з якісним станом поверхневого шару деталей. Від параметрів поверхневого шару залежать експлуатаційні властивості – опір втомі, зносостійкість, корозійна стійкість, опір контактній втомі тощо. Зв'язок характеристик якості поверхневого шару з експлуатаційними властивостями деталей свідчить про те, що оптимальна (з огляду підвищення експлуатаційних властивостей деталей) поверхня повинна бути достатньо твердою, мати залишкові напруження стиску, дрібнодисперсну структуру, згладжену форму мікронерівностей з великою площею опорної поверхні [4]. Одним із способів отримання необхідної величини мікрогеометрії робочої поверхні є оброблення алмазним вигладжуванням, при якому стружка не утворюється, а відбувається тонка поверхнева пластична деформація (ППД) поверхневого шару [6] – [8], [10].

На сучасному етапі розвитку науки і виробництва створюються нові зразки синтетичних алмазних матеріалів. Одним з таких синтетичних матеріалів є алмаз типу АКТМ. Його характеристики по твердості, міцності на стиск, модулю пружності, теплопровідності та термостабільності є кращими у порівнянні з аналогами (АСБ та АСПК) (табл. 1).

Таблиця 1. Характеристики фізико-механічних властивостей синтетичного алмазу типу АКТМ

Густина, г/см ³	3,45	Модуль Юнга, ГПа	970
Твердість за Кнупом, ГПа	50-55	Теплопровідність, Вт/(м·К)	250-300
Трещиностійкість, МПа·м ^{1/2}	10-12	Зносостійкість при правці корундового круга, мг/кг	~ 4,4
Міцність на стиск, ГПа	2,2-3,1	Термостабільність, К	~ 1500

Однак для вигладжувального інструменту з вказаного матеріалу не відомо чітких залежностей між технологічними режимами та якістю поверхні після оброблення. Очевидно, що технологічні режими для алмазного вигладжування потрібно інтенсифікувати для підвищення продуктивності оброблення.

Формулювання цілей статті. Для реалізації багатофакторної регресійної моделі $R_a = f(P_6, s_6, V_6, R_{an})$ процесу алмазного вигладжування, яка відображає кількісні зв'язки між силою вигладжування (P_6), подачею (s_6), швидкістю вигладжування (V_6), вихідними параметрами якості поверхневого шару R_{an} (середнє арифметичне відхилення профілю, початкове) і параметром якості поверхневого шару (R_a), був спланований і поставлений практичний експеримент. Вказані фактори експерименту вибирались з наступних міркувань: подача (s_6) впливає на величину шорсткості поверхні, яка обробляється й на рівномірність та повторюваність деформації в напрямі подачі (осьовому напрямі); від швидкості (V_6) залежить протікання процесу деформації в осередку, глибина зміцненого шару та кількість теплоти, яка утворюється при обробці; від сили вигладжування (P_6) залежить величина пластичної деформації та згладжування мікронерівностей; початкова шорсткість (R_{an}) впливає на величину контактних тисків, які необхідні для пластичної деформації початкового профілю поверхні.

В рамках дослідження було взято циліндричні зразки зі сталі ШХ-15, які попередньо піддавались токарному обробленню ($R_{an}=0,8$ мкм). В якості змащувально-охолоджувальної рідини, відповідно до рекомендацій [3], в процесі алмазного вигладжування застосовувалось індустріальне мастило ИГА-32.

Основні результати дослідження. Найбільш поширеним описом функції відгуку є подання її поліномом [9]. На першому етапі висувається гіпотеза про лінійність моделі, тобто:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i, \quad (1)$$

де k - число контрольованих факторів.

Як функцію відгуку прийнято значення R_a . Проводиться експеримент, необхідний для визначення її параметрів [1], [2], [5].

Перевіряється адекватність моделі. Якщо лінійна модель неадекватна, то висувається гіпотеза про пріоритетний вплив взаємодіючих факторів.

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j. \quad (2)$$

Обчислюються параметри моделі та проводиться перевірка її адекватності. Якщо модель типу (2) неадекватна, то виконані раніше дослідження доповнюють новою серією, що дозволяє обчислювати коефіцієнти b_{ij} квадратичної моделі (полінома другого ступеня):

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} \cdot x_i^2. \quad (3)$$

З метою полегшення оброблення результатів експерименту фактори нормалізують. Для визначення параметрів лінійної моделі достатньо в досліді кожен фактор фіксувати на одному з двох рівнів: верхньому або нижньому. Верхній рівень нормалізованого фактору позначають (+), а нижній (-).

Інтервали варіювання приймалися, виходячи з реальних меж коливання значень факторів, визначених в результаті попередніх пошукових експериментів.

Фактори, рівні та інтервали варіювання факторів наведено в таблиці 2.

