

В.Ю. Денисюк, Ю.А. Лук'янчук, Ю.С. Лапченко

Луцький національний технічний університет

**ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРУЖНОЇ СИСТЕМИ
БЕЗЦЕНТРОВО-ШЛІФУВАЛЬНОГО ВЕРСТАТУ SWaAKM 25/1A ПІД ЧАС
ПЕРЕРИВЧАСТОГО ШЛІФУВАННЯ**

Представлено дослідження динамічних характеристик процесу шліфування на безцентрово-шліфувальному верстаті SWaAKM 25/1A для умов оброблення поверхонь кочення роликів підшипників переривчастим шліфувальним кругом. Для отримання загальних рекомендацій з оптимізації геометричних параметрів переривчастих кругів запропоновано узагальнений показник шліфування K , що визначається режимами шліфування, відношенням робочої поверхні шліфувального круга, оброблюваністю матеріалу і умовами роботи системи круг – деталь, які можуть бути використані для визначення роботоздатності абразивного інструменту.

Ключові слова: шліфування, переривчастий круг, вібрація, жорсткість, динамічна система, динамічна характеристика, пружна система, коливання.

Рис. 7. Форм. 12. Літ. 12.

В.Ю. Денисюк, Ю.А. Лук'янчук, Ю.С. Лапченко

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОЙ СИСТЕМЫ
БЕСЦЕНТРОВО-ШЛИФОВАЛЬНОГО СТАНКА SWaAKM 25/1A ПРИ ПРЕРЫВИСТОМ
ШЛИФОВАНИИ**

Представлено исследование динамических характеристик процесса шлифования на бесцентрово-шлифовальном станке SWaAKM 25/1A для условий обработки поверхностей качения роликов подшипников прерывистым шлифовальным кругом. Для получения общих рекомендаций по оптимизации геометрических параметров прерывистых кругов предложен обобщенный показатель шлифовки K , который определяется режимами шлифования, отношением рабочей поверхности шлифовального круга, обрабатываемостью материала и условиями работы системы круг - деталь, которые могут быть использованы для определения работоспособности абразивного инструмента.

Ключевые слова: шлифование, прерывистый круг, вибрация, жесткость, динамическая система, динамическая характеристика, упругая система, колебания.

V.Y. Denysiuk, Y.A. Lukyanchuk, Y.S. Lapchenko

**INVESTIGATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS ELASTIC CENTRELESS
GRINDING MACHINES SWaAKM 25/1A INTERMITTENT DURING GRINDING**

Presented study the dynamic characteristics of the grinding process on centreless grinding machines SWaAKM 25/1A conditions for processing circle surfaces of roller bearings intermittent grinding wheel. For general recommendations on optimization of geometrical parameters intermittent circles generalized grinding K index, defined modes grinding, the ratio of the working surface of the grinding wheel, material workability and conditions of the system range - detail, which can be used to determine the operability of abrasive tools.

Key words: grinding, intermittent circle, vibration, rigidity, dynamic system, dynamic characteristics, elastic system vibrations.

Вступ. В технологічному циклі виготовлення підшипників провідне місце займають шліфувальні операції оброблення поверхонь кілець та роликів. Якщо процеси виготовлення кілець складаються з операцій лезового та абразивного оброблення, то технологічний процес виготовлення роликів складається з заготівельних операцій та операцій чорнового і чистового шліфування, які виконуються до та після термічного оброблення. Мікро- та макрогеометричні параметри робочих поверхонь роликів формуються на шліфувальних операціях, число яких складає: три операції до термічного оброблення і сім операцій після загартування. 80% з загального числа шліфувальних операцій оброблення роликів займають безцентрово-шліфувальні операції попереднього та викінчувального шліфування поверхонь обертання. Від рівня технологічності цих операцій у великій мірі залежить якість виробів та їх експлуатаційні показники. Традиційні підходи до виконання безцентрово-шліфувальних операцій в багатьох випадках не забезпечують потрібних показників якості шліфованих поверхонь роликів та ефективності технологічних операцій. Безцентрове шліфування суцільними абразивними кругами супроводжується виникненням температурних дефектів (припалювань) на шліфованих поверхнях, невідповідністю параметрів шорсткості та хвилястості поверхонь обертання внаслідок складних умов стружко- та тепловідведення із зони шліфування.

