

П.Г. Матюха, д-р техн. наук, В.В. Полтавец, канд. техн. наук,
В.В. Габитов, Донецк, Україна

РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ ШЛІФУВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МИТТЄВОЇ ПОТОЧНОЇ РІЗАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ КРУГА

У статті розглядається методика знаходження оптимальних режимів шліфування за пружною схемою з використанням миттєвої поточної лімітованої ріжучої здатності шліфувального кола, а також адаптація знайдених режимів для твердої схеми обробки.

В статье рассматривается методика нахождения оптимальных режимов шлифования по упругой схеме с использованием мгновенной текущей лимитированной режущей способности шлифовального круга, а также адаптация найденных режимов для жёсткой схемы обработки.

In the paper the technique of determination of optimum conditions of grinding by elastic setup with use of the instant current limited cutting capacity of grinding wheel, and also adaptation of the found conditions for machining by rigid setup.

Підвищення продуктивності обробки при високій якості виготовлення продукції є одним із пріоритетних завдань машинобудування. Вирішення цього питання в значній мірі відбувається за рахунок пошуку оптимальних режимів оброблення. Існують експериментально-теоретичний, табличний та графічний методи пошуку режимів. Кожен із цих методів має свої недоліки та переваги. Так, табличний та графічний методи мають досить вузьку область використання [1], експериментально-теоретичний – значні витрати часу на пошук необхідних залежностей [2, 3].

Метою роботи є удосконалення експериментально-теоретичного методу оптимізації режимів шліфування на основі нового поняття – поточна лімітована різальна здатність круга, яка забезпечує зменшення трудомісткості пошуку режимів та повне використання різальної здатності круга.

Для розкриття сутності методу оптимізації, що пропонується, розглянемо детальніше основні етапи класичного експериментально-теоретичного способу призначення режимів шліфування.

Вхідними даними для визначення режимів різання є:

- а) інформація про оброблюваний матеріал і розміри поверхні, що шліфується;
- б) припуск на обробку;
- в) вимоги до точності, шорсткості оброблених поверхонь та інших показників якості;
- г) інформація про верстат;
- д) жорсткість технологічної системи;
- е) характеристика круга, яким проводять обробку на даній операції.

Визначення оптимального режиму шліфування класичним способом виконується в три етапи [4]:

- складання системи рівнянь, що описують технічні обмеження, які накладаються на режим різання вимогами до деталі, верстатом, інструментом і вимогами виробництва;
- математичний опис цільової функції, тобто функції, що виражає ціль оптимізації;
- спільний розгляд технічних вимог і цільової функції і визначення на цій основі оптимального режиму шліфування.

Технічні обмеження, які накладаються на режим різання вимогами до виробу, наступні: а) гранично допустима висота шорсткості Ra^* на обробленій поверхні (ТО 1); б) потрібна точність деталі після шліфування (допуск δ^*) (ТО 2); в) температура поверхні Θ^* , що шліфується, гранично допустима з точки зору припалів, залишкових напружень, або інших показників якості поверхневого шару деталі (ТО 3).

Технічні обмеження, що накладаються на режими різання верстатом, наступні: а) потужність приводу шліфувального круга N^* (ТВ 1); б) найбільші і найменші частоти обертання шпинделя та значення подач, що передбачені кінематикою і конструкцією відповідних механізмів верстата (n_{\max}^* , n_{\min}^* (ТВ 2), $v_{1\max}^*$, $v_{1\min}^*$ (ТВ 3) тощо).

Технічні обмеження, що накладаються на режим різання шліфувальним кругом, наступні: а) потрібна стійкість інструмента T (ТК 1); б) гранична температура на різальних зернах Θ_3^* (ТК 2); міцність круга (ТК 3).

Конкретні значення складових систем рівнянь, які описують обмеження ТО1 - ТО3, знаходяться за формулами, які наведені в технічній і довідковій літературі, а при їх відсутності – з експериментів; вирази, які описують обмеження ТВ1 - ТВ3, визначаються за паспортними даними верстата або отримуються на основі теоретико-експериментальних даних; вирази, які описують обмеження ТК 1 - ТК 3, знаходяться з довідкової літератури або з результатів експериментальних досліджень.

