3. Шелестовская С. А., Бондаренко М. А., Котляр А. В. и др. // Сборник докладов IX Международной конференции «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», 2010. – С. 156 – 162.
4. Усеинов С. С. Соловьев В. В. Гоголинский К. В. и др. // Нанотехника. Инженерный журнал. – 2008. – №1. – С. 111 – 115.
5. Соколов Г. Н., Зорин И. В., Литвиненко-Арьков В. Б. // Сварка и диагностика. – 2012. – № 2. – С. 34 – 39.

Надійшла до редакції
17 вересня 2013 року

© Білокінь С. О., 2013

УДК 620.179.14(088.8)

АНАЛІТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕАЛІЗАЦІЇ УЯВНИХ ФУНКЦІЙ ДЛЯ КООРДИНАТНИХ СИСТЕМ РУХУ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ. ЧАСТИНА 2

[1)]Скицюк В.І., [2)]Вайнтрауб М.А.
[1)]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,
[2)]Інститут професійно-технічної освіти НАПН України, м. Київ, Україна

У попередній частині статті [1] було доведено вплив аргументу на коефіцієнт k функції y = kx та показано на конкретному прикладі, до чого це призводить у технологічних процесах. Наразі пропонується подальше застосування цієї методики на прикладі зносу інструмента під час процесу металообробки.

Для кращого уявлення проблеми як приклад обрано чотири типові ситуації зносу різального інструмента у процесі металообробки та приведено основні фізико-математичні залежності розвитку цих процесів. Показано, яким чином реалізуються функції, означені у попередній статті [1]. Аналітично доведено зону реалізації можливого зносу різального інструмента.

Ключові слова: *уявна координата, реальна координата, деструкція.*

Вступ

Загальна методика визначення стану різального інструмента (РІ) у процесі технологічної обробки деталей у приладобудуванні полягає у тому, що є необхідність попереднього створення аналітичних моделей стану процесу металообробки під час виготовлення надточних деталей на верстатах із числовим програмним керуванням (ЧПК). Як наслідок, необхідно розглянути теоретичне підґрунтя технічних і фізичних характеристик технологічного обладнання для виготовлення деталей наноприладів. Подібні дослідження можливі на підставі реалізації дослідів щодо аналізу фізичних процесів у технологічній зоні.

Такому аналітичному дослідженню підлягають наступні чинники технологічного процесу: знос різальних інструментів; кінематичні параметри системи РІ; зв'язок роботи головного рушія та колової частоти обертання деталі під час обробки. Оскільки у попередній частині статті [1] розглядалися деструктивні явища, які відбуваються у системі координат верстатів із ЧПК, а саме: розходження між уявною та реальною системою координат, то необхідно дослідити

наступний чинник впливу на точність виготовлення деталей приладів. Отже, таким чинником є розмірний знос РІ, який є найбільш впливовим на точність виготовлення деталі. Попри усі існуючі дослідження [ ] і досі остаточно не вирішена проблема прогнозування процесу розвитку зносу РІ. Тому метою роботи є новий аналітичний підхід до розгляду уявних просторово-часових функцій руйнування РІ як одного з елементів технологічного процесу.

Постановка задачі

У сучасній металообробці зберігся типовий підхід до зносу інструмента, вироблений за останнє століття [2]. Сутність цього підходу полягає у типових методиках, які і досі широко застосовуються [3, 4]. У засадах усіх цих досліджень покладено пошук залежності для визначення початку моменту критичного зносу РІ, оскільки це є одне з найбільших дошкульних питань металообробки. Наразі визнається існування теплового та механічного зносу РІ. Проте їх взаємна комбінація утворює чотири типові характеристики зносу інструмента, якими і досі користуються. Як було показано [5], існує кілька типів зносу РІ.