Суттєвий вплив на формування якості шліфованої поверхні деталей мають вібрації, що супроводжують процес шліфування. Рівень вібрації пружної системи безцентрово-шліфувального верстату залежить від рівня зовнішніх збурень і ступеня стійкості верстату, що являє собою динамічну замкнуту багатофункціональну систему. На рис. 1 показана схема замкненої, динамічної системи верстату.

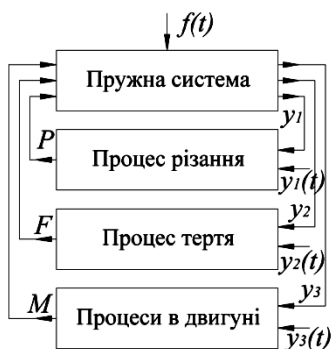


Рис. 1. Схема замкненої динамічної системи верстату

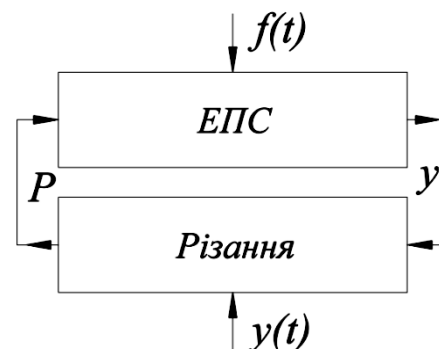


Рис. 2. Одноконтурна замкнута динамічна система: P – сила різання; y – вихідна координата (деформація верстату); $f(t)$ – силове і кінематичне збурення; $y(t)$ – зміна налаштування, зумовлена змінною перерізу зрізу

Постановка питання. Процеси, що проходять під час виконання технологічної операції шліфування (різання, тертя, процеси в електродвигуні), пов'язані безпосередньо з пружною системою і зміна будь-якого з них у вигляді зовнішнього впливу чи зміна налаштування супроводжується реакцією пружної системи, що проявляється у зміні її вихідної координати. Це в свою чергу призводить до зміни параметру відповідного процесу замкненої динамічної системи, тобто динамічна система верстату є багатоконтурною з автоматичним регулюванням [1, 2]. Наприклад, зі збільшенням припуску, що знімається, зростають сили різання, що є вихідною координатою процесу, яка призведе до зміни вихідної координати, зменшення величини припуску. Суттєвий вплив на амплітудно-частотні характеристики пружної системи мають характеристики пружних зв'язків. У зв'язку з тим, що всі процеси верстату (різання, тертя, процеси у двигуні) замикаються через пружну систему, можливо виділити кожен контур і розглядати його окремо.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологічному процесу шліфування поверхонь роликотідшипників присвячені праці [4, 8, 9], де займалися проблемами підвищення продуктивності та забезпечення якості роликів підшипників на операціях безцентрового шліфування. Але є нерозв'язаною проблема стабілізації теплового потоку та теплонапруженості поверхневого шару оброблюваних поверхонь внаслідок безперервності процесу шліфування.

Аналіз літературних джерел дозволив встановити, що однією з основних причин утворення хвилястості на оброблюваній поверхні, є вібрації в системі ВІД. В результаті досліджень, що проводилися проф. Масловим Е.В., Прилуцьким В.А., Горбуновим Б.І. та Гусєвим В.Г., проф. Колевим К.С., Ляндоню Ю.Н., та іншими авторами, встановлено, що траєкторією руху шліфувального круга є складна замкнута циклоїдальна чи квазіциклоїдальна крива. Отже для визначення профілю поверхні (хвилястості), її геометричних параметрів, що формуються в процесі врізного безцентрового шліфування, необхідно вирішувати наступні задачі:

- визначити траєкторію руху точок шліфувального круга (центра мас та периферії) та його взаємодію з оброблюваною поверхнею;
- побудувати математичну модель, що пов'яже динамічні параметри процесу з геометричними параметрами хвилястості.

