

знос зразків, зміцнених ВВЗО, при терті з питомим навантаженням 1 МПа зменшився в 1,2 раза порівняно з гартованими і в 1,3 порівняно з нормалізованими (рис. 3). Характерно, що знос вкладок також зменшується. Зокрема, знос вкладки, яка працює в парі зі зміцненим зразком, зменшився порівняно з нормалізованим у 3,5 раза, а з гартованим – у 2,0.

Підвищення питомого навантаження до 2 МПа збільшує зносотривкість зміцнених зразків порівняно з нормалізованими в 2,2 раза і з гартованими – в 1,4 раза. Зносотривкість вкладок при цьому також збільшується відповідно в 2,0 і 4,6 раза. Це явище характерне для зміцнювальних технологій і пояснюється зменшенням коефіцієнта тертя трібопари [4].

Отже, на основі проведених досліджень показано, що ВВЗО підвищує зносотривкість сталі 40Х при терті в оливному середовищі в 1,2 – 2,2 раза порівняно з гартованими і нормалізованими зразками.

1. Бакли Д. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии / Пер. с англ. А.В. Белого, Н.К. Мышкина. Под ред. А.И. Свириденка. – М.: Машиностроение, 1986. – 360 с. 2. Афтаназів І.С., Гавриш А.П., Киричок П.О., Мельничук П.П., Попов Є.С., Третько В.В. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням: Навч. посібник. – Житомир: ЖІТІ, 2001. – 516 с. 3. Голубець В.М., Дядченко Б.Т., Бабей Ю.И. Влияние белого слоя на стойкость стали 40Х против абразивного изнашивания. – Физ.-хим. механика материалов, 1972. – № 3. – С. 102 – 104. 4. Бабей Ю.И. Физические основы импульсного упрочнения стали и чугуна. – К.: Наук. думка, 1988. – 240 с.

УДК 621.922(923)

**Я.О. Шахбазов**

Українська академія друкарства,  
кафедра технології матеріалів і поліграфічного машинобудування

## **ВИЗНАЧЕННЯ ШОРСТКОСТІ ОБРОБЛЕНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ ШЛІФУВАННІ АБРАЗИВНИМИ КРУГАМИ**

© Шахбазов Я.О., 2003

**Розглянуто методику розрахунку шорсткості шліфованої поверхні з врахуванням технологічних параметрів правки шліфувального круга, шліфування, пружних та пластичних деформацій оброблюваного матеріалу.**

**There is considered a strategy of calculation for polished surfaces' roughness with provision of technological parameters of grinding wheel setting, so as process of polishing, springy and plastic deformings of the processing material.**

### **Сучасний стан проблеми**

У технології машинобудування шліфування широко застосовують як на операціях викінчувальної обробки, так і на попередніх технологічних операціях, забезпечує більш високу продуктивність, точність та стабільну якість оброблюваних деталей порівняно із лезовою обробкою. Розвиток прогресивних методів отримання заготовок з мінімальними припусками на механічну обробку створює умови ефективного застосування технологічної операції шліфування і при попередній обробці перед викінчувальною, де важливим є забезпечення певного співвідношення шорсткостей оброблених поверхонь. Шорсткість поверхневого шару оброблюваних деталей належить до основних якісних параметрів, що визначає їх експлуатаційні характеристики. Тому важливою є створення теоретичної бази

для встановлення загальних функціональних зв'язків між шорсткістю обробленої поверхні та технологічними чинниками, які діють у період її формування. Суттєвого значення це набуває на викінчувальних технологічних операціях шліфування, де забезпечується формоутворення та остаточна якість обробленої поверхні деталей машин. Призначення обґрунтованих технологічних параметрів шліфування з метою забезпечення заданої шорсткості обробленої поверхні створює можливості підвищення у цілому ефективності процесу механічної обробки в технології машинобудування. Вирішення цієї комплексної проблеми вимагає встановлення основних закономірностей механізму формування шорсткості обробленої поверхні та його технологічного забезпечення шляхом проектування технологічних параметрів шліфування на етапі підготовки машинобудівного виробництва. Практичне застосування такого підходу передбачає наявності теоретичних методів розрахунку залежності параметрів якості обробленої поверхні від технологічних умов шліфування. Можливість вирішення цієї проблеми на теперішній час підтверджується наявністю теоретичних та експериментальних досліджень, результати яких наведені у роботах [1 – 6].