Тепловий знос РІ виникає внаслідок високих температур на поверхні різального леза РІ у зоні контакту стружки та різальної частини РІ. Цей тип зносу є характерним при обробці сталі з високими швидкостями різання, особливо, якщо матеріал РІ є чутливим до високих температур, наприклад, швидкорізальні сталі, особливо леговані інструментальні сталі. Механічний знос виникає зазвичай при обробці чавуну, а також при обдирці шару поверхні після лиття, наприклад при фрезеруванні, при переривчастому різанні тощо, якщо температура різальних частин РІ нижче ніж при безперервному точінні. Як відомо, знос виникає на передній та на задній поверхні РІ: на передній поверхні виникає канавка або «ямка», яка розташована вздовж головної різальної кромки. При зносі на задній поверхні утворюється стерта площина або «фаска зносу», що розташована під головним різальним окрайцем, а також частково під допоміжною. Все вищеозначене призводить до того, що реальний знос РІ необхідно розглянути у зв'язку з достеменними функціями залежності від часу обробки з метою передбачення процесу. Створення таких функцій потребує розгляду відповідних критеріїв визначення ознак, за якими є можливість відтворити функцію у повному обсязі (початкових умов). Відома [4] низка критеріїв затуплення РІ, наприклад критерій Тейлора, обумовлений як критерій повної руйнації леза РІ, який можна застосовувати лише при чорновому точінні сталей, а при чистовому точінні сталі він не може застосовуватися. Але загальним недоліком цих критеріїв є відсутність кількісних даних відносно ступеню зносу робочих поверхонь РІ.

Тому необхідно розглянути узагальнені принципи розвитку процесу зносу РІ стосовно тез, які наведені у частині 1 авторської роботи [1].

Лінійні величини зносу на передній та задній поверхнях РІ у період роботи зазвичай визначаються залежністю стійкості РІ (рис.1) від параметрів часу та уявної відстані, яку проходить РІ під час процесу обробки. Наразі такі залежності отримуються у два основних способи, тобто або плинно під час процесу об-

робки, або детерміновано. Надалі методика оцінювання зносу передбачає певну лінеаризацію процесу з метою отримання більш менш статичних залежностей типу $y = kx$. Наслідком такої методики є утворення чотирьох типових характеристик зносу РІ, які мають емпіричні аналітичні залежності, які є наслідком фізико-механічних процесів тертя РІ у зоні різання. З іншого боку, випадки тертя (зносу) згідно класичної фізики повинні підкорятися тій самій залежності. Але на практиці, тобто за реальними координатами, відбувається дещо інший процес. Розглянемо цю ситуацію на типових характеристиках зносу інструмента (рис. 2, 3, 4, 5).

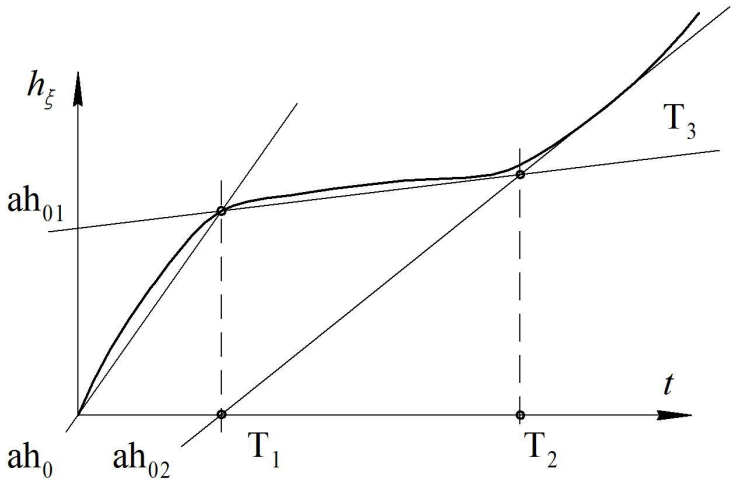

Рис. 1. Узагальнена залежність зносу різального інструмента від часу роботи, де T_1 – час, необхідний для приробки; T_2 – час нормального технологічного процесу; T_3 – час початку руйнування інструмента