Комплекс наведених технічних обмежень описує область можливих режимів шліфування.

Цільові функції являють собою математичний опис мети, з якої оптимізують режим шліфування. В залежності від конкретних умов виробництва при оптимізації буває необхідно забезпечити або найменшу питому собівартість обробки на даній операції, або досягнення найбільшої продуктивності процесу оброблення.

В умовах ринкових відносин при визначені оптимальних режимів різання метою оптимізації повинно бути отримання мінімальної питомої собівартості обробки, тобто

$$C_{\text{num}} = \min. \quad (1)$$

Дослідженнями в роботі [5] показано, що, як правило, варіант режимів різання, який забезпечує найменший штучний час, тобто найбільшу продуктивність, разом з тим є також і найбільш економічним варіантом.

Після приведення виразів технічних обмежень разом із цільовою функцією (1) до лінійного вигляду рішення отриманої системи рівнянь відносно елементів режиму, що нас цікавлять, виконують засобами лінійного програмування за допомогою електронно-обчислювальної техніки.

При знаходженні оптимальних режимів класичними методом за умов шліфування нових матеріалів або обробки кругами з новими характеристиками, потрібні значні витрати часу для знаходження залежностей, які описують технічні обмеження. Крім того, класичний метод дає результати, які неможливо використовувати у випадку, коли режими або час оброблення виходить за межі, в яких були знайдені рівняння технічних обмежень. Але основним недоліком класичного методу є те, що він не враховує зміну в часі різальної здатності круга. Як наслідок, рівняння технічних обмежень знаходяться для умов, коли параметри робочої поверхні круга (РПК) стабілізуються, що призводить до заниження режимів порівняно з шліфуванням робочою поверхнею круга, сформованою безпосередньо після правки.

Для усунення цього недоліку проаналізуємо зміну вихідних показників оброблення при шліфуванні за широко розповсюдженою в промисловості жорсткою схемою, яка характеризується нестабільністю вихідних технологічних показників оброблення, обумовленою погіршенням різальної здатності круга під час шліфування, та при шліфуванні за пружною схемою.

При шліфуванні за жорсткою схемою погіршення різальної здатності РПК практично не впливає на кількість видаленого шліфуванням матеріалу, яка задається режимами оброблення, але призводить до зміни фазово-структурного стану поверхневого шару обробленої поверхні, появи шліфувальних припалів та мікротріщин, збільшує енерговитрати, а також погіршує точність обробки. Поряд з цим, з погіршенням різальної здатності РПК при обробленні деяких конструкційних матеріалів зменшуються висотні параметри шорсткості обробленої поверхні.

При шліфуванні за пружною схемою з постійною силою підтискування зразка до поверхні круга погіршення різальної здатності РПК призводить до зменшення об'єму матеріалу, який видаляється шліфуванням, зменшення параметрів шорсткості, забезпечуючи при цьому стабільними такі технологічні показники якості обробленої поверхні, як її фазово-структурний стан, та енергетичні витрати на процес обробки. Це відбувається за рахунок того, що пружна схема забезпечує в будь-який момент оброблення зрівнювання кількості матеріалу, який може видалити робоча поверхня круга за рахунок її різальної здатності, і кількості матеріалу, який підводиться для видалення за рахунок робочих рухів. Враховуючи зазначену особливість пружної схеми шліфування для оцінки різальної здатності РПК нами

запропонований новий параметр – *миттєва поточна лімітована різальна здатність круга* [6] – яка представляє собою об’єм матеріалу, який видаляється в одиницю часу, в будь-яку мить оброблення; при цьому виконуються технічні обмеження, що накладаються на режим обробки якістю обробленої поверхні (температурою порогу фазово-структурних перетворень у поверхневому шарі деталі) або інструментом (температурою окислення алмаза, міцністю надтвердого матеріалу і т. ін.).