Результати досліджень, які наведені у цих роботах, показують, що за ступенем впливу основних чинників на формування шорсткості ( $R_a$ ) обробленої поверхні при шліфуванні їх слід розташувати у такій послідовності: виходжування; рельєф робочої поверхні шліфувального круга, який утворюється під час його правки алмазним інструментом; кінематика шліфування; пружні та пластичні деформації оброблюваного матеріалу у зоні контакту із шліфувальним кругом; коливання різальних зерен шліфувального круга відносно оброблюваної поверхні. Вони зумовлюють утворення систематичної складової профілю шорсткості, яку можна описати математичною залежністю.

На основі експериментальних досліджень в роботі [1] встановлено, що утворення шорсткості шліфованої поверхні у разі врізного шліфування слід розглядати як кінематичний перенос на оброблену поверхню рельєфу робочої поверхні шліфувального круга, який утворюється під час його правки алмазним інструментом. Один з варіантів отримання розрахункової залежності висоти нерівностей від технологічних параметрів процесу шліфування, який обґрунтовується на геометричній моделі та використання вихідною інформацією характеристик профілю круга, розглянуто у роботах [2, 6]. Однак така математична формалізація формування шорсткості не охоплює питання впливу фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу на остаточну шорсткість обробленої поверхні та прогнозування шорсткості при шліфуванні заготовок деталей з різних матеріалів. Рекомендації щодо визначення умов шліфування з метою забезпечення шорсткості обробленої поверхні варіюванням режимами правки кругів або шліфування [3, 4], які розроблені експериментально, вимагають значних витрат та не дозволяють встановити умови стабільного забезпечення шорсткості у разі зміни деяких технологічних параметрів шліфування. У теоретичному сенсі остаточніше ця проблема розглянута в роботі [5], але без врахування впливу геометричних параметрів рельєфу робочої поверхні шліфувального круга та швидкості шліфування на складову шорсткості, яка пов'язана з пластичними властивостями оброблюваного матеріалу. У вищенаведених роботах також не враховуються зміни у фізико-механічних властивостях оброблюваних матеріалів, які наявні при шліфуванні [7]. З цих причин існуючі рекомендації не відображають цей процес адекватно та не набули широкого застосування на технологічних операціях при шліфуванні заготовок деталей з різноманітних матеріалів.

### **Мета роботи**

Вирішення завдання технологічного забезпечення та прогнозування шорсткості обробленої поверхні дозволяє проектувати основні технологічні параметри шліфування на

етапі підготовки виробництва та створити умови автоматизованого визначення оптимальних умов обробки заготовок деталей.

### Визначення шорсткості обробленої поверхні

Враховуючи загальні вищенаведені рекомендації, висоту профілю шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні, без врахування виходжування, визначаємо сумою складових:

$$Ra = h_1 + h_2 + h_3 + h_4, \quad (1)$$

де  $h_1, h_2, h_3, h_4$  – складові профілю шорсткості обробленої поверхні, які зумовлені рельєфом робочої поверхні абразивного шліфувального круга, яка утворюється під час його правки алмазним інструментом, та технологічними режимами шліфування; пружними деформаціями оброблюваної поверхні; пластичними деформаціями оброблюваного матеріалу; коливаннями різальних зерен шліфувального круга відносно оброблюваної поверхні. Ступінь впливу цих чинників на утворення шорсткості обробленої поверхні залежить від технологічних умов шліфування.