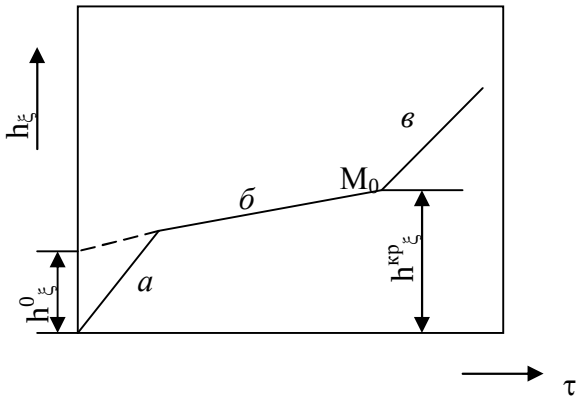

Рис. 2. Перша закономірність зносу РІ [5], де *а* – початковий знос; *б* – нормальний знос; *в* – руйнівний знос; $h^{кр}_{\xi}$ - критичний знос

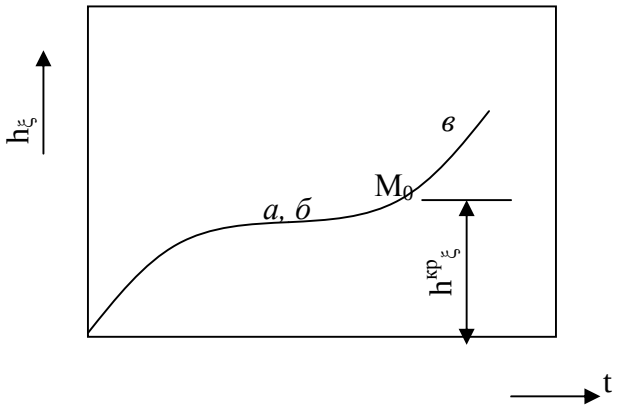

Рис. 3. Другий тип закономірності зносу різального інструмента [5]

Уявимо лінійну величину зносу як h_ξ (рис. 2). Знос, що відповідає крапці M_o, може бути кваліфікованим як критичний знос $h^{кр}_{\xi}$. Для ділянки «*б*» графіка залежність зносу має вигляд рівняння прямої, тобто

$$h_\xi = h_\xi^0 + u \cdot \tau,$$

де h_ξ^0 – відрізок, що відсікає пряму, і відповідає початковому зносу; τ - тривалість роботи РІ від початку роботи до моменту виміру зносу.

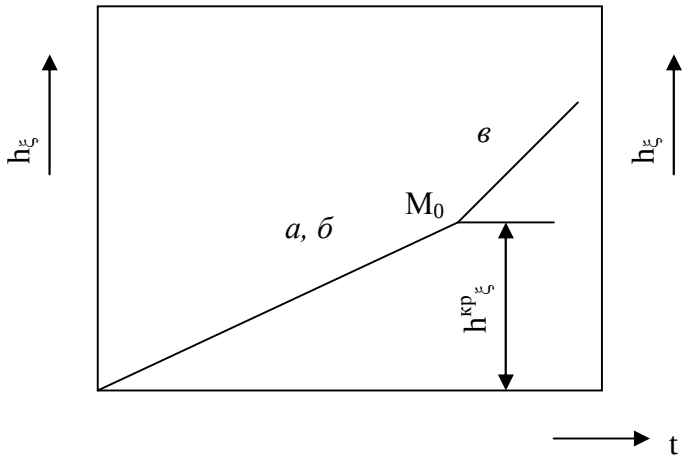

Рис. 4. Третій тип закономірності зносу різального інструмента [5]

