

УДК 621.891

Б.В. Гупка, к.т.н., доц.

І.Є. Казюка, аспір.

*Тернопільський державний технічний університет ім. І.Пулюя***ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ВЗАЄМНОГО ПЕРЕКРИТТЯ
НА ПРОЦЕСИ В ЗОНІ ФРИКЦІЙНОГО КОНТАКТУ
ПРИ РІЗАННІ МЕТАЛІВ**

Розглянуто вплив коефіцієнта взаємного перекриття на процеси в зоні фрикційного контакту при різанні металів. Запропоновано електричні критерії оцінки структурної пристосованості матеріалів при терті різанням.

Вступ. У загальній теорії систем окремо виділено поняття трибологічної системи, в тому числі і при різанні металів. Значна частина триботехнічних задач у даний час вирішується мало-ефективним, емпіричним шляхом, що призводить до великих матеріальних та енергетичних витрат, не враховуються параметри трибологічної надійності та довговічності машин, механізмів ріжучих інструментів ще на етапі конструювання. Серед інших причин – це і відсутність комплексної методики дослідження, яка б включала в себе кінетичні критерії оцінки процесів у зоні фрикційного контакту при різанні металів, універсальні машини тертя, параметричні моделі дослідження. Сучасний розвиток термодинаміки незворотних процесів, фізики твердого тіла, матеріалознавства, синергетики, експериментальних методик дозволив одержати обширні дані про механізми трансформації та руйнування поверхневих шарів, створити банк триботехнічних даних, побудувати відповідні фізичні, параметричні моделі процесів тертя при різанні, виявити загальні закономірності процесу тертя та зношування, дати конкретні практичні рекомендації [1].

Виклад основного матеріалу. Важливу роль відіграє при цьому геометрія контактуючих поверхонь тертя (масштабний фактор), яка визначає значення коефіцієнта взаємного перекриття ($K_{ВП}$). Величина $K_{ВП}$ суттєво змінює швидкість процесів тертя та зношування при переході від точкового до лінійного контакту і нарешті до контакту по площині. В умовах тертя при різанні металів це призводить до зміни співвідношення швидкостей процесів утворення, трансформації та руйнування захисних вторинних структур (ВС).

Передня поверхня різця взаємодіє з прирізцевою поверхнею стружки, а задня поверхня – з відтворюваною поверхнею різання. На обидві поверхні діють різні тиски, постійно змінюються площа

контакту, шорсткість поверхні, умови тепловідводу, наростоутворення та мікрОВикришування, контактна температура, що призводить до різних інтенсивностей зношування робочих поверхонь різця.

У конкретних випадках, коли необхідно перенести результати лабораторних досліджень на реальні вузли тертя використовують елементи теорії моделювання із врахуванням теплової динаміки процесу тертя та зношування при різанні металів. Це зrealізовано в запропонованій методиці дослідження і підтверджено одержаними результатами. Аналізуючи вхідні параметри та умови різання (важконавантажені пари тертя), попередні експериментальні дослідження та дослідження інших авторів, вибрана наступна схема контакту пари тертя (рис. 1): пальчиковий зразок 1 – плоска торцева поверхня диска 2 (контргтіло).

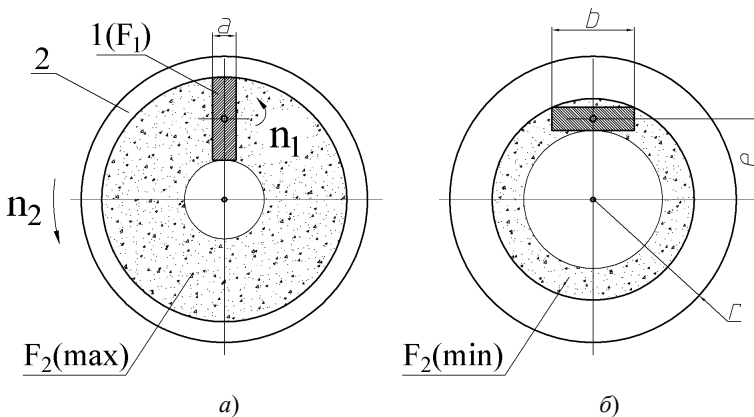


Рис. 1. Схема контакту пари тертя та зміни $K_{ВП}$:
 а) $K_{ВП} - \min$, б) $K_{ВП} - \max$

- n_1 – частота обертання зразка 1 (різець);
- n_2 – частота обертання контргтіла 2 (оброблювана деталь);
- a, b – розміри зразка 1;
- e – ексцентриситет;
- r – радіус контргтіла 2.

