

DOI 10.32820/2079-1747-2020-26-33-44

УДК 621.923

**ДОСЛІДЖЕННЯ ЗНОСУ КРУГІВ ПРИ ЕЛЕКТРОЕРОЗІЙНОМУ АЛМАЗНОМУ ШЛІФУВАННІ ЗІ ЗМІННОЮ ПОЛЯРНІСТЮ ЕЛЕКТРОДІВ В ЗОНІ РІЗАННЯ**

©Стрельчук Р.М.

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»***Інформація про автора:**

**Стрельчук Роман Михайлович:** ORCID: 0000-0002-7221-031X; r.m.strelchuk@gmail.com; кандидат технічних наук; доцент кафедри інтегрованих технологій машинобудування ім. М. Ф. Семка; Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Істотний вплив на точність обробки виробу і продуктивність процесу електроерозійного шліфування надає знос круга. Для ефективного управління точністю обробки найбільш істотне значення має похибка, викликана зносом алмазного круга. Правку круга необхідно виробляти, коли знос підходить до границі, але не виходить за межі поля допуску. Це дозволить скоротити кількість браку при обробці і скоротити витрату алмазів. Крім того, при цьому скорочується час правки і відповідно підвищується ефективність електроерозійного шліфування.

Наведено методику та результати експериментальних досліджень зносу профільних алмазних кругів. Дослідження питомої витрати алмазів виконувалися на шліфувальних кругах прямого профілю. Вимірювання величини лінійного зносу круга вироблялося безконтактним методом за допомогою спеціального приладу, заснованого на застосуванні струмовихрових датчиків. Після цього визначалася інтегральна величина зношеного обсягу алмазозносного шару, а потім маса витрачених алмазів. Маса зішліфованого матеріалу визначалася шляхом зважування до і після обробки.

Для встановлення функціональної залежності питомої витрати алмазів від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару використовувався математичний метод планування і аналізу експериментів. В результаті регресійного аналізу була отримана функціональна залежність питомої витрати алмазів від наступних факторів: концентрації алмазів в крузі, зернистості інструменту, швидкості шліфувального круга, глибини шліфування і швидкості виробу.

Для визначення закономірностей зносу фасонного алмазного круга отримували відбиток його профілю на контрольній пластині з твердого сплаву і вимірювали координати точок робочої частини профілю щодо непрацюючих ділянок. Визначаючи різницю координат до і після досвіду, знаходили величину радіального зносу шліфувального круга у відповідній точці профілю.

**Ключові слова:** електроерозійне шліфування, питома витрата алмазів, технологічні режими обробки, характеристики круга.

**Стрельчук Р.М.** „Исследование износа кругов при электроэрозионном алмазном шлифовании с изменяющейся полярностью электродов в зоне резания“.

Существенное влияние на точность обработки изделия и производительность процесса электроэрозионного шлифования оказывает износ круга. Для эффективного

управления точностью обработки наиболее существенное значение имеет погрешность, вызванная износом алмазного круга. Правку круга необходимо производить, когда износ подходит к границе, но не выходит за пределы поля допуска. Это позволило сократить количество брака при обработке и сократить расход алмазов. Кроме того, при этом сокращается время правки и соответственно повышается эффективность электроэрозионного алмазного шлифования.

Приведены методика и результаты экспериментальных исследований износа алмазных кругов. Исследования удельного расхода алмазов выполнялись на шлифовальных кругах прямого профиля. Измерение величины линейного износа круга производилось бесконтактным методом с помощью специального прибора, основанного на применении токовых датчиков. После этого определялась интегральная величина изношенного объема алмазосодержащего слоя, а затем масса израсходованных алмазов. Масса сошлифованного материала определялась путем взвешивания до и после обработки.

Для установления функциональной зависимости удельного расхода алмазов от технологических режимов обработки и параметров алмазосодержащего слоя использовался математический метод планирования и анализа экспериментов. В результате регрессионного анализа была получена функциональная зависимость удельного расхода алмаза от следующих факторов: концентрации алмазов в круге, зернистости инструмента, скорости шлифовального круга, глубины шлифования и скорости изделия.

Для определения закономерностей износа фасонного алмазного круга получали отпечаток его профиля на контрольной пластине из твердого сплава и измеряли координаты точек рабочей части профиля относительно неработавших участков. Определяя разность координат до и после опыта, находили величину радиального износа шлифовального круга в соответствующей точке профиля.

**Ключевые слова:** электроэрозионное шлифование, удельный расход алмазов, технологические режимы обработки, характеристики круга.

**Strelchuk R.** "Research into the wear of wheels during electroerosive diamond grinding with variable polarity of the electrodes in the cutting area»".

