

УДК 621.923.42

А.В. Рудик, канд. техн. наук

В.А. Рудик, студент

Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ ГРАНИЧНОЇ ТОВЩИНИ ЗРІЗУ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ЕФЕКТИВНЕ ШЛІФУВАННЯ

Розглядаються питання підвищення ефективності шліфування за рахунок використання різальної здатності абразивного інструмента до граничного рівня. Пропонуються математичні моделі впливу товщини зрізу на стійкість круга та величину його зносу.

Вступ

Метою продуктивного шліфування є завантаження абразивного інструменту до граничного рівня, що визначається різальною здатністю, для більших розмірів границь його контакту з деталлю.

Деякі вчені вважають [0; 10], що гранична товщина зрізу $(a_z)_{\max}$ визначає різальну здатність та залежить від багатьох факторів, серед яких матеріали заготовки, абразивних зерен, зв'язки; кінематичні фактори, вібрації та стан робочої поверхні круга, який може працювати в режимах самозаточування та затуплення та інші. Природа зношення зерен та зв'язки для різноманітних умов може бути різною.

Таким чином, вискоефективне шліфування – це складна проблема, яка поки що не має остаточного рішення. Нею займався ряд учених: Маслов Є.М., Корчак С.М., Філімонов Л.М., Кальченко В.В. та інші [2; 3; 5; 10]. Рішення її дозволить підвищити продуктивність обробки матеріалів, або зменшити знос інструментів.

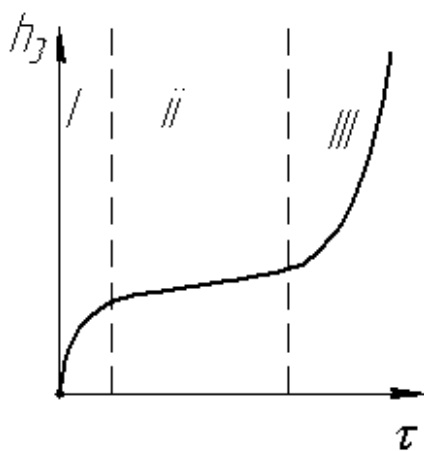


Рис. 1. Залежність зношення від часу роботи

Аналіз досліджень і публікацій

Очевидно цю проблему необхідно вирішувати з використанням статистичних методів побудови моделі процесу.

Відома загальноприйнята залежність, що характеризує процес зношення h_z , який відбувається за часом τ [1]. Вона може бути проілюстрована графічно (рис.1) та має три характерні ділянки, які описують час припрацювання, періоди стало-го та критичного зношень.

У багатьох наукових працях першу й останню ділянки не враховують. Тоді цю залежність розглядають як лінійну. Такий підхід характерний, наприклад, для випадків зношення спряжень верстатів, автомобілів та інших машин.

$$h = C_h \cdot p^m \cdot L, \quad (1)$$

де p – питомий тиск у зоні тертя; L – шлях; C_h, m – емпіричні коефіцієнти.

При різанні металів лезовим інструментом використовують подібну залежність, що не однократно перевірялася багатьма авторами [1] та використовувалася як фундаментальна при визначенні режимів різання. В ній апроксимують лише перші дві ділянки, останню, третю не враховують, називаючи її зоною критичного зношення. Залежність описує зношення, що відбувається за часом τ , при врахуванні швидкості різання та заданих фізичних параметрах процесу:

$$h = C_h \cdot \tau^\alpha \cdot v_k^\beta \cdot a^\gamma \cdot b^\epsilon, \quad (2)$$

де a, b – товщина та ширина зрізу; v_k – швидкість різання, м/с.

Коефіцієнти визначають експериментально.

Широкому використанню подібного виразу для умов обробки шліфуванням перешкоджає відсутність загальноприйнятої моделі для визначення розподілення товщини зрізів та їх граничного значення і зв'язок між товщиною та шириною зрізу.

Залежність (2) дозволяє зробити наступний висновок. Якщо прийняти час таким, що дорівнює періоду стійкості інструмента, то зношення буде приймати граничне значення. Звідси відома залежність про зв'язок між стійкістю та швидкістю різання.

