

В.Г. ШКУРУПІЙ, канд. техн. наук, доц., ХНЕУ, Харків

АНАЛІТИЧНИЙ ОПИС ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПОВЕРХНІ ПРИ АБРАЗИВНОМУ ПОЛІРУВАННІ

У роботі обґрунтовані умови зменшення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні з фіксованим радіальним зусиллям, які полягають в основному в зменшенні тиску в зоні обробки й збільшенні поверхневої концентрації абразивних зерен на робочій поверхні інструмента. Доведено, що з кінематичної точки зору зменшення шорсткості поверхні пов'язане зі зменшенням миттєвої сумарної площі поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами до мінімально можливого значення, при якому процес різання переходить у процес пружно-пластичного деформування оброблюваного металу.

Ключові слова: абразивне полірування, абразивне зерно, процес різання, шорсткість поверхні, швидкість радіальної подачі, радіальне зусилля.

Вступ. Абразивна обробка є основним методом фінішної обробки деталей машин, які забезпечують високі показники якості, точності й шорсткості оброблюваних поверхонь. В особливій мірі це відноситься до методів доведення й абразивного полірування, які остаточно формують параметри якості обробки. У зв'язку з появою нових важкооброблюваних матеріалів і підвищенням вимог до якості обробки деталей машин постійно потрібне вдосконалення методів фінішної абразивної обробки й головним чином за рахунок підвищення показників шорсткості оброблюваних поверхонь. Тому дана робота присвячена пошуку нових технологічних рішень підвищення ефективності абразивного полірування.

Аналіз останніх досліджень. Теоретичним дослідженням шорсткості поверхні при абразивній обробці присвячені роботи [1-4], у яких розрахунки виконані з урахуванням імовірності участі зерен у різанні. Це дозволило досить об'єктивно оцінити можливості зменшення шорсткості поверхні. Однак ці рішення отримані стосовно до процесів шліфування. Стосовно до процесів доведення й абразивного полірування такі дослідження фактично не проводилися.

Враховуючи викладене вище, актуальною є задача аналітичного опису параметрів шорсткості поверхні при абразивному поліруванні, оскільки основним напрямком його вдосконалювання є досягнення мінімально можливих значень шорсткості поверхні – на рівні $R_a = 0,001$ мкм і нижче. Рішення даної задачі надзвичайно актуально як при обробці деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя й зношування, так і при створенні світловідбиваючих поверхонь лазерних дзеркал та іншої космічної техніки.

Постановка задачі. У зв'язку з необхідністю урахування імовірності участі абразивних зерен у різанні, у даній роботі запропонований новий теоретичний підхід до розрахунку параметрів шорсткості поверхні при абразивному поліруванні, який дозволить по-новому підійти до обґрунтування його технологічних можливостей і вибору оптимальних умов обробки. Це відкриває нові перспективи пошуку умов підвищення ефективності цього прогресивного методу фінішної обробки. Дана робота є подальшим розвитком робіт [5, 6], присвячених математичному моделюванню закономірностей формоутворення поверхонь і знімання матеріалу при фінішній абразивній обробці.

Математична модель. Шорсткість поверхні оброблюваного зразка в процесі абразивного полірування утворюється в момент переходу від обробки вихідних мікронерівностей до обробки суцільного металу. Тому формування шорсткості поверхні буде здійснюватися зі швидкістю радіальної подачі $S_{рад}$, що досягається саме в цей момент обробки. Тому одержимо аналітичну залежність для визначення функції $\Phi(y)$, що описує імовірність невилученого металу з поверхні зразка з урахуванням переміщення оброблюваного зразка в радіальному напрямку з фіксованою швидкістю радіальної подачі $S_{рад}$ [5]. Для цього скористаємося аналітичною залежністю для визначення функції $\Phi(y)$, отриманої для процесу доведення зернами однакового розміру, які переміщуються лише в горизонтальному напрямку зі швидкістю $V_{інстр}$ [6]:

$$\Phi(y) = e^{-\frac{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot n}{B} \cdot y}, \quad (1)$$

де 2γ – кут при вершині конусоподібної частини ріжучого зерна; n – кількість абразивних зерен, що беруть участь у процесі різання; B – ширина зразка, м; y – координата, відлічувана від вершини ріжучого зерна, м.