Аналіз виробничих дефектів [3] показав, що причинами виникнення похибок форми під час безцентрового шліфування роликів є вібрації елементів технологічної системи ВПІД, що виникають під час шліфування. Попередні дослідження [10, 11, 12] показали, що рівень вібрації і шуму роликотідшипників знижується з покращенням (до певної межі) шорсткості.

Виклад основного матеріалу. Під час визначення динамічної характеристики процесу різання розглядається взаємодія еквівалентної пружної системи (ЕПС) верстату з процесом різання (рис. 2) [7]. Розмах вібрації в цій системі залежить від збурюючих сил, що накладаються на систему $f(t)$ і від зміни налаштування – $y(t)$. Обидва види сил сприяють виникненню в процесі шліфування складних вимушених коливань в системі ВПІД. В результаті з'являється хвилястість

на робочій поверхні шліфувального круга і на оброблюваній деталі, що призводить до виникнення в динамічній системі верстату зворотних зв'язків, що суттєво впливають на її стійкість. Для ідеальної одноконтурної системи верстату без врахування зворотних зв'язків, зображеної на рис. 2, при впливі на ЕПС $f(t)$ передаточна функція W_f замкнутої системи визначається за формулою [7]:

$$W_f = \frac{y}{f(t)} = \frac{W_{fЕПС}}{1 + W_{роз}}, \quad (1)$$

а при впливі $y(t)$:

$$W_y = \frac{y}{y(t)} = \frac{W_{fЕПС}}{1 + W_{роз}} \quad (2)$$

де y – вихідна координата (деформація верстату); $W_{fЕПС}$ – передаточна функція, що отримується в результаті зміщення інструменту і деталі за вихідною координатою при дії заданого зовнішнього збурення; $W_{роз}$ – передаточна функція розімкнутої системи, яка рівна $W_{ЕПС} \cdot W_p$ ($W_{ЕПС}$ – передаточна функція ЕПС, W_p – передаточна функція процесу різання).

В роботі [7] зазначено, що фактори запізнення в динамічній системі, викликані хвилястістю круга і деталі, які створюють зворотній зв'язок з відповідною передаточною функцією, значно ускладнюють рівняння передаточних функцій 1 і 2. Стійкість одноконтурної динамічної системи оцінюється за передаточною функцією розімкнутої динамічної системи (рис. 3).

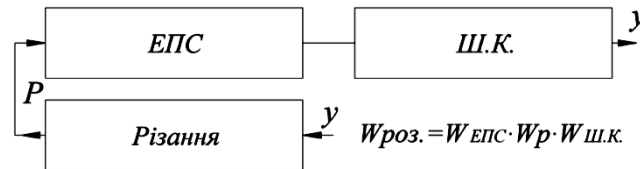


Рис. 3. Одноконтурна розімкнута динамічна система

Відмінною особливістю процесу шліфування є те, що зв'язком між ЕПС і процесом різання в динамічній системі шліфувального верстату є шліфувальний круг. В залежності від того, яку передаточну функцію він має ($W_{ш.к.}$), збурення, що виникають в процесі різання будуть передаватись на ЕПС з деяким запізненням і зміною за амплітудою, що може відобразитись на характері вібрації під час шліфування і на формуванні профілю поверхні деталі. Значення передаточної функції розімкнутої системи в даному випадку зміниться і опишеться формулою:

$$W_{роз} = W_{ЕПС} \cdot W_p \cdot W_{ш.к.} \quad (3)$$

Це може змінити зони роботи пружної системи верстату (3). Визначення динамічної характеристики шліфувального круга (передаточної функції) є важливим під час шліфування кругами з переривчастою робочою поверхнею, що є джерелом вимушених коливань.