Використовуючи методику розрахунку [2] параметра ( $h_1$ ) складової профілю шорсткості обробленої поверхні, яка зумовлена режимами правки шліфувального круга та технологічними режимами шліфування при формі різальної частини абразивного зерна у вигляді конуса, отримана залежність:

$$h_1 = h_a(1 - \lambda_{cp}/h_a) - h_a(1 - h_\delta/h_a)/2 - 2(1 - h_\delta/h_a)^{0.5}(h_\delta - \lambda_{cp}), \quad (2)$$

де  $h_a$  – висота профілю рельєфу, яка утворюється під час правки шліфувального круга методом точіння алмазним інструментом з поздовжньою подачею ( $S$ ) та кутом при вершині кристала алмаза ( $\gamma$ );  $h_\delta$  – максимальна висота нерівності, яка може бути утворена на поверхні деталі;  $\lambda_{cp}$  – рівень середньої лінії профілю мікровиступу у межах базової довжини. Значення цих параметрів визначаємо з таких рівнянь:

$$h_a = (S/2)tg(\gamma/2), \quad (3)$$

$$h_\delta = h_a - (S(V_\delta/V_k \pm I)(tA)^{1/2} / (\pi D) \pm S_n(tA)^{1/2} V_\delta / (\pi d V_k))tg(90 - \gamma/2) \quad (4)$$

$$\lambda_{cp} = h_a / 2 - h_a(1 - h_\delta / h_a) / 4 - h_\delta(1 - h_\delta / h_a)^{0.5}, \quad (5)$$

де  $A = D$  – при плоскому шліфуванні периферією круга;  $A = Dd/(D + d)$  – при круглому зовнішньому шліфуванні;  $A = Dd/(D - d)$  – при внутрішньому шліфуванні;  $D$  – діаметр шліфувального круга;  $d$  – діаметр оброблюваної деталі;  $V_k$  – швидкість шліфувального круга;  $V_\delta$  – швидкість деталі;  $S_n$  – поздовжня подача при шліфуванні.

Складові шорсткості обробленої поверхні, які зумовлені пружними ( $h_2$ ) та пластичними деформаціями ( $h_3$ ), мають вигляд [7]:

$$h_2 = \frac{P_y}{\pi E S_n} \left[ 2(1 - \mu^2) \ln \frac{d}{a(x)} - \mu(1 + \mu) \right], \quad (6)$$

$$h_3 = 7,8 \cdot \left( 1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_m} \right) \left[ \frac{2S_n V_\delta I_3}{\pi V_k d} \rho_3 \left( 1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_m} \right) \right], \quad (7)$$

де  $P_y$  – радіальна складова сили різання при шліфуванні;  $E$  – модуль пружності оброблюваного матеріалу;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона оброблюваного матеріалу;  $a(x)$  – ширина контактної напівплощини між шліфувальним кругом та оброблюваним матеріалом;  $\rho_3$  – радіус заокруглення різальної кромки абразивного зерна;  $\tau_0$  – межа міцності на зсув оброблюваного матеріалу;  $\sigma_m$  – межа текучості оброблюваного матеріалу.

$$h_4 = \frac{\Delta P_y}{\pi E_1} \left[ 2(1 - \mu_1^2) \ln \frac{D}{a(x)} - \mu_1(1 + \mu_1) \right] \left( \sqrt{\left(1 - \frac{\lambda^2}{\omega^2}\right)^2 + T_h^2 \lambda^2} \right)^{-1}, \quad (8)$$

де  $\lambda$  – амплітуда коливання різального елемента;  $\omega$  – частота власних коливань;  $T_h$  – постійна часу демпфування;  $\Delta P_y$  – різниця сил при шліфуванні;  $E_1$  та  $\mu_1$  – модуль пружності та коефіцієнт Пуассона матеріалу шліфувального круга.