Положення зразка суттєво впливає на умови мащення та охолодження (характер змащувально-охолоджуючих рідин (ЗОР) у робочу зону тертя), що в свою чергу формує конкретні значення параметрів контактного електричного опору КЕО (R), інтенсивності зношування I , коефіцієнт тертя μ , температури $T^\circ\text{C}$.

Контртіло і зразок здійснюють обертовий рух із плавним характером зміни частоти обертання. Дана схема контакту оптимальна як для візуального нагляду за досліджуваними процесами, так і для подачі ЗОР у зону тертя. Форма робочих поверхонь тертя зручна для подальших металографічних досліджень їх структурного стану. Величина $K_{ВП}$ за запропонованою методикою визначається із співвідношення:

$$K_{ВП} = F_1 / F_2, \tag{1}$$

де F_1 – площа тертя пальчикового зразка 1 (величина постійна в межах одного експерименту); F_2 – площа тертя контртіла 2 (змінна величина в межах одного експерименту).

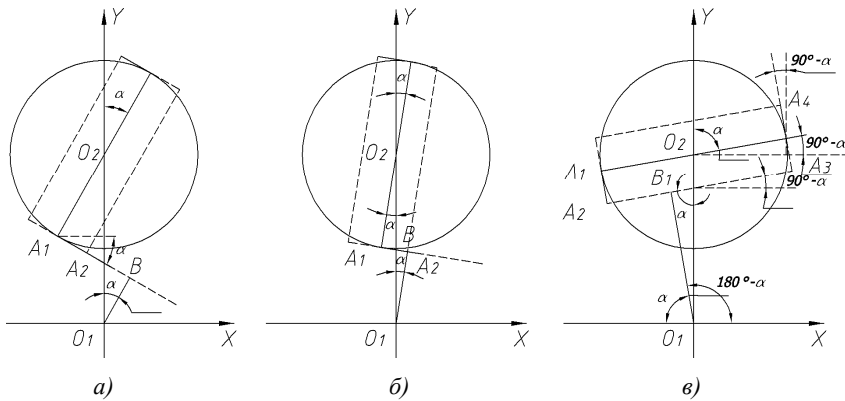


Рис. 2. Схеми положення зразка для визначення критичних значень $K_{ВП}$

Для схем, що зображені на рис. 2, маємо наступні умови:

$$O_1O_2 = R_C; A_1O_2 = \frac{b}{2}; A_1A_2 = \frac{a}{2}; O_1B \perp A_1A_2; O_1B_1 \perp A_2A_3.$$

Для рис. 1, б для значення α , при якому $O_1B = O_1A_2$ або $A_1B = A_1A_2$, координати точок матимуть вигляд:

$$A_1 \left(-\frac{b}{2} \sin \alpha; R_C - \frac{b}{2} \cos \alpha \right);$$

$$A_2 \left(-\frac{b}{2} \sin \alpha + \frac{a}{2} \cos \alpha; R_C - \frac{b}{2} \cos \alpha - \frac{a}{2} \sin \alpha \right).$$

Рівняння прямої A_1A_2 :