The electro-erosive wheel dressing exerts a significant impact on the machining accuracy of a piece and the efficiency of the profile grinding process. To effectively control machining accuracy, the most important is the error due to the wear of a diamond wheel. The wheel should be dressed when wear approaches to the border but does not go beyond the tolerance field. This would reduce the number of defects at machining and bring down the utilization of diamonds. In addition, this reduces the dressing time and, therefore, improves the efficiency of profile diamond grinding.

The paper reports the methodology and results of an experimental study into the wear of profiled diamond wheels. The specific utilization of diamonds was examined on the grinding wheels of the direct profile. The amount of a wheel linear wear was measured by a contactless method applying a special device based on the use of eddy current sensors. This was followed by determining the integrated amount of the worn volume of a diamond layer; after that, the weight of the used diamonds was measured. The mass of the sanded material was determined by weighing it before and after machining.

A mathematical method of planning and analysing experiments was used to establish the functional dependence of the specific utilization of diamonds on the technological machining modes

and the diamond layer parameters. The result of a regression analysis is the derived functional dependence of diamond specific utilization on the following factors: the concentration of diamonds in a wheel, the grit of the tool, the grinding wheel velocity, the depth of grinding, and the speed of a piece.

To determine the patterns of the wear of the shaped diamond wheel, we received an imprint of its profile on a control plate made from a solid alloy and measured the coordinates of the points of the working part of the profile relative to the non-utilized areas. Determining the difference of coordinates before and after the experiment has helped find the amount of the radial wear of the grinding wheel at the appropriate profile point.

**Keywords:** electro-erosive grinding, specific diamond utilization, technological machining modes, wheel characteristics.

### **Вступ**

В сучасних умовах конкурентоспроможність в машинобудуванні визначається, перш за все, якістю продукції. Найбільш гостро проблема забезпечення якості продукції стоїть при виготовленні деталей складної конфігурації з важкооброблюваних матеріалів, серед яких особливе місце займають тверді сплави.

У різних галузях промисловості знаходять широке застосування вироби складної конфігурації поверхні. Які виготовляються з важкооброблюваних матеріалів, таких як тверді сплави, кераміка, магнітні сплави, ферити і т. п. Підвищені вимоги, що пред'являються до точності геометричних параметрів і якості оброблених поверхонь, значно підвищують роль алмазної обробки.

Удосконалення технології виробництва алмазного інструменту створили реальні передумови для впровадження в промисловість процесу електроерозійного шліфування.

Виділимо наступні сфери застосування профільних алмазних кругів: обробка фасонних твердосплавних ріжучих і вимірювального інструментів, обробка виробів основного виробництва (не інструментальних), що виготовляються з важкооброблюваних матеріалів і мають складну форму, а також правка абразивного інструменту.

Особливо перспективно впровадження електроерозійного алмазного шліфування в інструментальне виробництво.

Відомо, що фасонний різальний і вимірювальний інструмент є найбільш трудомісткими з усієї номенклатури виробів інструментального виробництва, причому його застосування зростає завдяки високій стійкості розмірів за профілем. Використання електроерозійного шліфування алмазним кругом дозволило скоротити час виготовлення фасонних твердосплавних різців, при цьому усунулася необхідність в операції ручного доведення, а стійкість різців зросла в 2 ... 2,5 рази.

Профільні алмазні інструменти можуть широко використовуватися при виготовленні твердосплавних штампів, цанг з твердосплавними сплавленнями, висадного інструменту, твердосплавних різьбонакатних роликів, мітчиків, Розкатники і іншого інструменту, виготовленого з твердого сплаву.

При виготовленні твердосплавних монолітних свердел і інших кінцевих інструментів електроерозійне шліфування знайшло широке застосування для вишліфовки канавок.

Практика показує, що при затилюванні задньої поверхні фасонних твердосплавних фрез і протяжок профільне алмазне шліфування є єдино прийнятним технологічним процесом.

У зв'язку з цим тема роботи, спрямована на вдосконалення технології правки і розробку на цій основі рекомендацій щодо підвищення ефективності операцій електроерозійного алмазного шліфування, є актуальною.

### **Аналіз літературних даних і постановка проблеми**

Найбільш ефективним і універсальним методом правки алмазних кругів на металевих зв'язках зі складною геометрією робочої поверхні є електроерозійний [1]. В результаті проведеного аналізу встановлено, що умови правки шліфувального круга істотно впливають на технологічні показники процесу електроерозійного шліфування і, отже, є важливим керуючим фактором на шліфувальних операціях [2]. Разом з тим, пов'язані питання із забезпеченням необхідної точності і підвищення розмірної стійкості профільних алмазних шліфувальних кругів в умовах електроерозійної правки залишаються невирішеними. Не розроблено науково обґрунтованих практичних рекомендацій, щодо вдосконалення технології правки алмазних шліфувальних кругів електроерозійним методом.