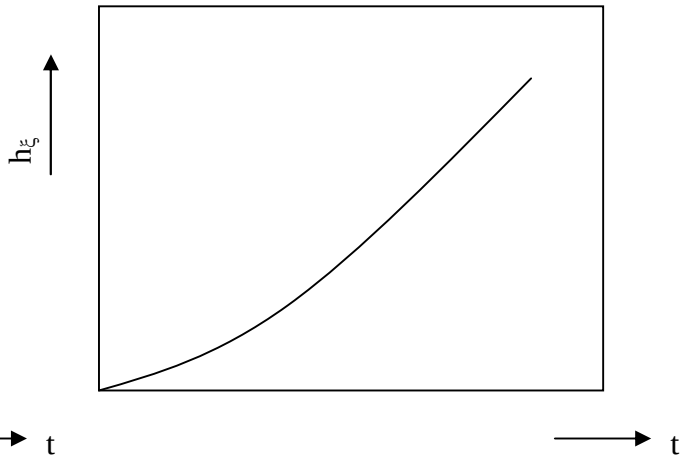

Рис. 5. Четвертий тип закономірності зносу різального інструмента [5]

Отже, цей вираз за своєю основою підкорюється залежності $y = kx + b$. Аналогічно інші частини цієї залежності теж реалізуються як вище наведена функція, що підтверджує тезу, висунуту в частині 1 [1].

Наразі це підтверджує ситуація щодо швидкості нормального зносу РІ, яка у цьому випадку набуває вигляду:

$$\frac{dh_\xi}{dt} = u = const.$$

Іноді процес обробки є схожим до попереднього (рис. 2), що показано [5] відсутністю різко позначеної межі між ділянками «*а*» та «*б*» на графіку (рис. 3). Апроксімація такої залежності зносу від впливу теплових чинників є:

$$h_\xi = C_h \cdot \tau^x, \text{ де } x \le 1.$$

де x – показник впливу теплового чинника на знос інструмента; C_h – коефіцієнт зносу, залежний від температури у зоні обробки; τ - тривалість роботи РІ від початку роботи до моменту виміру зносу.

Водночас, спостерігається уповільнення процесу зношування РІ, який при переході від початкового зносу до нормального набуває плинного характеру. На ділянках «*а*» та «*б*» (рис. 3) швидкість зносу поступово стабілізується, тобто

$$\frac{dh_\xi}{dt} = u = C_h \cdot x\tau^{x-1} = \frac{C_h \cdot x}{\tau^{1-x}}.$$

Стосовно першого та другого типу закономірностей зносу РІ необхідно зауважити, що існує ще один підхід, схожий на попередні. У цьому випадку [5] знос за розміром розглядається не як функція від часу різання, а як функція, що

залежна від подовженості шляху різання. Графік цієї функції за формою не відрізняється від зображених на рис. 2 та рис. 3, а відповідний розмірний знос у цьому випадку визначається як

$$h_\xi = \frac{W_3 \cdot tgC \cdot l_p}{1 - tg\alpha \cdot tgC \cdot l_p},$$

де W_3 – ширина фаски зносу по задній поверхні РІ; C – задній кут; α - передній кут; l_p – номінальна довжина треку різання.

Існує ще і третій тип закономірності, котрий характеризується лінійним зростанням зносу та постійною швидкістю на ділянках «*а*» та «*б*» до точки M_o (рис. 4) [5]. При цьому залежність зносу в цьому випадку набуває вигляду

$$h_\xi = C_h \cdot t; \quad u = C_h = const.$$

На відміну від усіх попередніх графік четвертого типу (рис. 5) зносу РІ не містить чітко визначеної ділянки «критичного зносу», оскільки має опис за степеневою функцією

$$h_\xi = C_h \cdot t^x; \quad u = C_h x t^{x-1}.$$

Величина показника x характеризує ступінь впливу теплового чинника на знос РІ, тобто чим більше вплив, тим більше x. Тип № 4 є визначеним при дуже великих температурних навантаженнях, високих швидкостях різання, великих подач, безперервному різанні без охолодження, тобто за надто важкі умови різання.

Основні засади та тенденції вирішення задачі

Попередній розгляд експериментальних результатів зносу РІ доводить, що існує стала тенденція до реалізації уявної функції $y = kx$. Особливістю цих досліджень є у тому, що всі характеристики, хоч і отримувалися за різними методами, тим не менш підтверджують основну тенденцію розвитку зносу РІ. Для того, щоб це явище більш конкретизувати введемо коефіцієнт нормалізації, який буде пов'язувати в одне ціле усі вищезгадані випадки зносу РІ, тобто $q(p)$. Використовуючи цей коефіцієнт нормалізації, маємо можливість звести усі дослідні результати до одного уявного вигляду (рис. 6).