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_1 - y_2};$$

$$\frac{x + \frac{b}{2} \sin \alpha}{-\frac{b}{2} \sin \alpha + \frac{a}{2} \cos \alpha + \frac{b}{2} \sin \alpha} = \frac{y - R_c + \frac{b}{2} \cos \alpha}{R_c - \frac{b}{2} \cos \alpha - \frac{a}{2} \sin \alpha - R_c + \frac{b}{2} \cos \alpha};$$

$$\frac{x + \frac{b}{2} \sin \alpha}{\frac{a}{2} \cos \alpha} = \frac{y - R_c + \frac{b}{2} \cos \alpha}{-\frac{a}{2} \sin \alpha} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \sin \alpha \left(x + \frac{b}{2} \sin \alpha \right) + \cos \alpha \left(y - R_c + \frac{b}{2} \cos \alpha \right) = 0;$$

$$y - R_c + \frac{b}{2} \cos \alpha = -\operatorname{tg} \left(x + \frac{b}{2} \sin \alpha \right);$$

$$y = -x \operatorname{tg} \alpha + R_c - \frac{b}{2} \cos \alpha - \frac{b}{2} \operatorname{tg} \alpha \sin \alpha =$$

$$= -x \operatorname{tg} \alpha + R_c - \frac{b}{2} \left(\cos \alpha + \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} \right) = -x \operatorname{tg} \alpha + R_c - \frac{b}{2 \cos \alpha}.$$

Остаточне рівняння A_1A_2 матиме вигляд:

$$y = -x \operatorname{tg} \alpha + R_c - \frac{b}{2 \cos \alpha} \tag{2}$$

З тієї ж схеми рівняння OB : $y = x \operatorname{tg} \alpha$, де

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{2} - \alpha \right) = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \operatorname{ctg} \alpha.$$

Тоді координати точки B після деяких перетворень набувають наступного значення:

$$\left. \begin{aligned} y_B &= x_B \operatorname{ctg} \alpha \\ y &= -x_B \operatorname{tg} \alpha + R_c - \frac{b}{2 \cos \alpha} \end{aligned} \right\}; \quad x_B \operatorname{c}(\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha) = R_c - \frac{b}{2 \cos \alpha};$$

$$\operatorname{ctg} \alpha + \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha};$$

$$\begin{cases} x_B = \sin \alpha \cos \alpha R_C - \frac{b}{2} \sin \alpha \\ y_B = \cos^2 \alpha R_C - \frac{b}{2} \cos \alpha \end{cases}, \quad (3)$$

яке справедливе для рис. 1, а і рис. 1, б.

Розглянемо відрізок O_1B і знайдемо його довжину:

$$\begin{aligned} |O_1B| &= \sqrt{x_B^2 + y_B^2} = \sqrt{\left(\sin \alpha \cos \alpha R_C - \frac{b}{2} \sin \alpha\right)^2 + \left(\cos^2 \alpha R_C - \frac{b}{2} \cos \alpha\right)^2} = \\ &= \sqrt{R_C^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha - R_C b \sin^2 \alpha \cos \alpha + \frac{b^2}{4} \sin^2 \alpha + \cos^4 \alpha R_C^2 - R_C b \cos^3 \alpha + \\ &+ \frac{b^2}{4} \cos^2 \alpha} = \sqrt{R_C^2 \cos^2 \alpha - R_C b \cos \alpha + \frac{b^2}{4}} = \sqrt{\left(R_C \cos \alpha - \frac{b}{2}\right)^2} = R_C \cos \alpha - \frac{b}{2}. \end{aligned}$$

Отже, відрізок O_1B дорівнює:

$$|O_1B| = R_C \cos \alpha - \frac{b}{2}. \quad (4)$$

Аналогічно проводимо розрахунок довжини і для відрізка O_1A_2 :

$$\begin{aligned} |O_1A_2| &= \sqrt{x_{A_2}^2 + y_{A_2}^2} = \sqrt{\left(-\frac{b}{2} \sin \alpha + \frac{a}{2} \cos \alpha\right)^2 + \left(R_C - \frac{b}{2} \cos \alpha - \frac{a}{2} \sin \alpha\right)^2} = \\ &= \sqrt{\frac{b^2}{4} \sin^2 \alpha - \frac{ab}{2} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{a^2}{4} \cos^2 \alpha + R_C^2 + \frac{b^2}{4} \cos^2 \alpha + \frac{a^2}{4} \sin^2 \alpha - \\ &- R_C b \cos \alpha - R_C a \sin \alpha + \frac{ab}{2} \cos \alpha \sin \alpha} = \sqrt{\frac{b^2}{4} + \frac{a^2}{4} + R_C^2 - R_C b \cos \alpha - R_C a \sin \alpha}, \end{aligned}$$