В роботі [3] наведені результати досліджень по шліфуванню фасонних поверхонь. Показано, що за цим способом шліфування фасонних поверхонь профіль виробу будь-якої складності розбивається на окремі ділянки, що представляють собою дуги кіл і відрізки прямих ліній. Кожна ділянка обробляється алмазним кругом найпростішої форми (циліндричної, конічної і т. п.). Кількість послідовно працюючих інструментів залежить від складності конфігурації профілю виробу. Такий спосіб шліфування фасонних поверхонь малопродуктивний. Причиною цього можуть бути витрати технологічного і допоміжного часу, що робить відповідний спосіб трудомістким і малопродуктивним. Крім того, при його використанні значно важче забезпечити високу точність обробки в зв'язку з необхідністю перевстановлення кругів.

Варіантом подолання відповідних труднощів може бути спосіб шліфування фасонної поверхні виробу, який виробляється профільованим алмазним кругом, профіль якого є, дзеркальне відображення профілю готового виробу. На відміну від попереднього способу, в цьому випадку виконується одночасна обробка всіх ділянок профілю.

Саме такий підхід використаний в роботі [4], де показано застосування профільних алмазно-абразивних інструментів з надтвердих матеріалів (алмазу, кубічного нітриду бору). Використання профільних алмазно-абразивних інструментів з надтвердих матеріалів дозволило розробити високоефективні технологічні процеси шліфування, використовувані в різних галузях промисловості.

Застосування профільних кругів діаметром 350 мм і висотою 15 мм при шліфуванні на прохід твердосплавних мітчиків дозволило підвищити продуктивність обробки в 5 ... 8 разів [5]. Стійкість круга між правками підвищилася майже в 10 разів у порівнянні з алмазними одноритковими колами.

Взаємопов'язані питання підвищення розмірної стійкості профільних алмазних шліфувальних кругів і активного управління геометрією робочої поверхні шліфувального інструменту в процесі обробки практично не розглядалися [6].

Відсутні рекомендації щодо визначення необхідної періодичності правки профільних алмазних шліфувальних кругів при обробці виробів складної форми, а також відсутні системні принципи вирішення питань цільової модернізації шліфувальних верстатів.

Таким чином, відсутній єдиний підхід до вирішення окремих питань забезпечення точності і ефективності електроерозійного алмазного шліфування.

Суперечливий характер наявних в літературі відомостей [7, 8], їх розрізненість, а в ряді випадків відсутність необхідної інформації призводить до необхідності проведення комплексних теоретичних і експериментальних досліджень. Ці дослідження дозволять розширити технологічні можливості профільного алмазного шліфування в плані забезпечення точності і ефективності обробки виробів складної конфігурації.

Все це дає підстави стверджувати, що доцільним є проведення дослідження, присвяченого зносу алмазних кругів. Також в ході дослідження потрібно визначити шляхи підвищення точності і продуктивності електроерозійного алмазного шліфування за рахунок розкриття основних закономірностей зносу круга.

### **Мета і завдання дослідження**

Мета роботи - встановити закономірності зносу алмазного круга в процесі обробки і формування його робочої поверхні. Це дасть можливість підвищити точність і продуктивність електроерозійного алмазного шліфування. Для досягнення цієї мети вирішувалася наступне завдання:

- дослідити вплив технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту на питому витрату круга.

### **Матеріали і методи дослідження**

Експериментальні дослідження проводилися на спеціальному стенді, виконаному на базі плоскошліфувального верстата 3E711B, модернізація якого полягала в забезпеченні уповільненої обертання алмазного круга, застосуванні змінних шківів і установці пристосування для правки круга. Вимірювання лінійного зносу алмазного круга здійснювалося за допомогою вихрострумівий датчикової системи наступним чином [9]. У торці діелектричного наконечника вихретокового датчика (ВТД) знаходиться котушка індуктивності (рис. 1).

Генератор забезпечує збудження електромагнітних коливань в котушці, в результаті чого виникає електромагнітне поле. У свою чергу поле взаємодіє з матеріалом контрольованого об'єкта і на його поверхні наводяться вихрові струми, які змінюють параметри котушки - її активний і індуктивний опір. Зазначені параметри міняються при зміні зазору між контрольованим об'єктом і торцем датчика. Для вимірювання використовувався диференційний вихрострумівий датчик, що працює на частоті 30 МГц, який отримує живлення від генератора високої частоти і складається з вимірювального і опорного контурів. Встановлено, що найбільш доцільно використовувати в датчику котушку, що входить до складу резонансного контуру і має дуже слабкий зв'язок з контуром генератора. Робоча точка вибиралася на середині схилу резонансної кривої контура. У початковому стані обидва контури налаштовувалися на одну і ту ж частоту. Опорний контур встановлювався в безпосередній близькості від корпусу круга, вимірювальний поблизу алмазоносного шару (рис. 2). Обидва контури датчика, а також всі радіодеталі в схемі, герметизувалися.