У першому випадку характеристика А (рис. 6) була отримана у детермінованій спосіб, тобто кожна крапка з такого графіку є середнє статистичне значення функції зносу h_ξ. Знос, що відповідає крапці M_o на графіку може бути кваліфікованим як критичний знос $h^{кр}_\xi$. Для ділянки «*б*» графіка залежність зносу має вигляд рівняння прямої, тобто

$$h_\xi = q(p)(h^o_\xi + u\tau), \qquad (1)$$

де h^o_ξ – відрізок, що відсікає пряму, і відповідає початковому зносу; τ - тривалість роботи РІ від початку роботи до моменту виміру зносу.

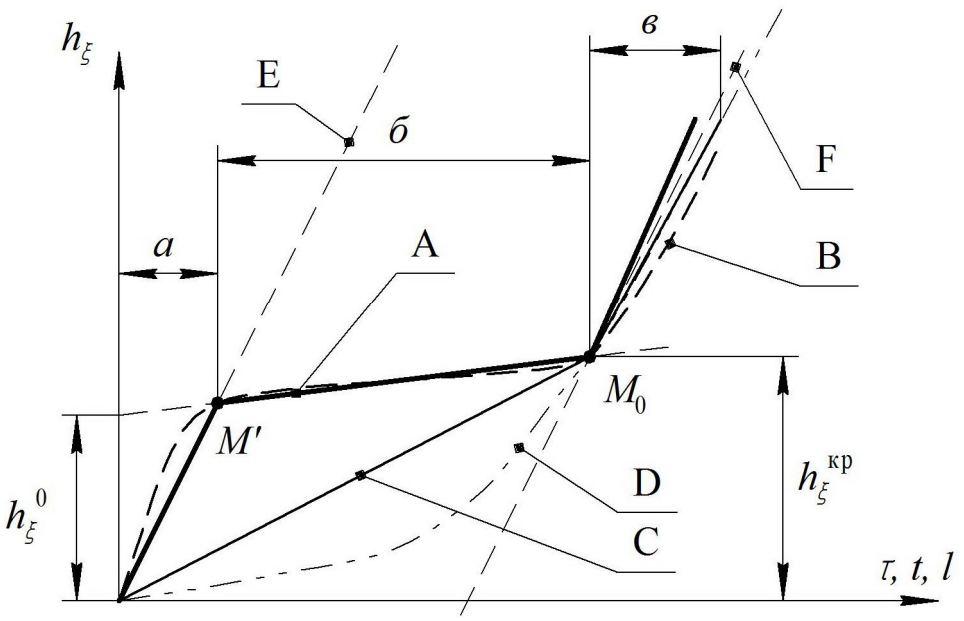

Рис. 6. Закономірності зносу різального інструмента, де: а – швидкий початковий знос; б – значно повільніший "нормальний знос"; в – швидкий "руйнівний" знос; $h_\xi^{кр}$ – критичний знос інструмента

Швидкість нормального зносу РІ у цьому випадку набуває виразу:

$$\frac{dh_\xi}{dt} = q(p)u = const. \qquad (2)$$

Тобто, залежність ділянки «*а*» можна позначити через вираз

$$h_\xi = q(p)u\tau, \qquad (3)$$

що надає уявлення про загальний розвиток ситуації.

Наступний тип характеристики В (рис 6), який отримується в наслідок довгоперіодичних інтервалів вимірювання. Така методика використовується, коли процес обробки протікає таким чином, що знос РІ має плинну форму, коли на графіку відсутня чітко визначена межа між ділянками «*а*», «*б*» та «*в*» для якого залежність зносу можна визначити як:

$$h_\xi = q(p)C_h \cdot \tau^x, \text{ де } x \le 1. \qquad (4)$$

де x – показник впливу теплового чинника на знос інструмента; C_h – коефіцієнт зносу; τ - тривалість роботи РІ від початку роботи до моменту виміру зносу.