В результаті оброблення осцилограм, записаних при динамічній характеристиці шліфувального круга, не було помічено зміни фаз між сигналами, що були зняті з периферії круга [9]. Відношення амплітуд відповідних сигналів прирівнювалось одиниці технологічної системи $W_{ш.к.}=1$. Це додатково показує, що зерна в шліфувального круга на керамічній зв'язці, які мають високий модуль пружності ($E=429 \text{ Н/м}^2$) контактують. Під час розрахунку передаточної функції замкнутої динамічної системи і аналізі її стійкості, можна знехтувати введенням в контур передаточної функції марки шліфувальних кругів, що досліджується.

Це твердження діє лише на випадок роботи кругами досліджуваної характеристики (14A8ПСМ7В). Але на практиці відомі круги на бакелітових, вулканітових, гліфталінових та інших зв'язках, що містять гуму, і тих, що мають значну піддатливість і підвищені демпфуючі характеристики. При роботі з вказаним типом кругів, аналізуючи стійкість динамічної системи відповідного шліфувального верстату, варто враховувати передаточну функцію відповідного шліфувального круга, що визначається експериментально.

Проведений аналіз показав, що при виборі розрахункової схеми пружної системи безцентрового шліфувального верстату можна знехтувати розгляд шліфувального круга як пружної ланки, що передає силу різання.

Для розроблення загальних рекомендацій з оптимізації геометричних параметрів переривчастих кругів запропоновано узагальнений показник процесу шліфування – K , що імітує дію вертикальної складової сили різання на пружну систему. Цей показник визначається

режимами шліфування, станом робочої поверхні шліфувального круга, оброблюваністю шліфувального матеріалу і умовами взаємодії круга і деталі.

Під час розгляду стану рівноваги пружної системи в період контакту шліфувального круга з оброблюваною деталлю показник K вводиться в розрахункову схему як пружний відновлювальний елемент жорсткості. Таким чином, фізичним значенням введеного показника є сила різання, що приходить на одиницю глибини входження шліфувального круга в матеріал. При цьому враховувалась лінійна залежність сили різання від глибини шліфування (рис. 4, пряма 2), допустимість якої зумовлена відомими дослідженнями [1, 2] по вимірюванні сил різання під час шліфування.

Розглянемо пружну систему безцентрового шліфувального верстату, маса якої m_{np} знаходиться під дією двох пружних відновлюваних елементів жорсткості C і K (рис. 4). Жорсткість C характеризує властивості пружної системи верстату в розімкненому стані і визначається конструкцією, а також умовами спряження її елементів один з одним. В розімкненому стані, при відсутності процесу шліфування, переміщення пружної системи в залежності від прикладеної сили $q=f(P)$ зображується прямою 1 (рис. 4), при лінійній характеристиці жорсткості. Жорсткість пружної системи шліфувального верстату є основним показником, що визначається піддатливістю пружної системи верстату, що викликана силою різання, і характеризує точність оброблення в процесі круглого шліфування.

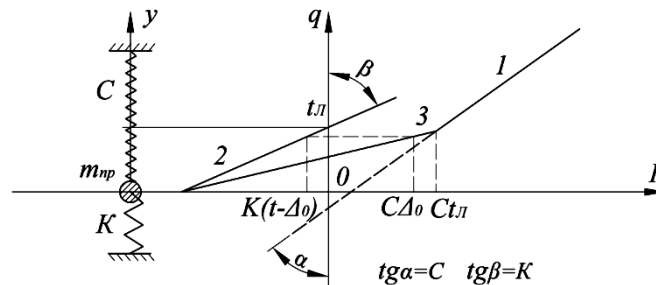


Рис. 4. Статичні характеристики пружної системи під час переривчастого шліфування

Встановимо зв'язок узагальненого показника з основними параметрами процесу шліфування і жорсткістю пружної системи верстату. Під час шліфування пружна система верстату замикається через процес різання [1], жорсткість її зростає і залежність сили різання від координат q характеризується прямою 3 (рис. 4).

Умова статичної рівноваги маси в процесі суцільного шліфування буде визначатись рівністю:

$$C\Delta_0 = K \cdot (t_L - \Delta_0), \quad (4)$$

де Δ_0 – статичне відтиснення пружної системи при суцільному шліфуванні; t_L – глибина різання, що встановлюється за лімбом верстату.