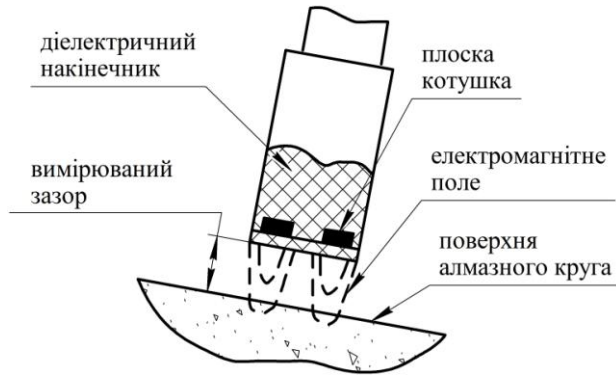


Рис. 1. Схема вихретокового датчика

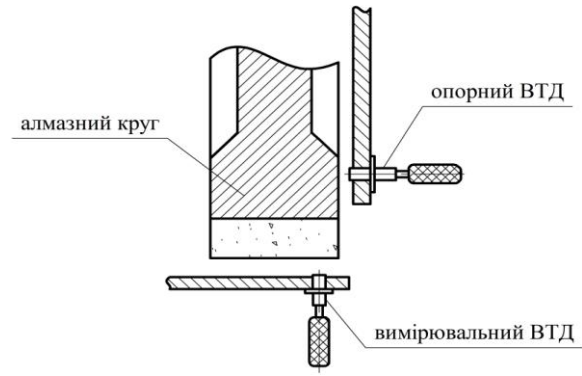


Рис. 2. Схема безконтактного вимірювання лінійного зносу алмазного круга

Завдяки тому, що обидва контури датчика знаходяться в безпосередній близькості від кола і працюють в однакових умовах, вдалося уникнути похибок, пов'язаних з вібраціями системи, впливом змазує охолоджуючої технологічної середовища (СОТС) і температурними деформаціями. Датчики мають малі габарити, прості у використанні і легко встановлюються на верстаті.

Підстроювання датчиків проводилася подачею постійної напруги на два зустрічно включених варикапа, підключених паралельно конденсатору контуру. Високочастотну напругу, що виникає на контурі після детектування, посилювалося і подавалося на аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) комп'ютера. Таким чином, вихідна напруга використовувалося для оцінки зазору між торцем датчика вимірювального контуру і кругом. Зміна величини зазору між датчиком і кругом до обробки виробу і після обробки дозволяє визначити величину зносу.

Таріровка вихрострумівий датчикової системи проводилася при допомозі спеціального пристрою, який дозволяє з високою точністю змінювати величину зазору. Таріровка показала, що зі зміною зазора вихідний сигнал змінюється нелінійно, проте робота на лінійній ділянці графіка забезпечує можливість реєстрації зміни зазору в межах 0 ... 150 мкм з точністю  $\pm 3$  мкм. При цьому напруга вихідного сигналу змінювалося на 8 мВ, при збільшенні зазору між торцем датчика та поверхнею алмазного шліфувального круга на 1 мкм. Був розроблений прилад для реєстрації зносу кола в програмному пакеті Matlab, структурна схема приладу якого представлена на рис. 3 [10].

Аналоговий сигнал з каналу аналогового введення даних 2 надходить на плату введення / виведення (АЦП) 3, де відбувається його переклад в цифрову форму. Потім чисельне значення, відповідне аналоговому сигналу, подається на блок 4, де множиться на число, яке встановлює співвідношення між зазором і напругою. Далі в блоці 5 з отриманої величини віднімається первонапочальное значення зазору, відповідне нульового значення зносу кола  $\Delta r$ . Після цього визначається значення лінійного зносу алмазного круга в даний момент часу, яке фіксується на лицьовій панелі приладу 7. Шкала приладу 7 проградуїрована в одиницях виміру зносу - в мікрометрах.

Обсяг зношеної частини алмазоносного шару знаходився як:

$$V_{\text{изн}} = \pi D_{\text{к}} H \Delta r, \quad (1)$$

де  $D_k$  – діаметр алмазного круга, мм,  $H$  – ширина алмазного круга, мм (рис. 4).