яка в кінцевому варіанті матиме вигляд:

$$|O_1A_2| = \sqrt{\frac{b^2}{4} + \frac{a^2}{4} + R_C^2 - R_C (b \cos \alpha - a \sin \alpha)}. \quad (5)$$

Приймаємо, що точка B співпадає з точкою A_2 , тоді

$$|O_1B| = |O_1A_2|;$$

$R_C^2 \cos^2 \alpha - R_C b \cos \alpha + \frac{b^2}{4} = \frac{b^2}{4} + \frac{a^2}{4} + R_C^2 - R_C b \cos \alpha - R_C a \sin \alpha$ і маємо, що

$$R_C^2 + \frac{a^2}{4} = R_C^2 \cos^2 \alpha + R_C a \sin \alpha. \quad (6)$$

Після здійснення деяких перетворень отримуємо наступне значення кута α :

$$R_C^2 + \frac{a^2}{4} = R_C^2(1 - \sin^2 \alpha) + R_C a \sin \alpha \Rightarrow \frac{a^2}{4} = R_C a \sin \alpha - R_C^2 \sin^2 \alpha;$$

$$\sin \alpha = z; R_C^2 z^2 - R_C a z + \frac{a^2}{4} = 0;$$

$$z_{1,2} = \frac{R_C a \pm \sqrt{R_C^2 a^2 - R_C^2 a^2}}{2R_C^2} \Rightarrow z_{1,2} = \frac{a}{2R_C};$$

$$z = \frac{a}{2R_C}, \text{ тоді}$$

$$\alpha = \arcsin \frac{a}{2R_C} = \alpha_1. \quad (7)$$

Отже, при $0 < \alpha < \alpha_1$ (сталий кут) $R_{\min} = |O_1 B| = R_C \cos \alpha - \frac{b}{2}$.

За умови, коли пряма $A_1 A_2$ не пройде через O_1 або поки $|O_1 B| = 0$,

то $|O_1 B| = 0 \Rightarrow R_C \cos \alpha - \frac{b}{2} = 0$, то:

$$\alpha = \arccos \frac{b}{2R_C} = \alpha_2. \quad (8)$$

Отже, при $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$

$$R_{\min} = |O_1 A_2| = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{4} + R_C^2 - R_C (b \cos \alpha + a \sin \alpha)}.$$

Тепер розглянемо рис. 1, в, де пряма $A_2 A_3$ проходить через точку A_2 і утворює кут $90^\circ - \alpha$ з віссю X . Тоді

$$K_{A_2 A_3} = \operatorname{tg}(90^\circ - \alpha) = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \operatorname{ctg} \alpha.$$

Рівняння прямої $A_2 A_3$:

$$y - y_2 = K_{A_2 A_3} (x - x_2);$$

$$y - R_C + \frac{b}{2} \cos \alpha + \frac{a}{2} \sin \alpha = \operatorname{ctg} \alpha (x + \frac{b}{2} \sin \alpha - \frac{a}{2} \cos \alpha);$$

$$y = x \operatorname{ctg} \alpha + R_C - \frac{b}{2} \cos \alpha - \frac{a}{2} \sin \alpha + \frac{b}{2} \cos \alpha - \frac{a \cos^2 \alpha}{2 \sin \alpha} =$$

$$= x \operatorname{ctg} \alpha + R_C - \frac{a}{2} (\sin \alpha - \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha}),$$

то у кінцевому результаті рівняння матиме вигляд:

$$y = x \operatorname{ctg} \alpha + R_C - \frac{a}{2} (\sin \alpha - \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha}). \quad (9)$$

Кут нахилу прямої O_1B_1 до вісі X рівна $180^\circ - \alpha$ (рис. 1, в), а

$$\operatorname{tg}(180^\circ - \alpha) = \frac{\sin \alpha}{-\cos \alpha} = -\operatorname{tg} \alpha .$$

Рівняння прямої O_1B_1 $y = -x \operatorname{tg} \alpha$.