Величина $\Delta_0 = \frac{K}{C+K} \cdot t_L$ характеризує похибку оброблення під час шліфування. При наступному проході вона буде вихідною глибиною шліфування, встановленою за лімбом верстату, і похибка після цього наступного проходу визначається за формулою:

$$\Delta_0 = \left(\frac{K}{C+K} \right)^i \cdot t_L, \quad (5)$$

де i – число переходів.

Аналіз (5) показує, що жорсткість пружної системи шліфувального верстату є основним параметром, що характеризує точність оброблення в процесі круглого шліфування. Чим більше C , тим менше Δ_0 . При $C \gg K$ похибка процесу шліфування прямує до нуля.

Знайдемо з формули (4) значення реального зняття під час шліфування – t_i :

$$t_i = t_L - \Delta_0 = t_L \cdot \left(1 - \frac{K}{C+K} \right), \quad (6)$$

яке на наступних проходах розраховується за формулою:

$$t_{ii} = \left(\frac{K}{C+K} \right)^{i-1} \cdot \left(1 - \frac{K}{C+K} \right) \cdot t_{\text{Л}} \quad (7)$$

З формули (6) узагальнений показник шліфування може бути знайдений за формулою:

$$K = C \cdot \left(\frac{t_{\text{Л}}}{t_i} - 1 \right). \quad (8)$$

Вертикальна складова сили різання P_y розраховується за формулою:

$$P_y = K \cdot \frac{C}{C+K} \cdot t_{\text{Л}}. \quad (9)$$

Знаючи жорсткість пружної системи верстату і визначивши експериментально відношення $t_{\text{Л}}/t_i$ для кожного конкретного випадку шліфування, розрахунковим шляхом, з формули (8) можна знайти значення узагальненого показника шліфування.

Підставивши (8) в (9), отримаємо рівняння для визначення вертикальної складової сили різання P_y :

$$P_y = C \cdot (t_{\text{Л}} - t_i), \quad (10)$$

що має важливе практичне значення, оскільки воно дозволяє при відомій статичній жорсткості пружної системи в вертикальній площині – C розрахувати силу різання P_y , провівши два вимірювання шліфувальної деталі: до (H_1) і після (H_2) шліфування.

При відомій глибині шліфування, встановленій за лімбом верстату ($t_{\text{Л}}$), визначивши $t_i = H_1 - H_2$ за формулою (10), можна розрахувати вертикальну складову сили різання P_y . Даний спосіб розрахунку не потребує застосування приладів, призначених для вимірювання сили різання, чи характеристик, через які вона може бути розрахована (крутний момент, потужність шліфування, амплітуди статичного відтиснення пружної системи тощо).

При дослідженні процесу переривчастого шліфування необхідно проводити визначення узагальненого показника K під час шліфування одного і того ж матеріалу в залежності від різних геометричних параметрів переривчастого круга. Це пов'язано з тим, що відношення $t_{\text{Л}}/t_i$ буде змінюватись в залежності від рівня коливань пружної системи, зумовлених різними геометричними параметрами переривчастого круга.

Формула (8) дає уявлення про зміну умов взаємодії переривчастого шліфувального круга з оброблюваною деталлю, що показано в зменшенні відношення $t_{\text{Л}}/t_i$ за рахунок коливань пружної системи. Це призводить до зниження узагальненого показника шліфування при одночасному підвищенні виробничого процесу.

На рис. 5 показана залежність показника K від швидкості повздовжніх переміщень у верстаті, що отримана експериментально під час шліфування зразку зі сталі ШХ15, гартованої до HRC 61-63 за один прохід. Значення K_{20}/C , відкладені на графіку, відповідають шліфуванню з повздовжньою подачею $S=20$ мм/хід, розраховані за формулою (8). Характер зміни кривої ($K_{20}/C = f(V)$) можна пояснити наступним чином.