З неї можна визначити граничне значення товщини зрізу кромкою зерна під час шліфування для даної швидкості та стійкості при врахуванні зв'язку між товщиною та шириною зрізу:

$$a = \frac{C_a}{T^{\alpha/\gamma} \cdot v_k^{\beta/\gamma}} = \frac{C_a}{T^m \cdot v_k^q}. \quad (3)$$

Помітимо, що при збільшенні швидкості різання гранична товщина зрізу при заданій стійкості круга зменшується. В даний вираз не включена ширина зрізу кромкою b , бо вона визначається його товщиною.

Історично однією з перших була отримана залежність для традиційних на той час швидкостей різання v_k до 40 м/с у роботі Маслова Є.М. [5] для визначення стійкості круга:

$$T = \frac{1,83 \cdot 10^{-5} \cdot v_k^{1,2} \cdot D^{0,93} \cdot d^{0,67} \cdot h^{0,27}}{v^{1,33} \cdot t^{1,6} \cdot s^{0,84}}, \quad (4)$$

де v – кругова подача деталі, м/хв; t , h – глибина та ширина (мм/хід) шліфування; s – поздовжня подача, мм/об; D , d – діаметри круга і деталі.

З цієї залежності видно, що зі збільшенням швидкості різання стійкість також підвищується, але її зростання відстає.

Подібні ж залежності, що наведені також у книзі Є. М. Маслової для інших умов обробки, мають вигляд:

$$T = \frac{C_\tau}{v^2 \cdot s^2 \cdot t^{1,2}}, \quad (5)$$

$$h_3 = C_h \cdot v_k^{1,7} \cdot s^{1,7} \cdot t^{1,6}, \quad (6)$$

де h_3 – величина зношення круга.

У роботі [3] проф. Корчак С.М. пропонував враховувати при зношенні інструмента вплив параметрів зрізу, зміну радіального зусилля та зменшення опору металу при високих температурах та швидкостях деформації, характерних для шліфування.

Кінематичні параметри впливають на питому продуктивність обробки. За прийнятими уявленнями, приведеними у роботі Філімонова [10], на інтенсивність зношування впливає питома швидкість підведення металу:

$$Q_a = C_q \cdot Q^n. \quad (7)$$

В цій залежності коефіцієнти C_q, n визначають дослідним шляхом. Перший відповідає об'єму зношеного круга при питомій продуктивності підведення матеріалу рівній одиниці. Значення коефіцієнта n має тенденцію до зменшення при збільшенні швидкості шліфування. Так, при обробці сталі 45 в діапазоні швидкостей 35-100 м/хв цей коефіцієнт зменшується з 1,8 до 1,5.

Тобто при збільшенні швидкості різання величина об'ємного зношення зменшується.

Відомо, що питому продуктивність шліфування Q вважають пропорційною глибині та круговій подачі, вплив яких на неї є однаковим. Відповідно, збільшення цих режимних показників впливає на об'єм зношеного абразиву, який зворотно-пропорційний до стійкості абразивного інструменту.

Залежність стійкості круга від швидкості різання та інших технологічних факторів була отримана в експериментальному науково-дослідному інституті металорізальних верстатів (ЕНДІМВ, Москва) при круглому зовнішньому урізному шліфуванні сталі 40X (HRC 50-52) в діапазоні швидкостей 20-60 м/с [10]:

$$T = \frac{180 \cdot v_k^{2.3} \cdot d}{v^{2.64} \cdot t^{1.81} \cdot h^{1.1}}, \quad (8)$$

де t , h – глибина та ширина шліфування мм/об; d – діаметр деталі.

Помітимо подібність характеру залежностей (4) та (8), але ці вирази мають значне розходження показників ступенів та більший вплив кругової подачі порівняно до швидкості різання v_k .

Практикою доведено [3; 4; 10], що збільшення швидкості різання до 100 м/с призводить до суттєвого збільшення стійкості, особливо в області інтенсивних режимів шліфування (при продуктивності зняття металу більшій ніж 10 см³/хв). Але це можливо лише при застосуванні жорстких верстатів. Вібрації негативно впливають як на якість обробки, так і зменшують стійкість, нерівномірно завантажуючи різні зерна робочої поверхні круга.

За даними роботи фірми Гюрінг (Німеччина) [10], збільшення швидкості різання в три рази, з 30 до 90 м/с дозволяє збільшити стійкість інструмента при круглому шліфуванні нормалізованої сталі 45 кругом типу 24A16CM27K в десятки разів, а питомі витрати його зменшити в п'ять-десять разів. Критерієм стійкості була прийнята визначена ступінь зношення крайніх кромки робочої поверхні круга. Використовуючи наведені дані, показник ступеня у вказаному діапазоні швидкостей різання можна вважати близьким до залежності виду (8).