Визначимо координати точки B_1 :

$$\left. \begin{aligned} y_{B_1} &= -x_{B_1} \operatorname{tg} \alpha \\ y_{B_1} &= x_{B_1} \operatorname{ctg} \alpha + R_C - \frac{a}{2} \left(\sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) \end{aligned} \right\} ;$$

$$-x_{B_1} (\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha) = R_C - \frac{a}{2} \left(\sin \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin \alpha} \right) ;$$

$$\operatorname{tg} \alpha + \operatorname{ctg} \alpha = \frac{1}{\sin \alpha \cos \alpha} .$$

У кінцевому вигляді координати точки набувають наступного значення:

$$\left\{ \begin{aligned} y_{B_1} &= R_C \sin^2 \alpha - \frac{a}{2} (\sin^3 \alpha + \sin \alpha \cos^2 \alpha) = \\ &= R_C \sin^2 \alpha - \frac{a}{2} \sin \alpha \\ x_{B_1} &= \frac{a}{2} (\sin^2 \alpha \cos \alpha + \cos^3 \alpha) - R_C \sin \alpha \cos \alpha = \\ &= \frac{a}{2} \cos \alpha - R_C \sin \alpha \cos \alpha \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Тепер розглянемо довжину відрізка O_1B_1 :

$$|O_1B_1| = \sqrt{x_{B_1}^2 + y_{B_1}^2} ;$$

$$x_{B_1} = \left(\frac{a}{2} - R_C \sin \alpha \right) \cos \alpha ;$$

$$y_{B_1} = - \left(\frac{a}{2} - R_C \sin \alpha \right) \sin \alpha ;$$

$$|O_1B_1| = \sqrt{x_{B_1}^2 + y_{B_1}^2} = \left| \frac{a}{2} - R_C \sin \alpha \right| = R_C \sin \alpha - \frac{a}{2} .$$

При $\alpha_2 \leq \alpha \leq \pi/2$ $R_{\min} = R_C \sin \alpha - \frac{a}{2}$.

У будь-якому випадку $R_{\max} = |O_1A_4|$, де:

$$x_{A_t} = \frac{b}{2} \cos(90^\circ - \alpha) - \frac{a}{2} \sin(90^\circ - \alpha) = \frac{b}{2} \sin \alpha - \frac{a}{2} \cos \alpha ;$$

$$y_{A_t} = R_C + \frac{b}{2} \sin(90^\circ - \alpha) + \frac{a}{2} \cos(90^\circ - \alpha) = R_C + \frac{b}{2} \cos \alpha + \frac{a}{2} \sin \alpha .$$

Тоді

$$\begin{aligned} R_{\max} &= \sqrt{x_{A_t} + y_{A_t}} = \sqrt{\frac{b^2}{4} \sin^2 \alpha - \frac{ab}{2} \sin \alpha \cos \alpha + \frac{a^2}{4} \cos^2 \alpha +} \\ &\sqrt{R_C^2 + \frac{b^2}{4} \cos^2 \alpha + \frac{a^2}{4} \sin^2 \alpha + R_C b \cos \alpha + R_C b \sin \alpha +} \\ &\sqrt{\frac{ab}{2} \cos \alpha \sin \alpha} = \sqrt{\frac{a^2}{4} + \frac{b^2}{4} + R_C^2 + R_C b (\cos \alpha + \sin \alpha)}. \end{aligned} \quad (11)$$