При пружному врізному шліфуванні нерухомої деталі продуктивність шліфування визначається за формулою

$$P = W \cdot B_{\delta} \cdot L_{\delta}, \text{ мм}^3/\text{хв}, \quad (2)$$

де W – швидкість переміщення РПК в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні деталі, мм/хв;

B_{δ} – ширина оброблюваної поверхні деталі, мм;

L_{δ} – довжина оброблюваної поверхні деталі, мм.

При плоскому врізному шліфуванні із глибиною шліфування t_{ϕ} і швидкістю столу V_{cm} продуктивність обробки буде

$$P = 1000 \cdot V_{cm} \cdot B_{\delta} \cdot t_{\phi}, \text{ мм}^3/\text{хв}, \quad (3)$$

Виразимо швидкість столу через довжину деталі і частоту ходів столу

$$V_{cm} = \frac{L_{\delta} \cdot n_{cm}}{1000}, \text{ м/хв}, \quad (4)$$

де n_{cm} – частота ходів столу, 1/хв.

Після підстановки (4) в (3) будемо мати

$$P = n_{cm} \cdot t_{\phi} \cdot B_{\delta} \cdot L_{\delta}, \quad (5)$$

де $B_{\delta} \cdot L_{\delta}$ – площа оброблюваної ділянки поверхні деталі, мм²;

$n_{cm} \cdot t_{\phi}$ – швидкість переміщення РПК в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні деталі, яке на противагу пружній схемі шліфування здійснюється не безперервно, а уривчисто, мм/хв.

Аналогічно можна показати, що формула (2) є справедливою для визначення продуктивності при будь-яких технологічних різновидах шліфування. Так, при круглому врізному шліфуванні

$$P = n_{\delta} \cdot t_{\phi} \cdot B_{\delta} \cdot \pi D_{\delta}, \quad (6)$$

де D_{δ} – діаметр оброблюваної поверхні деталі, мм;

n_{δ} – частота обертання деталі, об/хв.

У формулі (6) $B_{\delta} \cdot \pi D_{\delta}$ – площа оброблюваної поверхні деталі, а $n_{\delta} \cdot t_{\phi}$ – швидкість переміщення РПК в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні деталі.

При плоскому шліфуванні з поперечною подачею продуктивність обробки визначається за формулою

$$P = kB_k \cdot 1000 \cdot V_{cm} \cdot t_{\phi}, \quad (7)$$

де B_k – висота шліфувального круга, мм;

k – частина висоти круга, на яку здійснюється поперечна подача за хід столу ($k = 0,6-0,8$).

Виразимо продуктивність обробки через кількість проходів за одну хвилину:

$$i = 1/t_{\text{прох.}}$$

Час одного проходу $t_{\text{прох}}$ визначимо по ширині деталі B_o , величині поперечної подачі і частоті ходів столу

$$t_{\text{прох}} = \frac{B_o}{n_{cm} \cdot kB_k},$$

тоді кількість проходів за одну хвилину буде дорівнювати

$$i = \frac{n_{cm} \cdot kB_k}{B_o},$$

або, з урахуванням швидкості поздовжнього ходу столу,

$$i = \frac{1000V_{cm} \cdot kB_k}{L_o \cdot B_o}. \quad (8)$$

Підставимо значення $1000V_{cm} \cdot kB_k$ із формули (8) в формулу (7) і отримаємо

$$P = B_o \cdot L_o \cdot i \cdot t_{\phi}. \quad (9)$$

Таким же чином була отримана формула для круглого шліфування з поздовжньою подачею

$$P = \pi D_o \cdot L_o \cdot i \cdot t_{\phi}. \quad (10)$$

де i – кількість проходів за хв.

У формулах (9) и (10), $i \cdot t_{\phi}$ – швидкість переміщення РПК в напрямку нормалі до оброблюваної поверхні деталі, мм/хв, а $B_o \cdot L_o$ і $\pi D_o \cdot L_o$ – площа частки поверхні заготовки, яка підлягає обробці, мм².