Розрахунок складової профілю шорсткості  $h_4$  при шліфуванні за рівнянням (8) показав, що вона на порядок менша, ніж  $h_1$  і  $h_3$ , і для найрозповсюдженіших випадків шліфування абразивними кругами становить не більше ніж 0,003 – 0,004 км. Тому, при розрахунках висоти профілю шорсткості шліфованої поверхні значенням  $h_4$  можна знехтувати.

Прийнявши профіль шорсткості обробленої поверхні за трикутник та крайні граничні можливі положення абразивних зерен за впадинами та виступами попередньої шорсткості та враховуючи наявність поздовжньої подачі, висота остаточної шорсткості  $Ra$  у роботі [3] визначається у вигляді

$$Ra = Ra_{max} \xi^{\frac{n \cdot B}{S_n} - 1}, \quad (9)$$

де  $Ra_{max}$  – висота вихідної шорсткості, яка утворюється після одного проходу шліфувального круга по поверхні деталі;  $\xi$  – коефіцієнт, який знаходиться у межах 0,75 – 0,78;  $B$  – висота шліфувального круга,  $n$  – кількість проходів при виходжуванні. При шліфуванні за методом врізання за один оберт деталі шліфувальний круг зустрічається з певною частиною поверхні деталі тільки один раз. У цьому випадку  $B = S$ ,  $B/S - 1 = 0$ ,  $\xi^{\frac{B}{S_n} - 1} = 1$ , що є аналогічною шліфуванню з гранично можливою поздовжньою подачею.

Отже, при шліфуванні із застосуванням виходжування остаточну шорсткість обробленої поверхні визначаємо як

$$Ra = \xi^{\frac{n \cdot B}{S_n} - 1} (h_1 + h_2 + h_3). \quad (10)$$

Вирази 2, 6, 7 та 10 дозволяють одержати формулу розрахунку остаточної висоти шорсткості обробленої поверхні при шліфуванні абразивними кругами з врахуванням технологічних умов правки та шліфування, а також пружних та пластичних властивостей оброблюваного матеріалу у вигляді

$$Ra = \xi^{\frac{n \cdot B}{S_n} - 1} \left\{ (h_a(1 - \lambda_{cp}/h_a) - h_a(1 - h_d/h_a))/2 - 2(1 - h_d/h_a)^{0.5} (h_d - \lambda_{cp}) + \frac{P_y}{\pi E S_n} \left[ 2(1 - \mu^2) \ln \frac{d}{a(x)} - \mu(1 + \mu) \right] + 7,8 \cdot \left( 1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_m} \right) \left[ \frac{2S_n V_d l_3}{\pi V_k d} \rho_3 \left( 1 - \frac{2\tau_0}{\sigma_m} \right) \right] \right\} \quad (11)$$

Наведемо приклад розрахунку середнього арифметичного відхилення профілю деталі при круглому зовнішньому шліфуванні заготовки зі сталі 45, діаметром 60 мм, при умовах: шліфування здійснюється абразивним кругом ПП 400x40x127, 24A16CM2K7;  $V_k = 35$  м/с;  $V_d = 35$  м/хв, тобто співвідношення швидкостей відповідає умовам уникнення утворення припалу на обробленій поверхні; глибина шліфування  $t = 0,01$  мм,  $S_n = 0,3$  В (В – висота круга); правка методом точіння однокристалним алмазним інструментом із кутом при вершині  $\gamma = 90^\circ$ ;  $S = 0,02$  мм/об, що відповідає  $h_n = 0,01$  мм.

За формулою (3):  $h_a = 0,01$  мм. За формулою (4):  $h_d = 0,0092$  мм. За формулою (5):  $\lambda = 0,0022$  мм. Підставляючи знайдені значення у формулу (2):  $h_1 = 0,0034$  мм. Отримане значення  $R_a$ , із відхиленням до 15 – 20 %, збігається з експериментальними результатами при шліфуванні сталі 45 без врахування інших компонентів шорсткості, які наведені в роботі [6].