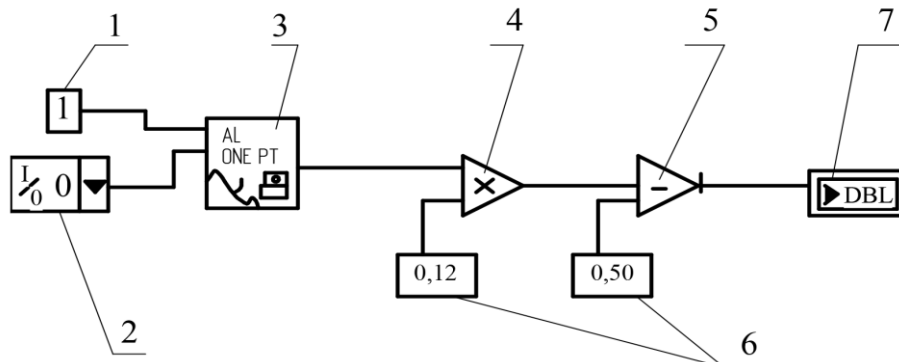


Рис. 3. Структурна схема приладу для реєстрації зносу круга: 1 - номер пристрою, присвоєний платі введення / виведення; 2 - канал аналогового введення даних; 3 - плата вводу / виводу (АЦП); 4 - блок множення; 5 - блок віднімання; 6 - блок формування констант; 7 - лицьова панель приладу.

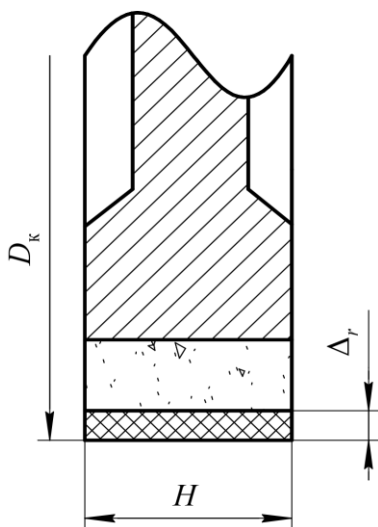


Рис. 4. Схема до визначення питомої витрати алмазів шліфувального круга

Питома витрата алмазів обчислювалася за формулою:

$$q_m = \frac{0,878V_{изн}}{\alpha_k Q_M}, \quad (2)$$

де  $\alpha_k$  - коефіцієнт, що враховує концентрацію алмазів в шарі;  $Q_M$  - маса зішліфованого матеріалу, г

Маса ішліфованого матеріалу визначалася шляхом зважування (на аналітичних вагах з точністю до 0,1 мг) алмазного шліфувального круга до і після обробки. Дослідження питомої витрати на ділянках профілю з малими радіусами кривизни виконувалися при плоскому врізному шліфуванні зразків з твердого сплаву T15K6 алмазними колами 14EE1 250 × 6 × 76 × 5 різної характеристики з кутом профілю  $\varphi = 60^\circ$ . Обробка проводилася з глибиною шліфування (врізна подача)  $t = 0,05$  мм.

Обсяг зношеної частини алмазовмісного шару кола дорівнюватиме:

$$V_a = \pi D_{к.изн} F_{изн}, \quad (3)$$

де  $D_{к.изн}$  – діаметр шліфувального круга після зносу, мм;  $F_{изн}$  – площа зношеної частини круга в осьовому перерізі.

Для отримання функціональної залежності питомої витрати алмазного круга від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару інструменту був використаний метод планування експериментів. На основі проведеного якісного аналізу та результатів попередніх експериментів при побудові математичної моделі в якості факторів були обрані:  $K$  - концентрація алмазів в крузі;  $Z$  - зернистість алмазних кругів, мкм;  $V_k$  -

швидкість шліфувального круга, м/с;  $t$  - глибина шліфування, мм;  $V_{ш}$  - швидкість виробу, м/хв.

Рівні та інтервали варіювання досліджуваних факторів приведені в табл. 1. З метою отримання статичної залежності здійснювалося перетворення параметра оптимізації шляхом логарифмування.

Таблиця 1

Рівні та інтервали варіювання факторів

Натуральне позначення фактора	$K$	$Z$ , мкм	$V_k$ , м/с	$t$ , мм	$V_{ш}$ , м/хв
Кодове позначення фактора	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Верхній рівень	6 (150 %)	200 (160/125)	35	0,125	16
нижній рівень	2 (50 %)	40 (50/40)	15	0,025	2
основний рівень	4 (100 %)	120 (100/80)	25	0,075	9
інтервал варіювання	2 (50 %)	80	10	0,05	7

Для спрощення запису умов експерименту і обробки отриманих даних замість натуральних значень факторів використовувалися кодовані. Кодування здійснювалося за допомогою співвідношення:

$$X_i = \frac{2(\ln x_i - \ln x_{i\max})}{\ln x_{i\max} - \ln x_{i\min}} + 1, \quad (4)$$

де  $x_{i\max}$ ,  $x_{i\min}$  – відповідно, значення факторів на верхньому і нижньому рівнях.