Однак при круглому поздовжньому шліфуванні поверхонь на ділянках, прилеглих до торця круга, утворюється забірний конус, який зменшує товщину зрізу та перерозподіляє навантаження по висоті. Тому, дослідження товщини для круглого поздовжнього шліфування не забезпечать точних результатів. Це було доведено в роботі [8].

Метод визначення граничної швидкості зняття металу для сталі 45, використаний у роботі Гюрінга для урізного шліфування з прискореною швидкістю врізання внаслідок зменшення діаметра і відповідно кругової подачі [8; 10]. Для підтримання постійного об'єму металу, що підводять до абразивного інструменту, добуток кругової подачі деталі на припуск повинний підтримуватися постійним.

Режими підвищували поки не виникало різке порушення робочої поверхні круга. Методика, однак, не враховує знос і стійкість круга, які будуть при таких жорстких умовах шліфування. Специфіка методу визначення $Q_{гр}$ обумовлює отриманий у таблиці 1 характер впливу зернистості та твердості круга на граничне питоме зняття металу. Для матеріалу та зернистості кругів 24A16CM1Б при обробці сталі, за властивостями подібної до сталі 45, отримані наступні дані по питомій продуктивності та проведений розрахунок [7] номінального та максимального значень товщини зрізу та кількості контактів.

Таблиця 1

Граничні значення режимів різання

№ досл.	V_k , м/с	$V_{дет} = V_k/60$	t , мм	$Q_{гр}$, мм ² /с	a_z , МКМ	$a_{z \max}$	$n/n_{піз}$
1	20	333	0,033	11	5,32	10.17	10/6
2	40	667	0,033	13	3.04	5.83	11/7
3	60	1000	0,028	18	2.01	3.78	15/10
4	80	1333	0,026	26	1.64	3.07	19/12
5	90	1500	0,025	38	1.59	2.84	25/16

Подібні дані можна отримати і для інших умов шліфування та характеристик кругів.

Практикою фірми “Junker maschinen” (Німеччина) [4] доведено, що при поздовжному шліфуванні орієнтованим інструментом продуктивність обробки може бути значно збільшена, а зношення круга значно меншим, приблизно на порядок. Продуктивність обробки збільшують через збільшення площі контакту навіть при зменшенні питомого навантаження.

Зношення круга зменшується з наступних причин.

По перше, зменшений вплив вібрацій у радіальному напрямку, які особливо відчутні при зміні товщини при великих значеннях швидкості різання. Крім того, через підведення основного припуску до торця при збільшенні площі контакту підвищується коефіцієнт демпфірування, що в свою чергу зменшує коливання.

По друге, розподіл товщини стружок при торцевій обробці має меншу дисперсію порівняно до поздовжного шліфування. Швидкість підведення металу залишається майже постійною вздовж зони контакту інструмента з заготовкою, що було доведено у роботі [9].

Ці обставини дозволяють збільшити продуктивність обробки при підвищенні стійкості інструмента.

Теоретичні дослідження граничної товщини зрізу з урахуванням їх імовірнісного характеру не проводились. Це підкреслює актуальність цього питання.

Формулювання цілей статті (постановка завдання)

Метою статті є розробка рекомендацій по підвищенню продуктивності шліфування за рахунок більш повного використання його різальної здатності при встановленні граничної товщини шару, що зрізується.

Для досягнення мети слід уточнити характер залежності граничної товщини зрізу та обґрунтувати вибір емпіричних коефіцієнтів. Необхідно також перевірити близькість отриманих коефіцієнтів з результатами розрахунку при використанні розробленої автором моделі товщини зрізу.

Виклад основного матеріалу

На основі аналізу ряду наведених виразів (3)-(8), бачимо, що при загальному підході до вибору стійкості інструмента, значення емпіричних коефіцієнтів значною мірою різняться. Крім того, за наведеними даними не завжди можливо проводити розрахунки та об'єктивне порівняння через їх неповноту.

Обґрунтовані середні значення коефіцієнтів можна обрати, використовуючи метод експертних оцінок [6], який широко використовують у практиці в подібних складних випадках.

Найпростіший та поширений спосіб отримання оцінок проводять за їх середнім значенням. Відомі різні види середніх величин: середнє арифметичне, медіана, мода, геометричне, середнє гармонійне, середнє квадратичне.