При цьому немає різкого уповільнення зносу РІ при переході від початкового зносу до нормального.

Швидкість зносу поступово безперервно зменшується на ділянках «*а*» та «*б*», тобто

$$\frac{dh_\xi}{dt} = q(p)u = q(p)C_h \cdot x\tau^{x-1} = q(p)\frac{C_h \cdot x}{\tau^{x-1}}. \qquad (5)$$

Стосовно першого та другого типу закономірностей зносу РІ необхідно зауважити, що існує ще один підхід, схожий на попередній. У цьому випадку знос за розміром розглядається не як функція від часу різання, а як функція, що залежна від подовженості шляху різання. При цьому графік функції за формою не відрізняється від зображених на рис. 6 тип А та В. Відповідний розмірний знос у цьому випадку визначається як

$$h_\xi = \frac{q(p)W_3 \cdot tgC \cdot l_p}{1 - tg\alpha \cdot tgC \cdot l_p}, \qquad (6)$$

де W_3 – ширина фаски зносу по задній поверхні РІ, C – задній кут, α - передній кут, l_p – номінальна довжина треку різання.

Третій тип закономірності (рис. 6 тип С) характеризується лінійним зростанням зносу та постійною швидкістю на ділянках «а» та «б» до точки M_0.

Залежність зносу у цьому випадку набуває вигляду

$$h_\xi = q(p)C_h \cdot t; \quad u = q(p)C_h = const. \qquad (7)$$

Графік четвертого типу (рис. 6 тип D) не містить чітко визначеної ділянки «критичного зносу».

$$h_\xi = q(p)C_h \cdot t^x; \quad u = q(p)C_h x t^{x-1}. \qquad (8)$$

Величина показника x характеризує ступінь впливу теплового чинника на знос РІ, тобто чим більше вплив, тим більше x. Якщо превалює адгезійний знос РІ, мають місце типи графіка А (для чорнової обробки) та В. Тип D визначає дуже навантажені температурні режими, високі швидкості різання, великі подачі, безперервне різання без охолодження, тобто важкі умови різання.

До всього вище сказаного необхідно зауважити, що незважаючи на те, що всі чотири типи характеристик мають відношення до зносу інструмента при металообробці, вони мають досить широкий спектр аналогів у різних науково-технічних галузях, тобто існує явище інваріантності фізичних законів. У такому випадку подібні залежності повторюють вище наведені графіки при застосуванні відповідних коефіцієнтів масштабування. Основною проблемою у цих ситуаціях є своєчасна реєстрація проходження критичної точки M_0, після якої починається некероване руйнування технологічного об'єкту.

Обговорення результатів

Для технологічних процесів важливими є два типи характеристик зміни параметрів ТО, які приймають участь у формуванні або роботі кінцевого виробу.

Першим варіантом характеристики, який бажано отримати, це абсолютна стабільність технологічного процесу. Отримати подібну стабільність не є реальним з цілої низки чинників. Так, наприклад, характеристики типу А та В (рис. 6) хоч і отримані у різний спосіб, але показують саме цю тенденцію боротьби за абсолютну стабільність. Якби ми мали ідеальні умови роботи інструмента (на кшталт вічного двигуна), то ділянка характеристик «*б*» співпадала б з віссю абсцис, а ділянки «*а*» та «*в*» взагалі були б відсутні. Точка M_0 посунулась би у нескінченність. При цьому уявна та реальна система координат співпадає, і де-