З підвищенням швидкості переміщення деталі зростає сила різання P_y , і статичне відтиснення пружної системи, наслідком якого є зростання відношення $t_{\text{Л}}/t_i$ і різке збільшення коефіцієнта K_{20}/C . Починаючи зі швидкості 45 м/с. круг починає працювати в режимі інтенсивного самозаточування, що знижує сили різання і збільшує зняття матеріалу. При цьому спостерігається наступне монотонне зростання показника шліфування, що зумовлено можливостями розміщення зрізаної стружки в міжзерновому просторі на поверхні круга.

Прийнявши лінійну залежність узагальненого показника K від повздовжньої подачі під час шліфування, значення K_S можна знайти за формулою:

$$K_S = K_{20} \cdot \frac{S}{20}, \quad (11)$$

де K_{20} – узагальнений показник різання при шліфуванні з повздовжньою подачею 20 мм/хід; K_S – узагальнений показник різання при довільних режимах шліфування; S – повздовжня подача, мм.

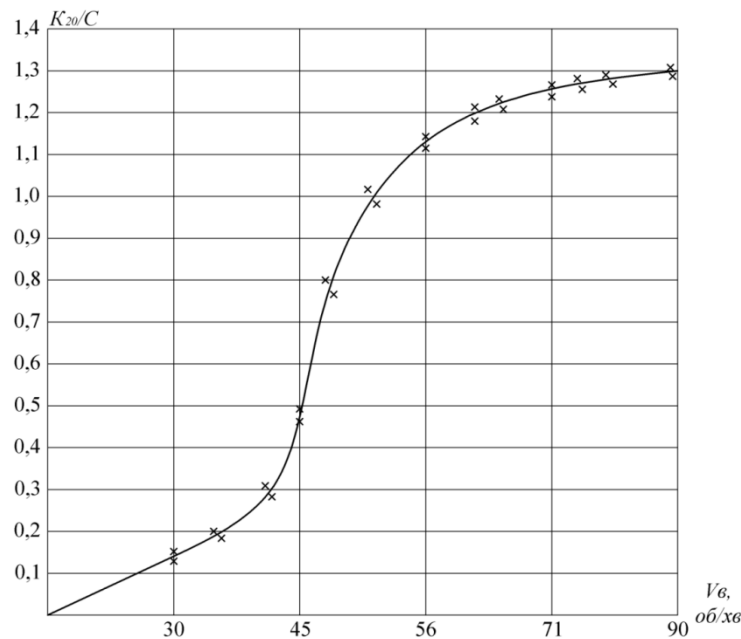


Рис. 5. Залежність коефіцієнта K_{20}/C від швидкості переміщення (матеріал – ШХ15, HRC 61-63, $S = 20$ мм/хід), $C = 1,08 \cdot 10^5$ Н/м. $V_{кр} = 45$ м/с., $K_S = K_{20} \cdot S/20$

Проведенні дослідження показали, що при різних поєднаннях фіксованих значень повздовжньої подачі – S і швидкості V_b показник K , що визначається відношенням $t_{\text{л}}/t_i$, не залежить від глибини шліфування t . Це положення підтверджує лінійність залежності $t_i=f(t_{\text{л}})$, що побудована на основі експериментальних даних для одного з можливих поєднань ширини шліфування і швидкості переміщення (рис. 6). Лінійність даної залежності зберігається при нормальних умовах шліфування, що застосовуються на практиці, під якими розуміється розміщення зрізаної стружки в міжзерновому просторі на поверхні шліфувального круга.