З формул (5), (6), (9) і (10) видно, що найбільш зручним параметром режиму шліфування, за допомогою якого можна зрівняти продуктивність обробки і різальну здатність круга, є миттєва фактична глибина шліфування. З цих же формул випливає, що зміну фактичної глибини шліфування необхідно здійснювати дискретно через час, рівний часу одного ходу столу

при плоскому врізному шліфуванні або часу одного обороту деталі – при круглому, або через кратний їм час. При шліфуванні з подачею фактичну глибину шліфування необхідно змінювати через час, який витрачається на один прохід, або час, кратний декільком проходам.

Фактична глибина шліфування, яка враховує режими оброблення, геометричні параметри РПК та фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу, визначає навантаження на одичне зерно, складові сили різання, теплонапруженість процесу і залежить при пружній схемі шліфування від сили підтискування заготовки до РПК.

Враховуючи це, знаходження оптимальних режимів шліфування за пружною схемою з використанням миттєвої поточної лімітованої різальної здатності круга включає:

1) визначення відношення швидкості круга до швидкості деталі з умов забезпечення потрібних параметрів шорсткості обробленої поверхні параметрами РПК, які були сформовані під час правки, і з урахуванням паспортних даних верстата;

2) розрахунок за параметрами РПК, що були сформовані під час правки, граничних значень температур, які забезпечать відсутність фазово-структурних перетворень на обробленій поверхні деталі, окислення алмазів на поверхні круга, неперевищення граничних сил, обмежених міцністю зерен НТМ і т. п.;

3) розрахунок сил пружного підтискування заготовки до РПК з використанням граничних значень обмежень, обчислених за пунктом 2, та визначення лімітованої сили підтискування, яка задовольняє всім технологічним обмеженням;

4) проведення експериментального дослідження зміни миттєвої поточної лімітованої різальної здатності круга та математичний опис результату експерименту у вигляді залежності фактичної глибини різання від часу обробки $t_{\phi} = f(\tau)$;

5) визначення режимів безперервних електро-фізико-хімічних дій на РПК одночасно з обробленням заготовки або часу між періодичними діями на РПК, які забезпечують мінімальну питому собівартість оброблення.

Таким чином, особливість оптимізації процесу шліфування з використанням поточної лімітованої різальної здатності шліфувального круга полягає в тому, що замість рівнянь технічних обмежень, як це має місце при класичному способі, розраховуються їх граничні значення з використанням параметрів РПК, що сформовані під час правки. Отже, в розрахунки закладені максимальні можливості РПК по продуктивності процесу. Мінімальна питома собівартість оброблення досягається за рахунок визначення режимів безперервних електро-фізико-хімічних дій на РПК, що відбуваються одночасно з обробленням заготовки, або часу між періодичними діями на РПК.

Оптимізація процесу шліфування з використанням поточної лімітованої різальної здатності шліфувального круга є менш трудомісткою, тому що розрахунки граничних величин технічних обмежень потребують менших витрат часу в порівнянні з проведенням серії експериментів з метою знаходження рівнянь технічних обмежень та визначення оптимального режиму шліфування на основі спільного розгляду технічних вимог і цільової функції.

При використанні жорсткої схеми шліфування необхідно здійснити перехід від режимів, знайдених для пружної схеми, до режимів для жорсткої; при цьому необхідною умовою є ідентичність кінематики пружної та жорсткої схем оброблення. Для цього визначається час одного ходу при врізному шліфуванні (одного проходу при шліфуванні з подачею), а потім, за залежністю $t_{\phi} = f(\tau)$, розраховується фактична глибина шліфування для кожного i -го ходу (проходу) протягом усього періоду стійкості шліфувального круга [7].