Узагальненням декількох з перерахованих є середнє за Колмогоровим. Для чисел X_1, X_2, \dots, X_n таке середнє обчислюють за формулою

$$G\left\{\frac{F(X_1)+F(X_2)+\dots+F(X_n)}{n}\right\}, \quad (9)$$

де F – строго монотонна функція; G – функція, обернена до F .

Так, якщо $F(x) = x$, то отримують середнє арифметичне, якщо $F(x) = \ln x$, то середнє геометричне, якщо $F(x)=1/x$, то середнє гармонійне, якщо $F(x) = x^2$, то середнє квадратичне і т.д. З іншого боку, такі популярні середні, як медіана і мода, не можна уявити у вигляді середніх за Колмогоровим.

За допомогою математичної теорії, розвинутої А.І. Орловим у 1970-х роках, вдається описати вид допустимих середніх в основних шкалах: абсолютній, найменувань; порядкової, інтервалів та інших.

Отже, середньоквадратичні значення коефіцієнтів ступеня є менш чутливі до впливу найменшої та найбільшої оцінок та дозволяють для однакових умов робити оцінки впливу швидкості та глибини різання, кругової подачі для виразів, подібних (4-8).

Для забезпечення максимально припустимої продуктивності шліфування слід уміти визначати граничну товщину зрізу $(a_z)_{\max}$.

Для дослідження її граничного рівня використана математична модель [7], яка перевірена для випадків круглого та торцевого шліфування та довела свою ефективність. Однією з переваг цієї моделі є ймовірний характер отриманих залежностей – інформація подається у вигляді інтегральної функції або щільності розподілу товщини зрізів, звідки знаходять середнє та максимальне значення.

У роботі [7] отримана розрахункова модель випадкового процесу шліфування. Він визначається круговою подачею, глибиною та швидкістю різання, станом робочої поверхні круга та його маркою. Згідно з цією моделлю можна знайти апроксимоване рівняння товщини від вказаних параметрів.

Наприклад, для умов різання абразивним кругом 24A16CM1, що пройшов термін припрацювання після виправлення, рівняння має вигляд:

$$a_z = \frac{32.06 \cdot v^{0.263} \cdot t^{0.218}}{v_k^{0.733}}. \quad (10)$$

Таким чином, швидкість та кругова подача впливають більш інтенсивно на товщину шару, що зрізується, ніж глибина різання. Найбільший вплив відбувається орієнтовно при швидкості 50 м/с, коли стійкість інтенсивно зростає, а товщина – зменшується. Доведено адекватність математичної моделі, яка не має протиріч з отриманими експериментальними залежностями.

Вплив швидкості та глибини різання на товщину показаний для наведеного прикладу на рисунку 2.

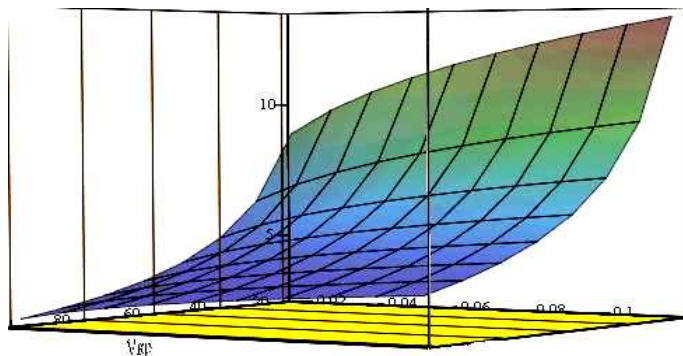


Рис. 2. Графік залежності товщини зрізу від швидкості та глибини різання

Оцінки впливу швидкості різання та товщини зрізів на стійкість круга (дивись вираз (3)) можна отримати, наприклад, використовуючи метод експертних оцінок через показники їх ступенів. Для цього знаходять інтегральний вплив глибини та кругової подачі як середнє квадратичне значення коефіцієнтів ступенів з теоретичної (10) та дослідних (4, 6, 7, 9) залежностей. Потім порівнюють отримані інтегральні оцінки через їх відношення, яке характеризує шуканий показник ступеня при товщині зрізу. В останню чергу визначають вплив на стійкість швидкості шліфування, як остаток емпіричного зваженого показника ступеня для даних умов та збільшеного розрахункового значень.