Без врахування бічного зміщення гвинтової поверхні абразивного круга відносно деталі  $h_0 = 0,01$  мм,  $\lambda_{cp} = 0,005$  мм, а значення середнього арифметичного відхилення  $R_a = 0,005$  мм.

Як бачимо, кінематична компонента шорсткості шліфованої поверхні значною мірою залежить від умов правки абразивного круга.

За вищенаведених технологічних умов шліфування, якщо прийняти:  $P_y = 700$  Н [2],  $E_1 = 5 \cdot 10^4$  МПа,  $E_2 = 2 \cdot 10^5$  МПа, то згідно з формулою (6) та роботою [7] отримуємо  $a(x) = 0,22$  мм;  $h_2 = 0,001$  мм.

З формули (7) величина  $h_3 = 0,0015$  мм. Для розрахунку величини пластичної компоненти шорсткості шліфованої поверхні, значення межі міцності оброблюваного матеріалу на зсув та текучість були прийняті, відповідно,  $\tau_0 = 90$  МПа та  $\sigma_T = 360$  МПа, з коефіцієнтом зміцнення – 2,3.

Наведені розрахунки показують, що пластичні деформації оброблюваного матеріалу значно впливають на шорсткість при шліфуванні, що становить приблизно 30 % від загальної суми кінематичної та пружної складових шорсткості. З врахуванням виходжування, наприклад при кількості  $n = 4$ , остаточна шорсткість шліфованої поверхні становитиме:

$$R_a = 0,75 \cdot \frac{40}{12} \times 0,0049 = 0,00014 \text{ мм.}$$

Наведені теоретичні розрахунки дуже добре збігаються з експериментальними дослідженнями, та результатами, які наведені у роботах [2, 6]. Це є підставою для рекомендації розроблених теоретичних закономірностей для практичного застосування.

### Висновки

Отже, на основі проведених досліджень отримані залежності компонентів шорсткості від умов шліфування та фізико-механічних властивостей оброблюваних матеріалів, які дозволяють на етапі технологічної підготовки механічної обробки деталей визначити технологічні параметри шліфування, як за рахунок технологічних параметрів правки кругів, так і режимів шліфування, з метою прогнозування та технологічного забезпечення шорсткості обробленої поверхні.

Однак при шліфуванні пружно-пластичних матеріалів відбувається пластична деформація в їхніх тонких поверхневих шарах, яка розповсюджується під оброблювану поверхню та змінює фізико-механічні властивості поверхневого шару деталі. Тому проектування технологічних параметрів шліфування, особливо на операціях попередньої обробки має передбачити також прогнозування товщини деформованого шару, з метою визначення припуску на викінчувальну операцію механічної обробки, що вимагає продовження досліджень.

1. Коломиец В.В., Полупан Б.И., Химач О.В. Алмазный инструмент фасонного профиля. – К.: Наукова думка, 1982. – 176 с. 2. Королев А.В., Березняк Р.А. Прогрессивные процессы правки шлифовальных кругов. – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1984. – 112 с. 3. Маслов Е.Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с. 4. Рыжов Э.В., Клименко С.А., Гуцаленко О.Г. Технологическое обеспечение качества деталей с покрытиями. – К.: Наукова думка, 1994. – 182 с. 5. Суслов А.Г. Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. – М.: Машиностроение, 1987. – 208 с. 6. Филимонов Л.Н. Высокоскоростное шлифование. – М.: Машиностроение, 1979. – 248 с. 7. Шахбазов Я.О., Ничкало В.С. Закономерности влияния пружных та пластичных деформаций на шорсткість шліфованої поверхні / Проектування, вироб. та експлуатація автотранспортних засобів і поїздів. – Львів, 2000. – № 4. – С. 108 – 111.