Кількість дослідів в експерименті, які необхідні для реалізації всіх можливих варіацій рівнів факторів визначались за наступною залежністю:

$$N = 2^n = 2^4 = 16 \quad (4)$$

де N – кількість експериментів, $n=4$ – кількість факторів експерименту.

План експерименту задано таблицею – матрицею планування експерименту, що включає в себе значення факторів та ефектів їх взаємодій, а також значення досліджуваної функції (табл. 3).

Коефіцієнти рівняння регресії (2) визначено за формулами (i - номер факторів, j - номер рядка в матриці планування):

Таблиця 2. Рівні та інтервали варіювання факторів

Рівень фактору	Фактори			
	Сила вигладжування P_6 , Н	Подача s_6 , мм/об	Швидкість вигладжування V_6 , м/хв	Середнє арифметичне відхилення профілю, початкове, $R_{a n}$, мкм
Кодоване позначення	x_1	x_2	x_3	x_4
Верхній (+)	400	0,12	80	1,0
Основний (0)	300	0,08	60	0,8
Нижній (-)	200	0,04	40	0,6

Таблиця 3. Матриця планування повнофакторного експерименту типу 2^4 з ефектом взаємодії першого порядку і результати досліджень (сталь ШХ15)

№ дос.	x_1	x_2	x_3	x_4	x_1x_2	x_1x_3	x_1x_4	x_2x_3	x_2x_4	x_3x_4	Ra
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	0,163
2	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	0,185
3	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	0,152
4	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	0,154
5	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	0,168
6	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	0,185
7	+	-	-	+	-	-	+	+	-	+	0,135
8	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	0,155
9	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	0,198
10	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	0,125
11	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	0,217
12	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	0,216
13	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	0,205
14	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	0,145
15	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	0,147
16	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	0,174
b_0 , b_i , b_{ij}	-0,0013	0,0003	0,0005	0,001	0,0004	0,0002	0,00042	-0,0002	-0,0004	0,0011	0,011

$$b_0 = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_u, \quad b_i = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot y_u, \quad b_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n x_{iu} \cdot x_{ju} \cdot y_u, \quad (5)$$

де n – число дослідів; y_u – середнє арифметичнє значення вихідного параметра в n -му досліді; x_{iu} – значення i -го кодового фактору в рядку матриці в u -му досліді; x_{ju} – значення j -го кодового фактору в рядку матриці в u -му досліді.

З урахуванням усіх знайдених коефіцієнтів основнє рівняння регресії згідно виразу (2) для повного факторного експерименту буде виглядати наступним чином:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{14} \cdot x_1 \cdot x_4 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{24} \cdot x_2 \cdot x_4 + b_{34} \cdot x_3 \cdot x_4 = 0,011 - 0,0013 \cdot x_1 + 0,0003 \cdot x_2 + 0,0005 \cdot x_3 + 0,001 \cdot x_4 + 0,0004 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,0002 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,00042 \cdot x_1 \cdot x_4 - 0,0002 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,0004 \cdot x_2 \cdot x_4 + 0,0011 \cdot x_3 \cdot x_4$$

Для перевірки адекватності рівняння регресії та визначення дисперсії коефіцієнтів необхідно визначити дисперсію $s^2\{y\}$ відтворюваності експерименту.

Дисперсію $s^2\{y\}$ визначали за шістьма паралельними дослідженнями в центрі плану, тобто за результатами досліджень, виконаних для знаходження факторів на основних рівнях (таблиця 2)

з використанням наступної залежності:

$$s^2\{y\} = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y - \langle y \rangle)^2}{n_0 - 1}, \quad (6)$$

де n_0 -число паралельних дослідів в центрі плану; y - значення функції відгуку в i - досліді; $\langle y \rangle$ - середнє арифметичне значення функції відгуку в n_0 дослідженнях; i - номер паралельного дослідження в центрі плану. Згідно виразу (6) отримали наступне значення дисперсії:

$$s^2(y) = 0,000001.$$

Середня квадратична похибка у визначенні коефіцієнтів рівняння регресії для y виявилася наступною:

$$s\{b_i\} = + \frac{\sqrt{s^2\{y\}}}{N} = + \frac{\sqrt{0,000001}}{16} = 0,000062.$$

Довірчий інтервал для коефіцієнтів рівняння регресії $\Delta b_i = \pm 3,2 \cdot 0,000062 = \pm 0,00019$.

Всі коефіцієнти відповідно до довірчого інтервалу повинні бути враховані в рівнянні регресії.

Для перевірки адекватності рівняння регресії обчислено дисперсію S_{ad}^2 адекватності:

$$S_{ad}^2 = 0,00018.$$

Адекватність рівняння регресії перевіряємо по F -критерію. Знаходимо розрахункове значення F -критерію:

$$F_p = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2} = \frac{0,00018}{0,00015} = 1,2. \quad (7)$$

Табличне значення F_m -критерію при 5%-вому рівні значимості дорівнює 4,9, так як $F_p < F_m$, то модель є адекватною.