Виконуючи нескладні розрахунки, можна для наведеного прикладу помітити відчутний вплив товщини зрізу на стійкість – значення показника ступеня близькі до 5. Однак відомо, що сама товщина зрізу змінюється незначно для широкого діапазону кінематичних умов.

Таким чином, зменшуючи товщину зрізу, можна значною мірою підвищувати стійкість інструмента при високій жорсткості системи ВПД, що підтверджується практикою фірми “Junker maschinen”.

У площині основи графіка (рис.2 – осі $V-t$) існує область, в якій значення стійкості шліфувального інструменту гарантовані.

Встановимо вплив товщини зрізів на зношення абразивного круга.

На відміну від лезвійної обробки, в зрізанні припуску бере участь значна кількість різальних кромки при різноманітних товщинах зрізів. Деякі з них працюють у режимі катастрофічного зношення (3 ділянка на рис.1) через різну висоту їх положення, вібрації та малу різницю значень мінімальної товщини зрізу $(a_z)_{\min}$ від її граничних найбільших значень $(a_z)_{\max}$.

Залежність, якою можна апроксимувати графік на рис.1, для однієї кромки зерна від товщини зрізу може мати вигляд:

$$Q_K(a_z) = C_1 \cdot a_z^{k_1} + C_2 \cdot a_z^{k_2}. \quad (11)$$

Другий доданок характеризує зношення кромки, яке буде відбуватись за умови, коли $a_z > (a_z)_{\max}$. Точка перегину на рис.1 відповідає умові рівності других похідних, коли швидкість зростання впливу другого доданка дорівнює спаду першого.

Пропонується зношення круга визначати пропорційним кількості зрізів більших граничного значення $(a_z)_{\max}$:

$$Q_a(a_z) = C_1 \cdot a_z^{k_1} \cdot F(a_z) + C_2 \cdot a_z^{k_2} (1 - F(a_z)), \quad (12)$$

де $k_1 < 1$, $k_2 > 1$ – показники ступенів при товщині зрізу.

$F(a_z)$, $(1 - F(a_z))$ – значення інтегральної функції розподілення розрахункової товщини зрізів, котрі визначають частку товщини зрізів, менших та більших вказаного граничного значення a_z . Інтегральна функція розподілу ймовірностей товщини стружок була знайдена за моделлю процесу шліфування в роботі [7].

Висновки

Розроблена методика дозволяє враховувати стан робочої поверхні круга, змінні технологічні параметри процесу шліфування на граничну товщину зрізу, яка визначає ефективність обробки шліфуванням. Методика не накладає обмежень на кінематику процесу та стан робочої поверхні круга. Її можна використовувати для знаходження зношення абразивного інструменту.

Список використаних джерел

1. Васин С. А. Резание материалов. Термо-механический поход к системе взаимосвязей при резании: учебник для техн. вузов / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнір. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 448 с.: ил.
2. Кальченко В. В. Научные основы эффективного шлифования со скрещивающимися осями инструмента и обрабатываемой детали: автореф. дис. на соиск. уч. степ. доктора техн. наук. / В. В. Кальченко. – Харьков, 2006. – 36 с.
3. Корчак С. Н. Производительность процесса шлифования стальных деталей / С. Н. Корчак. – М.: Машиностроение, 1974. – 280 с.
4. Круглое шлифование с ЧПУ/ Проспект фирмы “Junker maschinen” на станке “Quickpoint 1001” и “Quickpoint 1002”. Erwin Junker. Maschinen fabrik GmbH, Junkerstraße 2. Postfach 25. D 7618 Nordrach. Germany. 1991, 16 с.
5. Маслов Е. Н. Теория шлифования металлов / Е. Н. Маслов. – М.: Машиностроение, 1974. – 319 с.
6. Орлов А. И. Экспертные оценки / А. И. Орлов. – Москва: Наука, 2002. – 31 с.
7. Рудик А. В. Визначення товщини шару, що зрізується кромкою орієнтованого абразивного інструменту / А. В. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2010. – № 42. – С. 128-136.
8. Рудик А. В. Перерозподіл навантажень при поздовжному глибинному шліфуванні / А. В. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету: збірник. – Чернігів: ЧДТУ, 2011. – № 1(47). – С. 24-29.
9. Рудик А. В. Продуктивність обробки торців на торцево-шліфувальних верстатах / А. В. Рудик, В. А. Рудик // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. – Чернігів: ЧДТУ, 2010. – № 45. – С. 57-67.
10. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование / Л. Н. Филимонов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 248 с., ил.