Внаслідок вищенаведених розрахунків та значень кутів ($\alpha_1 = \arcsin \frac{a}{2R_C}$, $\alpha_2 = \arccos \frac{b}{2R_C}$, $0 \leq \alpha \leq \pi/2$) отримуємо формулу для визначення коефіцієнта взаємного перекриття:

$$R_{\min} = \begin{cases} R_C \cos \alpha - \frac{b}{2}, & \text{при } 0 \leq \alpha \leq \alpha_1 \\ \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{4} + R_C^2 - R_C (b \cos \alpha - a \sin \alpha)}, & \text{при } \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2 ; \\ R_C \sin \alpha - \frac{a}{2}, & \text{при } \alpha_2 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (12)$$

$$R_{\max} = \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{4} + R_C^2 + R_C b (\cos \alpha + \sin \alpha)} ; \quad (13)$$

$$K_{ВП} = \frac{ab}{\pi (R_{\max}^2 - R_{\min}^2)} . \quad (14)$$

Залежно від режимів різання, умов подачі ЗОР, геометрії контакту відповідною буде інтенсивність зношування передньої або задньої робочих поверхонь різця. При плавній зміні положення досліджуваного зразка відносно контртіла (плавна зміна $K_{ВП}$) відтворюється весь спектр умов у зоні фрикційного контакту при різанні (точінні) металів. При положенні зразка (рис. 1, а) приблизно однакові (нормальні) умови тертя по всій поверхні з наявністю ВСІ або ВСІІ (кращі умови змащення, тепловідводу, підвищення жорсткості

контакту пари тертя), що відповідає чистовій обробці металів, при якій зношується в основному задня поверхня різця (мале значення R_z).

При переході зразка в положення рис. 1, б умови в зоні тертя стають більш екстримальними і неоднаковими по довжині зразка (неоднакові умови змащення з наявністю зон сухого тертя, градієнта температур, одночасна наявність ВСІ, ВСІІ, перехідних зон (ВСІ + ВСІІ), що відповідає попередній обробці металів і обробці на важких верстатах з інтенсивним зношуванням задньої і передньої поверхонь різця).

Висновок. Дослідження по даній методиці проводились на спеціально виготовленому трибометрі [2] з можливістю фіксації основних триботехнічних параметрів: сила тертя, коефіцієнт тертя μ , інтенсивність зношування I , температура T °С у широкому діапазоні зміни силових параметрів навантаження по заданому закону. Крім цього, запропоновано електричні критерії оцінки структурної пристосовуваності матеріалів при терті різанням (контактний електроопір пари тертя КЕО (R), ΔR , $\Delta R/R_{вих}$), які дозволили значно скоротити цикл досліджень, об'єктивно ідентифікувати основні триботехнічні параметри із відповідним структурним станом поверхонь тертя, чітко фіксувати критичні точки взаємопереходу процесів: припрацювання – нормальне тертя та зношування – пошкоджувальність (об'ємна деструкція). Параметрична модель дослідження процесів тертя при різанні металів зображена на рис. 3:

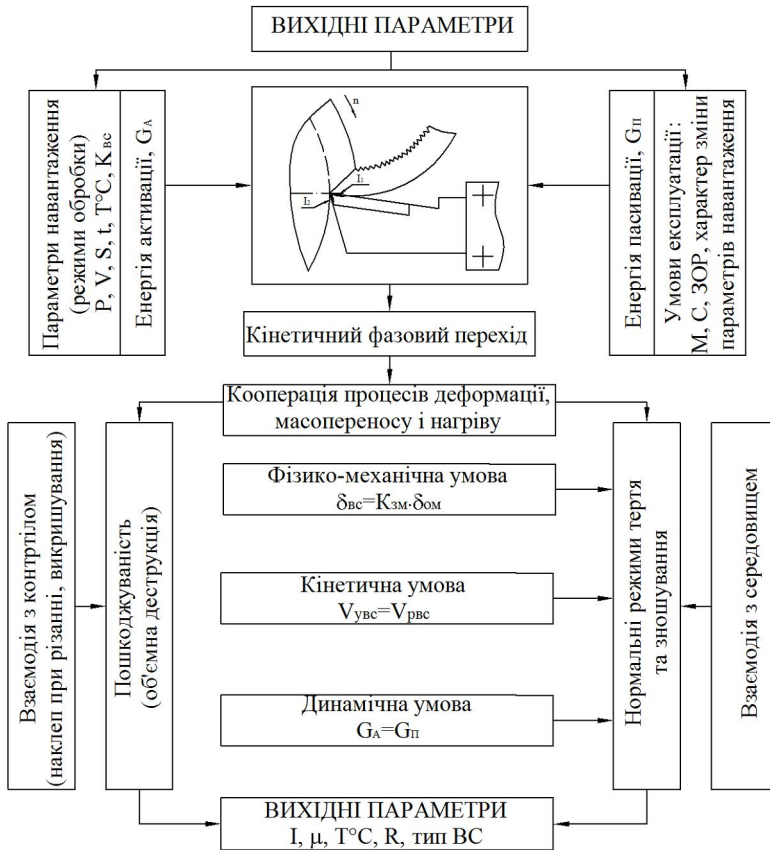


Рис. 3. Параметрична модель дослідження процесів тертя та зношування при різанні металів

P – сила різання; V – швидкість різання; S – подача; t – глибина різання; T °C – температура; $\delta_{вс}$ – міцність ВС; $\delta_{ом}$ – міцність основного металу; $K_{зм}$ – коефіцієнт зміцнення; $V_{увс}$ – швидкість утворення ВС; $V_{рвс}$ – швидкість руйнування ВС; I – інтенсивність зношування; μ – коефіцієнт тертя; R – контактний електроопір пари тертя; M – матеріал пари тертя; C – середовище (газове); $ЗОР$ – змащувально-охолоджувальна речовина

Проведений цикл досліджень дозволив побудувати узагальнений графік залежності основних триботехнічних показників і структурного стану поверхонь тертя від значення $K_{ВП}$. (рис. 4).

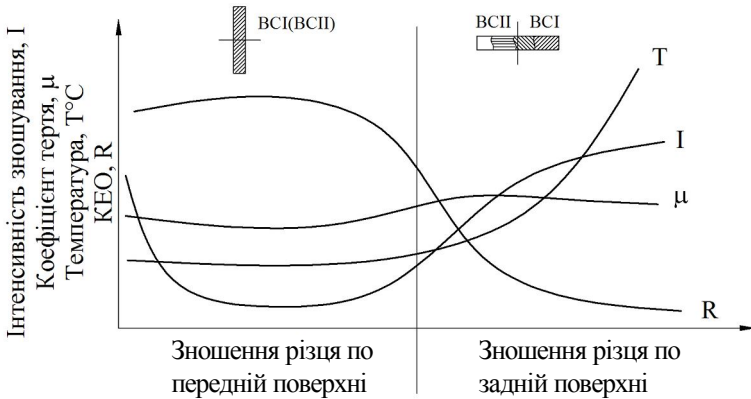


Рис. 4. Вплив $K_{ВП}$ на процеси в зоні фрикційного контакту при різанні металів

Дана схема дослідження дозволила шляхом фізичного моделювання процесів тертя та зношування, що має місце при різанні металів, значно зменшити трудомісткість експериментальних досліджень, а також дати фізичне обґрунтування зношуванню інструментів при різанні.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Поверхностная прочность материалов при трении // Под ред. Б.И. Костецкого. – К.: Техніка, 1976. – 292 с.
2. А.С. 1490593 СРСР МКИ G01N3/56 Способ испытания на трение и изнашивание пары диск-палец // Б.И. Костецкий, Б.В. Гупка и др. – 4339216/25. – 28, Заявлено 04.12.87, Опубліковано 30.06.89. – Бюл. № 24. – 5 с.

ГУПКА Богдан Васильович – кандидат технічних наук, доцент Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулюя.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування.

КАЗЮКА Ігор Євгенович – аспірант Тернопільського державного технічного університету ім. І.Пулюя.

Наукові інтереси:

– технологія машинобудування.

Подано 25.02.2006