Припустимо, що за час переміщення оброблюваного зразка у вертикальному напрямку на величину dy зі зразком проконтактували dn_i зерен:

$$dn_i = n \cdot f(y_i) \cdot dy, \quad (2)$$

де n – загальна кількість зерен, які проконтактували зі зразком за час його переміщення зі швидкістю $S_{рад}$ у вертикальному напрямку на величину R_{max} , рівну максимальній висоті мікронерівностей оброблюваної поверхні:

$$n = k \cdot B \cdot V_{інстр} \cdot \tau = k \cdot B \cdot V_{інстр} \cdot \frac{R_{max}}{S_{рад}}; \quad (3)$$

k – поверхнева концентрація зерен на робочій поверхні інструмента, шт./м²; B – ширина оброблюваного зразка, м; $\tau = R_{max} / S_{рад}$ – час обробки, с; $f(y_i) = 1 / R_{max}$ – щільність розподілу висот вершин зерен, які проконтактува-

ли з оброблюваним зразком і залишили на ньому свої проекції.

Елементарна імовірнісна функція $\Phi_i(y)$, описувана залежністю (1) і утворена від роботи dy зерен із висотою виступання $(y - y_i)$, буде:

$$\Phi_i(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot d n_i \cdot (y - y_i)}{B}} = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{инсп}} \cdot (y - y_i) \cdot dy}{S_{\text{пад}}}} \quad (4)$$

З позиції теорії ймовірностей сумарна імовірнісна функція $\Phi(y)$ опи- шеться [6]:

$$\begin{aligned} \Phi(y) &= \prod_{i=1}^z \Phi_i(y) = e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{инсп}} \cdot \sum_{i=1}^z (y - y_i) \cdot dy}{S_{\text{пад}}}} = \\ &= e^{-\frac{2 \cdot \text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{инсп}} \cdot \int_0^y (y - y_i) \cdot dy}{S_{\text{пад}}}} = e^{-\frac{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{инсп}} \cdot y^2}{S_{\text{пад}}}} \quad (5) \end{aligned}$$

Характер зміни функції $\Phi(y)$ за координатою y такий же, як і у випадку обробки нерухливого зразка (тобто для $S_{\text{пад}}=0$), описуваного залежністю (1). Однак інтенсивність зменшення функції $\Phi(y)$ за координатою y вище, тому що координата y входить у залежність (5) у другому ступені.

Використовуючи залежність (5), визначимо параметр шорсткості поверх- нні R_a . Для цього спочатку встановимо положення середньої лінії $y = a$ (рис. 1), що розділяє мікропрофіль обробленої поверхні на дві частини таким чином, що заштриховані на рис. 1 площі F_1 й F_2 рівні між собою. У цьому випадку найбільша западина мікропрофілю відповідає значенню $y = 0$, а най- більший виступ мікропрофілю відповідає значенню $y = R_{\text{max}}$. Тоді

$$a = \int_0^{R_{\text{max}}} \Phi(y) \cdot dy = \int_0^{R_{\text{max}}} e^{-\frac{\text{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{\text{инсп}} \cdot y^2}{S_{\text{пад}}}} \cdot dy \quad (6)$$

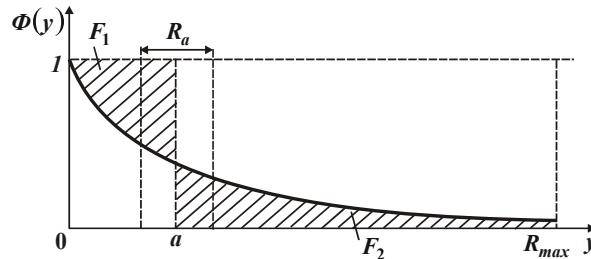


Рис. 1. Розрахункова схема параметра шорсткості поверхні R_a .