У зв'язку з великою трудомісткістю реалізації повного факторного експерименту був використаний дробовий факторний експеримент типу  $2^{5-1}$ , тобто напіврепліки від повного факторного плану  $2^5$ , задана генеруючим співвідношенням:

$$X_5 = X_1 X_2 X_3 X_4 .$$

При цьому визначальний контраст має вигляд:

$$I = X_1 X_2 X_3 X_4 X_5 .$$

Співвідношення, які визначають спільні оцінки коефіцієнтів регресії, знаходили множенням визначального контрасту послідовно на  $X_1$ ,  $X_2$  і т. д. Аналіз показав, що в даному випадку ні один з лінійних ефектів не змішується з парним взаємодією, а оцінюється спільно з взаємодією високих порядків. Отже, роздільна здатність обраної дробової репліки є максимально можливою. Матриця планування і результати експериментів наведені в табл. 2. Досліди проводилися в випадковій послідовності відповідно до даних табл. № 2 рівномірно розподілених випадкових чисел. Експерименти повторювалися тричі на кожному досвіді. У



табл. № 2 наведено середні значення питомої витрати алмазного круга  $\bar{q}_m$ . В результаті математичної обробки даних були визначені коефіцієнти регресії. Зіставлення абсолютних значень коефіцієнтів регресії з величиною довірчого інтервалу показало, що статистично значущими є коефіцієнти  $b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ .

Таблица 2

Матриця планування і результати дослідів

№ дослідів	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	Питома витрата алмазного круга $\bar{q}_m$ , мг/г
1	2	40	15	0,025	16	0,735
2	6	40	15	0,025	2	0,195
3	2	200	15	0,025	2	0,085
4	6	200	15	0,025	16	0,160
5	2	40	35	0,025	2	0,240
6	6	40	35	0,025	16	0,360
7	2	200	35	0,025	16	0,165
8	6	200	35	0,025	2	0,050
9	2	40	15	0,125	2	1,430
10	6	40	15	0,125	16	2,290
11	2	200	15	0,125	16	1,070
12	6	200	15	0,125	2	0,310
13	2	40	35	0,125	16	2,570
14	6	40	35	0,125	2	0,720
15	2	200	35	0,125	2	0,32
16	6	200	35	0,125	16	0,520

Гіпотеза про адекватність моделі перевірялася за критерієм Фішера:

$$F = \frac{S_{ad}^2}{S_y^2}, \quad (5)$$

де  $S_{ad}^2$  – дисперсія адекватності,  $S_y^2$  – дисперсія відтворюваності.

Дисперсія адекватності  $S_{ad}^2$  розраховувалася за формулою:

$$S_{ad}^2 = \frac{\sum_1^N n(\bar{y} - \hat{y})^2}{N - \lambda}, \quad (6)$$

де  $\bar{y}$  – середнє значення окремого спостереження,  $\hat{y}$  – розрахункове значення критерію за рівнянням регресії,  $n$  – число повторень даного досвіду,  $N$  – загальне число дослідів,  $\lambda$  – число коефіцієнтів рівняння.

Дисперсія відтворюваності  $S_y^2$  визначається з виразу:

$$S_y^2 = \frac{\sum_1^N \sum_1^n (y_{uj} - \bar{y}_u)^2}{N(n-1)}, \quad (7)$$

де  $N$  – загальне число дослідів,  $n$  – число повторень даного досвіду,  $y_{uj}$  – результати окремого спостереження,  $\bar{y}_u$  – середнє арифметичне значення критерію.

Адекватність моделі перевірялася за критерієм Фішера. Знайдене з рівняння (5) значення  $F$  - порівнювався з табличним. Розрахункове значення критерію виявилось менше табличного при 95% -му рівні значущості, отже, отримане рівняння є адекватним.

Таким чином, рівняння регресії в кодових координатах має вигляд:

$$y = -0,93 - 0,19X_1 - 0,59X_2 - 0,14X_3 + 0,78X_4 + 0,44X_5.$$

Після розкодування і потенціювання була отримана шукана функціональна залежність питомої витрати алмазу від досліджуваних факторів:

$$q_m = \frac{t^{0,56} V_u^{0,44}}{K^{0,27} Z^{0,74} V_k^{0,24}}. \quad (8)$$

Функціональна залежність показує рівень впливу на питому витрату алмазних кругів технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару інструменту.

### **Обговорення результатів дослідження**

На рис. 5 представлена графічна залежність питомої витрати від параметрів алмазовмісного шару. Збільшення зернистості алмазного порошку викликає зниження питомої витрати. Даний отриманий результат можна пояснити тим, що при збільшенні розмірів зерен підвищується міцність їх закріплення в зв'язці круга. Збільшення концентрації алмазів в шарі веде до зростання кількості ріжучих зерен. У свою чергу, це призводить до зниження навантаження на зерно і, відповідно, до зменшення питомої витрати алмазів.