струкція відсутня. Але баланс у технологічній системі металообробки є повністю залежним від твердості матеріалів, які контактують. Хоч РІ і є значно твердішим за матеріал деталі, проте, він не є абсолютним, а навантаження на нього не є нормованими. Все це призводить до того, що отримуються класичні характеристики типу А або В (рис. 6). Різниця між характеристиками пояснюється способами вимірювання, як було вказано вище. Окрім того, всі характеристики отримані у детермінований спосіб і є середніми статистичними. У фундації цієї методики є рівняння $y = kx$, яке визначається за координатами дискрети, тобто ситуація перегукується з тим V підґрунтям, яке має опис у [1]. Тобто, у підсумку необхідно констатувати той факт, що ділянка «*б*» характеристики типу А лише деякою мірою наближається до горизонтальної. У широкому сенсі такі ділянки («*а*», «*б*», «*в*») є досить типовими для більшості випадків, які зустрічаються у дослідах та технологічних процесах. Особливістю цих характеристик стосовно інших науково-технічних напрямків вказує на те, що вони мають різний характер. Так, наприклад, ділянка «*а*» у металообробці має назву «зони приробки», а у радіоелектронних приладах - «виведення на режим». Ділянка «*б*» у металообробці є «зоною нормального зносу», а у радіоелектроніці - «робочого режиму». Ділянка «*в*» є фактично не досліджувана частина характеристики, оскільки всіх цікавить лише факт руйнації ТО, а не процес його розвитку. Тому, всі варіанти характеристики після крапки M_0 мають виключно емпіричний вигляд. Окрім цього виникає критична ситуація, коли координата точки M' дорівнює координаті M_0 і, як наслідок, $h_\xi^{\,0} = h_\xi^{\,\text{кр}}$. Така ситуація породжує непередбачуваність визначення критичної ситуації стосовно руйнування інструмента, яка починає залежати від вторинних чинників.

Висновки

Як наслідок, з усього вище обумовленого можемо зробити висновок, що якщо неможливо реалізувати абсолютну характеристику зносу в перший спосіб, то необхідно якимось чином підлаштуватися під існуючу проблему. Найпростішим способом тут є отримання характеристики зносу, який має суто лінійний вигляд згідно функції $y = kx$. Такому зносу відповідають характеристики типу С та D (рис. 6). До того ж характеристика типу D має ступеневу залежність (8) і при визначених значеннях x на ділянці «*б*» може мати цілком лінійний характер, який від типу С відрізняється лише ступенем паралельності. Основна перевага такого типу зносу є передбачуваність, оскільки у будь-якому випадку величині функції y буде відповідати відома величина аргументу x. Окрім того, характеристика типу С охоплює інтервал *«а»* та «*б*», тобто нібито подовжує робочий ресурс інструмента. Проте, вадою такої характеристики є непередбачуваність функціональної залежності координати точки початку руйнації M_0.

З усього вищерозглянутого можна зробити досить вагомий висновок, що всі графічні залежності можуть бути розташовані між двома прямими з функціональною залежністю

$$y = kx \quad \text{та} \quad y = kx - b.$$

Водночас, коливання функції y будуть залежні від величини зсуву b. Функцію $y = kx$ буде визначати пряма E (рис. 6), а $y = kx - b$ – пряма F (рис. 6).

Як наслідок, це є підтвердження аналітичних залежностей, які запропоновані у [1].

Література

1. Скицюк В. І. Аналітичне дослідження реалізації уявних функцій для координатних систем руху верстатного обладнання / В. І. Скицюк, М. А. Вайнтрауб // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. – 2013. – Вип. 45. – С. 136 – 141.
2. Лоладзе Т. Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. - М.: Машиностроение, 1982. –305 с.
3. Диагностика процесса металлобработки / В. А.Остафьев, В. С.Антонюк, Г. С. Тимчик. – К.: Тэхника, 1991. – С.70 – 90.
4. Бобров В. Ф. Основы теории резания металлов: монография. – М.: Машиностроение, 1972. - 71 с.
5. Рудник С. С. Закономерности износа резцов и критерии затепления: метод. рекоменд. / С. С. Рудник, В. В. Коваленко. – К. : КПИ, 1964. – 31 с.

Надійшла до редакції
25 січня 2013 року

© Скицюк В. І., Вайнтрауб М. А., 2013