Даний інтеграл можна обчислити за допомогою табличного інтеграла $\int_0^{+\infty} e^{-\alpha^2 \cdot y^2} \cdot dy$, у якому верхня межа прагне до нескінченності. Виходячи з

рис. 1, це не внесе значних змін при обчисленні інтеграла $\int_0^{R_{max}} e^{-\alpha^2 \cdot y^2} \cdot dy$, то-

му що при $y \geq R_{max}$ функція $\Phi(y)$ приймає малі значення. Тому з достатньої для практики точністю можна розглядати табличний інтеграл [7]:

$$\int_0^{+\infty} e^{-\alpha^2 \cdot y^2} \cdot dy = \frac{\sqrt{\pi}}{2\alpha} \quad \text{для } \alpha > 0. \quad (7)$$

У даному випадку $\alpha^2 = \frac{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{інспр}}{S_{рад}}$. Тоді

$$a = \int_0^{R_{max}} e^{-\frac{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{інспр}}{S_{рад}} \cdot y^2} \cdot dy = 0,88 \cdot \sqrt{\frac{S_{рад}}{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{інспр}}}. \quad (8)$$

Як видно, параметр a тим більше, чим більше швидкість радіальної подачі $S_{рад}$ й менше параметри γ , k і $V_{інспр}$.

Параметр шорсткості поверхні R_a за визначенням дорівнює довжині сторони прямокутника з висотою $\Phi(y)=1$ (рис. 1), тобто

$$R_a = \frac{F_1 + F_2}{1} = 2 \cdot F_1 = 2 \cdot F_2 = 2 \cdot \int_a^{R_{max}} \Phi(y) \cdot dy = 2 \cdot \int_0^{R_{max}} e^{-\frac{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{інспр}}{S_{рад}} \cdot y^2} \cdot dy. \quad (9)$$

Однак обчислити даний інтеграл аналітично в заданих межах (навіть при зміні верхньої межі з R_{max} до $+\infty$) неможливо. Його можна обчислити лише чисельним методом. Однак це не дає наочності й загального рішення, утрудняє пошук умов зменшення параметра шорсткості поверхні R_a . Тому, виходячи з рис. 1, одержимо спрощене рішення. Очевидно, заштриховану площу F_1 можна визначити як площу трикутника, розглядаючи функцію $\Phi(y)$ в межах зміни координати y від 0 до a у вигляді прямої лінії. Тоді одержимо:

$$F_1 = \frac{1}{2} \cdot a \cdot [1 - \Phi(y = a)], \quad (10)$$

де $\Phi(y = a) = e^{-\frac{\text{tg}\gamma \cdot k \cdot V_{інспр} \cdot a^2}{S_{рад}}}$.

З урахуванням залежності (8), маємо:

$$\Phi(y=a) = e^{-\frac{\pi}{4}} = 0,458. \quad (11)$$

Виходячи із залежності (10), площа F_1 остаточно виразиться:

$$F_1 = 0,24 \cdot \sqrt{\frac{S_{pad}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инстр}}}. \quad (12)$$

Підставляючи отриману залежність у залежність (9), визначимо параметр шорсткості поверхні R_a :

$$R_a = 2 \cdot F_1 = 0,48 \cdot \sqrt{\frac{S_{pad}}{\operatorname{tg} \gamma \cdot k \cdot V_{инстр}}}. \quad (13)$$

У підсумку прийшли до досить простої залежності для визначення параметра шорсткості поверхні R_a , з якої випливає, що зменшити R_a можна зменшенням швидкості радіальної подачі S_{pad} й збільшенням параметрів γ , k і $V_{инстр}$. Зважаючи на те, що при абразивному поліруванні швидкості радіальної подачі S_{pad} залежить від радіального зусилля P_y , яке визначається залежністю [4]:

$$P_y = \frac{\sigma \cdot F \cdot S_{pad}}{K_{риз} \cdot V_{инстр}}, \quad (14)$$

параметр шорсткості поверхні R_a остаточно виразиться:

$$R_a = 0,48 \cdot \sqrt{\frac{K_{риз} \cdot P_{num}}{\sigma \cdot \operatorname{tg} \gamma \cdot k}}, \quad (15)$$

де σ – умовне напруження різання, Н/м²; $K_{риз} = P_z / P_y$ – коефіцієнт різання; P_z , P_y – тангенціальна й радіальна складові сили різання, Н; $P_{num} = P_y / F$ – питомий тиск у зоні обробки, Н/м²; F – фактична площа контакту оброблюваного зразка з інструментом, м².