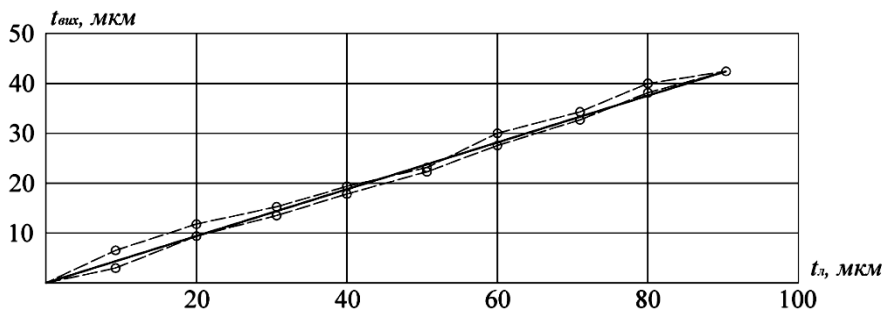


Рис. 6. Залежність дійсного зняття ($t_{\text{дій}}$) від глибини шліфування ($t_{\text{л}}$). Матеріал – сталь ШХ15, HRC 61-63, $V_b = 45$ об/хв; $S = 20$ мм/хід. Верстат SWaAKM 25/1A

За графіком (рис. 5) і формулою (11) визначається значення узагальненого показника для конкретних режимів шліфування. Варто зазначити, що показник K може бути кількісною характеристикою ефективності процесу переривчастого шліфування по відношенню до суцільного шліфування при тих же режимах. Розрахунок під час переривчастого шліфування буде проводитись за формулою, аналогічною (8):

$$K_{\text{еф}} = C \cdot \left(\frac{t_{\text{л}}}{t_{\text{еф}}} - 1 \right), \quad (12)$$

де $K_{\text{еф}}$ – узагальнений показник шліфування при переривчастому шліфуванні; $t_{\text{еф}}$ – дійсна глибина різання при переривчастому шліфуванні.

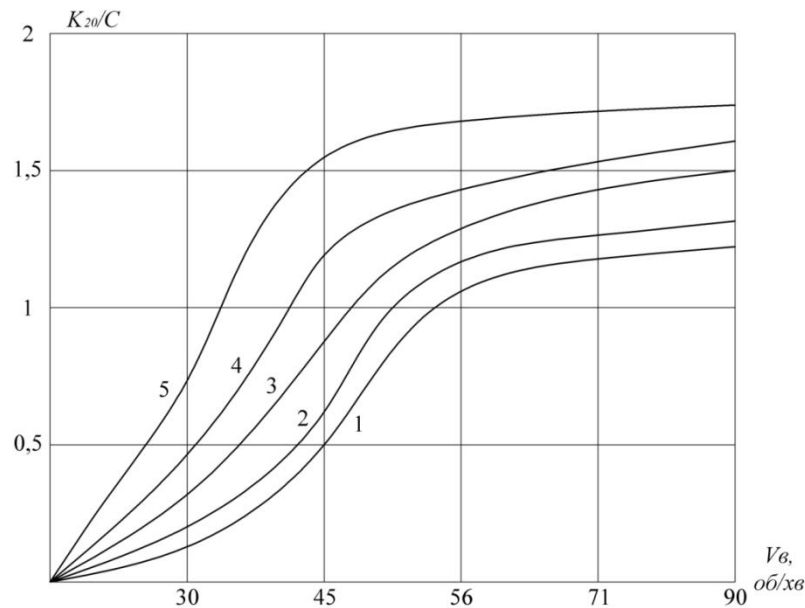


Рис. 7. Залежність коефіцієнта $K_{20/C}$ від швидкості переміщення (матеріал – сталь ШХ15, HRC 61-63, $S = 20$ мм/хід). $C = 1,08 \cdot 10^5$ Н/м.

1 – $T = 10$ с, 2 – $T = 15$ с, 3 – $T = 30$ с, 4 – $T = 45$ с, 5 – $T = 60$ с

Введений узагальнений показник шліфування K можна використовувати для оцінки роботоздатності абразивного інструменту, на рівні з такими показниками, як [11]:

$$p = \frac{Q_M}{Q_d} \text{ чи } g = \frac{Q_d}{Q_M}; P = C \cdot \frac{Q_M^2}{Q_d}; G = \frac{P}{N_{num} \cdot R_a}; M = \frac{Pz_{num}}{g}; N = \frac{Q_M}{P_y},$$

де Q_M , Q_d – об'єм знятого металу і зношеної частини абразиву за одиницю часу; C – жорсткість системи; N_{num} – питома витрата енергії; R_a – висота шорсткості; Pz_{num} – питома тангенціальна сила.