З технологічних режимів обробки найбільший вплив на величину питомої витрати надає глибина шліфування (врізна подача). Збільшення глибини шліфування призводить до зростання питомої витрати алмазів (рис. 6). З графіка, наведеного на рис. 6, видно, що збільшення швидкості виробу призводить до зростання питомої витрати. Так як при цьому збільшується товщина шару матеріалу, що знімається одним зерном. У той же час сили тертя в зоні контакту круга з виробом змінюються незначно. Тому зміна швидкості виробу чинить менший вплив на питому витрату алмазів, ніж зміна глибини шліфування.

Виявлені закономірності зносу алмазних шліфувальних кругів в процесі обробки дозволяють прогнозувати точність параметри виробу, що шліфується. Досліджено вплив технологічних режимів шліфування і умов обробки на питому витрату алмазів. В результаті дослідження отримано функціональна залежність питомої витрати алмазного круга від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару. Отримана залежність відображає вплив технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту на питому витрату. За допомогою цієї залежності можна визначити інтенсивність зносу шліфувального інструменту.

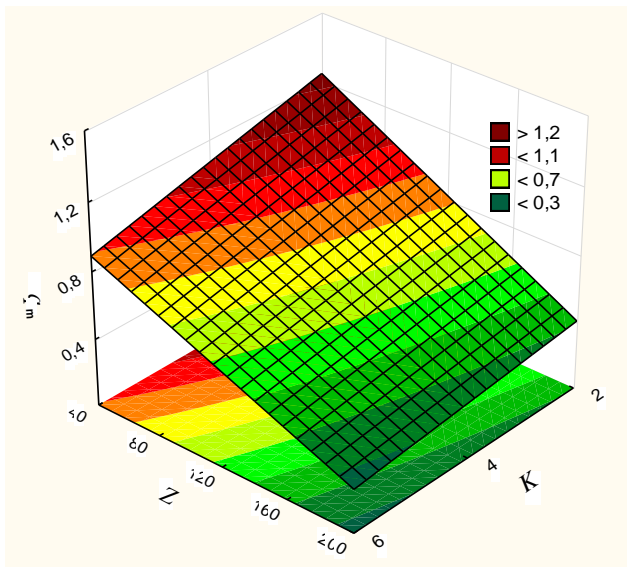


Рис. 5. Поверхня відгуку  $q_m - (Z, K)$ .  
Умови розрахунку:  $V_k=25$  м/с,  $t=0,025$  мм,  
 $V_n=9$  м/хв.

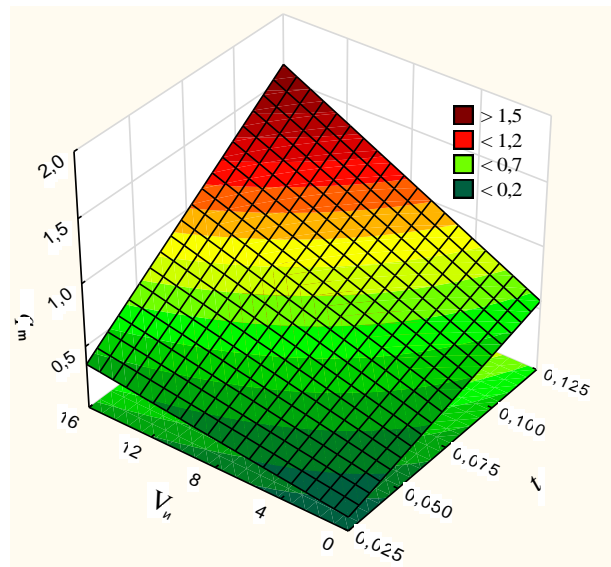


Рис. 6. Поверхня відгуку  $q_m - (V_n, t)$ .  
Умови розрахунку:  $K=4$  (100 %),  
 $Z=120$  (100/80) мкм,  $V_k=25$  м/с

## Висновки

Досліджено вплив технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту на питому витрату круга. В результаті дослідження отримано функціональну залежність питомої витрати алмазного круга від технологічних режимів обробки і параметрів алмазовмісного шару інструменту. Отримана залежність дозволяє розрахувати питома витрату алмазного круга і визначити необхідний період правки алмазних кругів при обробці виробів складної форми. Дослідження впливу технологічних режимів шліфування і параметрів алмазовмісного шару інструменту підвищують ефективність електроерозійного шліфування. Ефективність процесу шліфування будить забезпечена необхідною точністю обробки виробів складної конфігурації.