Результати досліджень. Із залежності (15) випливає несподіваний результат, пов'язаний з тим, що в залежність не входить швидкість переміщення абразивного інструмента $V_{инстр}$. З фізичної точки зору це пов'язане з особливостями абразивної обробки з фіксованим радіальним зусиллям P_y .

Як випливає із залежності (15), основною умовою зменшення параметра шорсткості поверхні R_a є зменшення питомого тиску в зоні обробки $P_{num} = P_y / F$ й збільшення поверхневої концентрації абразивних зерен на робочій поверхні інструмента k . Залежність (15) може бути представлена по-іншому, якщо виразити $P_z = K_{риз} \cdot P_y$, а $S_{num} = P_z / \sigma$, тоді

$$R_a = 0,48 \cdot \sqrt{\frac{S_{\text{мит}}}{F \cdot \text{tg} \gamma \cdot k}}, \quad (16)$$

де $S_{\text{мит}}$ – миттєва сумарна площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами, м².

У цьому випадку параметр шорсткості поверхні R_a залежить головним чином від миттєвої сумарної площі поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами $S_{\text{мит}}$, яка є змінною величиною процесу абразивного полірування й визначається умовами обробки: чим менше $S_{\text{мит}}$, тим менше параметр R_a . Отже, при абразивному поліруванні величину $S_{\text{мит}}$ необхідно зменшувати до мінімально можливого значення, при якому здійснимо процес різання (процес стружкоутворення). Іншими словами, на заключному етапі абразивного полірування необхідно забезпечити умови переходу від процесу різання до процесу пружно-пластичного деформування оброблюваного металу. Це дозволить за рахунок пластичного відтискування металу і його перерозподілу в зоні обробки одержати мінімально можливе значення параметра шорсткості поверхні R_a .

Із залежності (16) також випливає, що домогтися зменшення параметра R_a можна за рахунок збільшення кута 2γ при вершині конусоподібного зерна, тобто при обробці ефективно використовувати сферичні й овалізовані абразивні зерна.

Необхідно відзначити, що залежності (15) і (16) справедливі для всіх процесів абразивної обробки, здійснюваних з фіксованим радіальним зусиллям P_y . Із залежності (15) випливає, на перший погляд, суперечливий результат, пов'язаний з тим, що зі зменшенням відношення $\sigma / K_{\text{різ}}$, тобто з підвищенням ріжучої здатності абразивного інструмента, параметр шорсткості поверхні R_a збільшується. З фізичної точки зору це можна пояснити тим, що зі зменшенням відношення $\sigma / K_{\text{різ}}$ при фіксованому радіальному зусиллі P_y збільшується продуктивність обробки й відповідно швидкість радіальної подачі $S_{\text{рад}}$. Безсумнівно, це приведе до збільшення параметра шорсткості поверхні R_a . Тому на фінішних операціях абразивної обробки, коли потрібно забезпечити зменшення параметрів шорсткості поверхні, немає необхідності зменшувати умовне напруження різання σ за рахунок підвищення гостроти ріжучих абразивних зерен. Навпаки, слід зменшувати гостроту абразивних зерен, збільшуючи тим самим умовне напруження різання σ й відповідно відношення $\sigma / K_{\text{різ}}$.

Перспективи подальших досліджень. Автор вважає перспективним

напрямки досліджень, пов'язані зі створенням математичної моделі визначення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні з урахуванням утворення на зернах площадок зношування й відомого відношення товщини зрізу до радіуса абразивного зерна, яке визначає умови переходу від процесу різання до процесу пружно-пластичного деформування оброблюваного металу. Це дозволить виявити нові технологічні можливості зменшення шорсткості поверхні при абразивному поліруванні з позиції енергоємності обробки.

Висновки. У роботі запропонований теоретичний підхід до розрахунку параметрів шорсткості при абразивному поліруванні з фіксованим радіальним зусиллям. Це дозволило обґрунтувати умови зменшення шорсткості поверхні, які полягають в основному в зменшенні питомого тиску в зоні обробки й збільшенні поверхневої концентрації абразивних зерен на робочій поверхні інструмента. Доведено, що з кінематичної точки зору зменшення шорсткості поверхні пов'язане зі зменшенням миттєвої сумарної площі поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими абразивними зернами до мінімально можливого значення, при якому процес різання (стружкоутворення) переходить у процес пружно-пластичного деформування оброблюваного металу (без утворення стружки).