Недоліком перерахованих показників оцінки роботоздатності шліфувальних кругів є необхідність визначення їх для різних можливих поєднань режимів шліфування і складність вимірювань величин, по яким вони розраховуються. Встановлений зв'язок введеного показника K з режимами шліфування дозволяє розраховувати його значення для різних поєднань режимів шліфування. Експериментальне визначення K складається у вимірюванні дійсного зняття матеріалу деталі. Залежність показника K від часу шліфування показана на рис. 7.

Висновки. Під час проектування операцій безцентрового переривчастого шліфування поверхонь обертання деталей роликотідшипників виникає необхідність виявлення власних частот коливання елементів технологічної системи шліфування. Для отримання загальних рекомендацій з оптимізації геометричних параметрів переривчастих кругів запропоновано узагальнений показник шліфування K , що визначається режимами шліфування, відношенням робочої поверхні шліфувального круга, оброблюваністю матеріалу і умовами роботи системи круг – деталь, які можуть бути використані для визначення роботоздатності абразивного інструменту.

1. Горбунов Б.И. Уравновешивающие устройства шлифовальных станков / Б.И. Горбунов, В.Г. Гусев. – М.: Машиностроение, 1976. – 167с.
2. Данильченко Ю.М. Повышение точности вращения высокоскоростных шпиндельных узлов на подшипниках качения / Ю.М. Данильченко, А.М. Фигатнер, В.Б. Бальмонт, С.Е. Бондарь. // Станки и инструмент. – 1987. – №7. – С. 16–18.
3. Денисюк В.Ю. Аналіз виробничих дефектів поверхонь обертання кілець роликотідшипників / Денисюк В.Ю., Заблоцький В.Ю., Марчук В.І., // Наукові нотатки: Міжвуз. зб. Луцького національного технічного університету (за напрямком "Інженерна механіка"). Вип. 24. – Луцьк: Луцький НТУ, 2009. – С. 183–192.
4. Денисюк В.Ю. Технологічне забезпечення якісних параметрів робочих поверхонь роликотідшипників переривчастим шліфуванням / Денисюк В.Ю., Лук'янчук Ю.А., Михалевич В.Т., Кайдик О.Л.// Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний збірник наукових праць. Вип. 1(47). – Донецьк: Донецький НТУ, 2014. – С. 112–117.
5. Ильницкий И.И. Колебания в металлорежущих станках и пути их устранения / И.И. Ильницкий. – Москва – Свердловск: Машгиз, 1958. – 142 с.
6. Кедров С.С. Колебания металлорежущих станков / С.С. Кедров. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.

7. Кудинов В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. – М.: Машиностроение, 1967. – 359 с.
8. Лук'янчук Ю.А. Застосування переривчастих шліфувальних кругів на операціях безцентрового шліфування робочих поверхонь роликів підшипників / Лук'янчук Ю.А., Денисюк В.Ю., Михалевич В.Т. // Вісник Хмельницького технічного університету: науковий журнал. Серія: технічні науки. №2(211). 2014. – Хмельницький: Вид-во Хмельницького НУ, 2014. – С. 12–16.
9. Марчук В.І. Технологічні особливості взаємодії одиничного зерна абразиву з оброблюваною поверхнею в процесі безцентрового шліфування кілець роликів підшипників / Марчук В.І., Денисюк В.Ю. // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-технич. конфер. – Вып. 69. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2005. – С. 161–176.
10. Новоселов Ю.К. Динамика формообразования поверхностей при шлифовании. / Ю.К. Новоселов. – Саратов: Изд-во ун-та, 1979. – 231 с.
11. Якимов А.В. Оптимизация процесса шлифования / Якимов А.В. – М.: Машиностроение, 1975. – 172 с.
12. Якимов А.А. Основы теории обеспечения и стабилизации качества поверхностного слоя при прерывистом шлифовании зубчатых колес / Якимов А.А. – Одесса: ОГПУ, 1997. – 212 с.

Стаття надійшла до редакції 12.05.2015.