## References

1. Diamond wheel wear mechanism and its impact on the surface generation in parallel diamond grinding of RB-SiC/Si / Q. Zhang, Q. Zhao, S. To, B. Guo, W. Zhai // *Diamond and Related Materials*. – 2017. – № 74. – P. 16–23. doi:10.1016/j.diamond.2017.01.019
2. Liang Z. Experimental Study on Diamond Wheel V-tip Truing Using a Tangential Grinding Truing Method /Z. Liang // *Journal of Mechanical Engineering*. – 2018. – № 54(3). – P. 196-202. doi:10.3901/jme.2018.03.196.
3. Зверовщиков В. З. Повышение качественных характеристик поверхности при профильном алмазном шлифовании / В. З. Зверовщиков, А. В. Соколов // *Известия высших учебных заведений. Технические науки*. – 2011. – № 3 (19). – С. 167–174.

4. Bing Guo. On-machine dry electric discharge truing of diamond wheels for micro-structured surfaces grinding / Bing Guo, Qingliang Zhao // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2015. – Vol. 88. – P. 62–70. doi:10.1016/j.ijmachtools.2014.09.011.
5. Study on a 5-axis precision and mirror grinding of glass freeform surface without on-machine wheel-profile truing / Xie Z. J., Deng J.Y., Liao N., Li, H. Zhou, W. X. Ban // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2016. – Vol. 109. – P. 65-73. doi:10.1016/j.ijmachtools.2016.07.011.
6. Asplund M. Evaluating the measurement capability of a wheel profile measurement system by using GR&R / M. Asplund, J. Lin // *Measurement*. – 2016. – № 92. – P. 19–27. doi:10.1016/j.measurement.2016.05.090.
7. A precision generating grinding method for face gear using CBN wheel[J] / Wang Y, Lan Z, Hou L, et al // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – № 79(9-12). – P. 1839-1848.
8. Márton L. About The Modernized Grinding Wheel Dressingdevice S Diamond-Pin Driving System by The Nilesgear Grinding Machines / L. Márton // *Műszaki Tudományos Közlemények*. – 2018. – № 9(1). – P. 155–158. doi:10.33894/mtk-2018.09.34.
9. Chowdhury M. A. K. Grinding Wheel Surface Topography for Multiple Pass With Incremental Depth of Cut of Rotary Diamond Dresser / M. A. K. Chowdhury // *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (Houston, Texas, USA. November 13–19, 2015)*. – 2015. – Vol. 2B. – Access mode :<https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings-abstract/IMECE2015/57366/V02BT02A016/256241>. doi.org/10.1115/IMECE2015-53342.
10. Cheng W. Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding / W. Cheng // *Journal of Nondestructive Evaluation*. – 2012. – vol. 31, no. 3. – Pp. 215-224.

#### References

1. Zhang, Q, Zhao, Q, To, S, Guo, B & Zhai, W 2017, 'Diamond wheel wear mechanism and its impact on the surface generation in parallel diamond grinding of RB-SiC/Si', *Diamond and Related Materials*, no. 74, pp. 16-23.
2. Liang, Z 2018, 'Experimental Study on Diamond Wheel V-tip Truing Using a Tangential Grinding Truing Method', *Journal of Mechanical Engineering*, no. 54 (3), pp. 196.
3. Zverovshnikov, VZ & Sokolov, AV 2011, 'Povyshenie kachestvennyh harakteristik poverhnosti pri profilnom almaznom shlifovanii', *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Tehnicheskie nauki*, no. 3 (19), pp. 167-174.
4. Bing Guo & Qingliang Zhao 2015, 'On-machine dry electric discharge truing of diamond wheels for micro-structured surfaces grinding', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 88, pp. 62-70.
5. Xie, ZJ, Deng, JY, Liao, N, Li, Zhou, H & Ban, WX 2016, 'Study on a 5-axis precision and mirror grinding of glass freeform surface without on-machine wheel-profile truing', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 109, pp. 65-73.
6. Asplund, M & Lin, J 2016, 'Evaluating the measurement capability of a wheel profile measurement system by using GR&R', *Measurement*, no. 92, pp. 19-27.
7. Wang, Y, Lan, Z, Hou, L et al 2015, 'A precision generating grinding method for face gear using CBN wheel[J]', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, no. 79 (9-12), pp. 1839-1848.
8. Márton, L 2018, 'About The Modernized Grinding Wheel Dressingdevice S Diamond-Pin Driving System by The Nilesgear Grinding Machines', *Műszaki Tudományos Közlemények*, no. 9 (1), pp. 155-158.
9. Chowdhury, MAK 2015, 'Grinding Wheel Surface Topography for Multiple Pass With Incremental Depth of Cut of Rotary Diamond Dresser', *Proceedings of the ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Houston, vol. 2B, viewed 09 October 2020, <<https://doi.org/10.1115/IMECE2015-53342>>.
10. Cheng, W 2012, 'Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding', *Journal of Nondestructive Evaluation*, vol. 31, no. 3, pp. 215-224.

Стаття надійшла до редакції 12 жовтня 2020г.