Список літератури: 1. *Королев А.В.* Исследование процессов образования поверхностей инструмента и детали при абразивной обработке / *А.А. Королев.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 212 с. **2.** *Хусу А.Н.* Шероховатость поверхностей (теоретико-вероятностный подход) / *А.Н. Хусу, Ю.Р. Витенберг, В.А. Пальмов.* – М.: Изд-во “Наука”, 1975. – 344 с. **3.** *Новоселов Ю.К.* Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке / *Ю.К. Новоселов.* – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1979. – 232 с. **4.** *Новиков Ф.В.* Физические и кинематические основы высокопроизводительного алмазного шлифования: автореф. дис. на соискание научн. степени докт. техн. наук: спец. 05.03.01 “Процессы механической обработки, станки и инструменты” / *Ф.В. Новиков.* – Одесса, 1995. – 36 с. **5.** *Новиков Ф.В.* Исследования шероховатости поверхности при алмазно-абразивной обработке методами теории вероятностей / *Ф.В. Новиков, В.Г. Шкурупий* // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2004. – № 44. – С. 140-149. **6.** *Новиков Ф.В.* Математична модель визначення шорсткості поверхні при абразивній обробці / *Ф.В. Новиков, В.В. Нежебовський, В.Г. Шкурупий* // Вісник НТУ “ХПІ”. Збірник наукових праць. Серія: Математичне моделювання в техніці та технологіях. – Х.: НТУ “ХПІ”. – 2013. – № 5 (979). – С. 199-210. **7.** *Бронштейн И.Н.* Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / *И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев.* – 13-е изд., исправленное. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.

Bibliography: 1. *Korolev A.V.* Issledovanie prochessov obrazovaniya poverkhnostey instrumenta i detali pri abrazivnoy obrabotke / *A.A. Korolev.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. – 212 s. **2.** *Khusu A.N.* Sherokhovatost poverkhnostey (teoretiko-veroyatnostny podkhod) / *A.N. Khusu, U.R. Vitenberg, V.A. Palmov.* – Moskva: Izd-vo “Nauka”, 1975. – 344 s. **3.** *Novoselov J.K.* Dinamika formoobrazovaniya poverkhnostey pri abrazivnoy obrabotke / *J.K. Novoselov.* – Saratov: Izd-vo Sarat. un-ta, 1979. – 232 s. **4.** *Novikov F.V.* Fizicheskie i kinematicheskie osnovy vysokoproizvoditelnogo almaznogo shlifovaniya: avtoref. dis. na soiskanie nauchn. stepeni dokt. tekhn. nauk: spets. 05.03.01 “Protssesy mekhanicheskoy obrabotki, stanki i instrumenty” / *F.V. Novikov.* – Odessa, 1995. – 36 s. **5.** *Novikov F.V.* Issledovaniy sherokhovatosti poverkhnosti pri almazno-abrazivnoy obrabotke metodami teorii veroyatnostey / *F.V. Novikov, V.G. Shkurupiy* // Visnyk NTU “KhPI”. Zbirnyk naukovykh prats. – Kh.: NTU “KhPI”. – 2004. – № 44. – S. 140-149. **6.** *Novikov F.V.* Matematychna model vyznachennya shorstkosti poverkhnii pri abrazyvnyy obrobtsti / *F.V. Novikov, V.V. Nezhebovskiy, V.G.*

Shkurupiy // Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh prats. Seriya: Matematychni modeliavannya v tekhnitsi ta tekhnologiyakh. – Kh.: NTU "KhPI". – 2013. – № 5 (979). – S. 199-210. 7. Bronchteyn I.N. Spravochnik po matematike dlya injenerov s uchashikhsya vtuzov / I.N. Bronchteyn, K.A. Semendyaev. – 13-e izd., ispravlennoe. – M.: Nauka. Gl. red. fiz.-mat. lit., 1986. – 544 s.