Перехід від кодованих (x_1, x_2, x_3, x_4) до натуральних (P_g, s_g, V_g, R_{an}) значень чинників здійснюється відповідно до умов експерименту (табл. 2) за формулою:

$$x_i = \frac{x - x_0}{\Delta x}, \quad (8)$$

де x_i - натуральне значення; x_0 - натуральне значення чинників на основних рівнях, Δx - значення інтервалів варіювання.

Рівняння (2) з урахуванням відношення (8) можна представити наступним виразом:

$$y = 0,011 - 0,0013 \cdot P_g + 0,0003 \cdot s_g + 0,0005 \cdot V_g + 0,001 \cdot R_{an} + 0,0004 \cdot P_g \cdot s_g + 0,0002 \cdot P_g \cdot V_g + 0,00042 \cdot P_g \cdot R_{an} - 0,0002 \cdot s_g \cdot V_g - 0,0004 \cdot s_g \cdot R_{an} + 0,0011 \cdot V_g \cdot R_{an} \quad (9)$$

За отриманими експериментальними даними і остаточним рівнянням регресії в програмі Microsoft Office Excel було побудовано дві поверхні відгуку (рис. 1,2.)

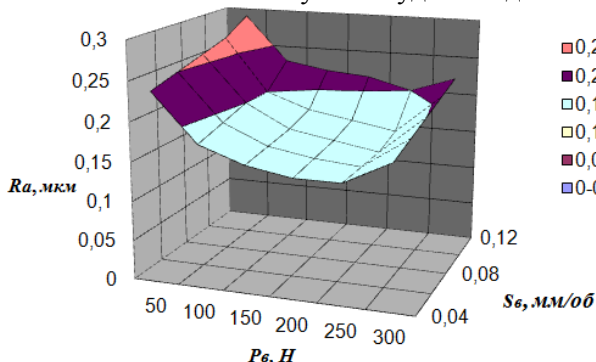


Рис. 1. Поверхня відгуку з двома факторами (P_g та s_g) і одним параметром R_a

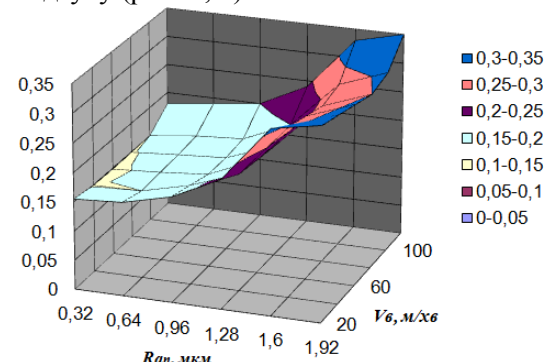


Рис. 2. Поверхня відгуку з двома факторами (R_{an} та V_g) і одним параметром R_a

Висновки. В результаті аналізу отриманого рівняння регресії та поверхонь відгуку для операції алмазного вигладжування встановлено, що при обробленні сталі ШХ-15 алмазним вигладжувальним інструментом з робочою частиною із синтетичного алмазу типу АКТМ найбільш раціональними є наступні режимні параметри: $P_g = 350$ Н; $s_g = 0,1$ мм/об; $V_g = 60$ м/с для

початкової шорсткості поверхні $R_{an} = 0,8$ мкм. В результаті оброблення з рекомендованими режимами досягається шорсткість $R_a = 0,16$ мкм, що відповідає фінішній операції шліфування.

1. Адлер Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.А. Маркова, Ю.В. Грановский – М.: Наука, 1971. – 284 с.
2. Джонсон Н. Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лиан – М.: Мир, 1980. – 312 с.
3. Ермаков Ю.М. Перспективы алмазного выглаживания / Ю.М. Ермаков, А.А. Ершов – М.: НИИМАШ, 1984. – 64 с.
4. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей / А.Г. Суслов – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с.
5. Спиридонов А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов – М.: Машиностроение, 1981. – 184 с.
6. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием / Д.Д. Папшев – М.: Машиностроение, 1978. – 152 с.
7. Повышение несущей способности деталей машин алмазным выглаживанием / В.К. Яценко, Г.З. Зайцев, В.Ф. Притченко, Л.И. Ивченко – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
8. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник / Л. Г. Одинцов – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
9. Радченко С.Г. Методология регрессионного анализа: монография / С.Г. Радченко. – К.: "Корнийчук", 2011. – 376 с.
10. Рыжов Э.В. Технологические методы повышения износостойкости деталей машин / Э.В. Рыжов – Киев: Наук. думка, 1984. – 272 с.

Стаття надійшла до редакції 05.02.2014.