Час робочого ходу τ_{px} при врізному шліфуванні або проході при шліфуванні з подачею розраховується за відомими математичними залежностями з використанням розміру оброблюваної деталі, а також в залежності від виду шліфування, наприклад:

- плоске врізне шліфування – $\tau_{px} = \frac{L + y + \Delta}{1000V_{cm}}$;

- плоске шліфування із поперечною подачею –

$$\tau_{px} = \frac{(L + y + \Delta) \cdot B_{\phi}}{1000V_{cm} \cdot kB_{\kappa}}$$

- кругле зовнішнє і внутрішнє шліфування із поздовжньою подачею –

$$\tau_{px} = \frac{\pi D_{\phi} \cdot L_{\phi}}{1000V_{\phi} \cdot kB_{\kappa}}$$

В наведених формулах y – величина шляху врізання, мм; Δ – величина шляху перебігу, мм.

Знайдені за отриманою після проведення експериментальних досліджень регресійною залежністю значення глибини шліфування t_{ϕ} є величиною подачі на врізання, яка заноситься в керуючу програму шліфувального верстата з ЧПК для виконання обробки, а інші елементи режиму (V_{κ} , V_{cm}) та режими електро-фізико-хімічних дій на РПК переносяться із пружної схеми на жорстку без змін.

Висновки

1. Основним недоліком класичного методу пошуку оптимальних режимів шліфування є те, що він не враховує зміну в часі різальної здатності шліфувального круга. Як наслідок, рівняння технічних обмежень знаходяться для умов, коли параметри РПК стабілізуються, що призводить до зниження режимів порівняно із тим, коли шліфування виконується робочою поверхнею круга, сформованою безпосередньо після правки.

2. Принципова особливість знаходження оптимальних режимів шліфування за пружною схемою з використанням миттєвої поточної лімітованої різальної здатності круга полягає в тому, що граничні значення технічних обмежень, які накладаються на режим оброблення вимогами до якості обробленої поверхні та кругом, розраховуються за параметрами РПК, сформованими під час правки, що забезпечує максимальне використання різальної здатності круга протягом всього часу його роботи.

3. Використання миттєвої поточної лімітованої різальної здатності круга для пошуку оптимальних режимів забезпечує зменшення трудомісткості пошуку на 25-35 % у порівнянні з класичним методом за рахунок того, що граничні значення технічних обмежень розраховуються, а не описуються в вигляді нерівностей, як це має місце в класичному способі визначення режимів.

4. Оптимальні режими шліфування, які знайдені для пружної схеми оброблення, можуть бути адаптовані для жорсткої схеми за умови ідентичності кінематики обох схем.

Список використаних джерел: 1. Попов С.А., Малевский Н.В., Терещенко Л.М. Алмазно-абразивная обработка металлов и твёрдых сплавов. – М.: Машиностроение, 1977. – 263 с. 2. Узунян М.Д., Краснощек Ю.С. Высокопроизводительное шлифование безвольфрамовых твёрдых сплавов. – М.: Машиностроение, 1988. – 80 с. 3. Узунян М.Д. Алмазно-искровое шлифование твёрдых сплавов. Харків: НТУ «ХПІ», 2003. – 259 с. 4. Абразивная и алмазная обработка материалов. Справочник/ Под ред. А.Н. Резникова. – М.: Машиностроение, 1977. – 391 с. 5. Грановский Э.Г. Исследование износостойкости алмазных инструментов для выглаживания/ Алмазы. – 1969, №1. – С. 28-32. 6. Матюха П.Г., Полтавец В.В. Режущая способность рабочей поверхности круга как ограничивающий параметр производительности шлифования./ Надежность инструмента и оптимизация технологических систем. Сб. научных трудов. – Краматорск: ДГМА, 2003. – Вып. 13. – С. 159-164. 7. Матюха П.Г., Стрелков В.Б., Полтавец В.В. Определение режимов плоского шлифования твердых сплавов с использованием нового критерия о текущей лимитированной режущей способности круга/ Сверхтвердые материалы. Научно-теоретич. журнал. – Киев: 2004. – № 3. – С. 67-73.

Поступила в редколлегию 15.03.2010