

© Ю.Г. Кравченко<sup>1</sup>, С.Т. Пацера<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## РОЗПОДІЛ НАПРУЖЕНЬ НА ПЛАСТИЧНО-ПРУЖНОМУ КОНТАКТІ СТРУЖКА-ЛЕЗО

© Yu. Kravchenko<sup>1</sup>, S. Patsera<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## STRESS DISTRIBUTION ALONG THE PLASTIC-ELASTIC BLADE-TO-CHIP CONTACT AREA

**Мета роботи** – вивести нові формули показника ступеня функції розподілу нормальних напружень і значення дотичних напружень на ділянці пластичного контакту стружки з лезом.

**Методика дослідження** полягає у застосуванні нової розрахункової схеми рівноваги стружки і вводу постійного значення коефіцієнта тертя-зсуву в площині зсуву для окремих груп сталей. Вихідною базою для визначення параметрів формули показника і відповідних напружень служить розроблена система рівнянь емпіричних залежностей дотичної, радіальної, осевої складових сили різання від глибини, подачі, швидкості різання при певних передньому куті, радіусі при вершині, величині зносу по задній поверхні з напрацьованими показниками степені, коефіцієнтом розмірної пропорційності і поправковими коефіцієнтами на марку оброблюваного матеріалу та на умови різання.

Рішення складається з двох розділів:

- визначення показника степені і максимального значення функції розподілу нормальних напружень;

- визначення дотичних напружень пластичного контакту на передній поверхні.

Вивід формули показника залежності ґрунтується за умови рівноваги стружки під дією результуючих сил та моментів сил зі сторони площини зсуву та зі сторони передньої поверхні.

**Результати дослідження.** Сталь 45 (перлітного класу) у порівнянні зі сталлю 12Х18Н9Т (аустенітного класу) має більші значення показника степені функції розподілу нормальних напружень і коефіцієнту тертя-зсуву в площині зсуву, а менші значення по дотичним напруженням в площині зсуву, середнім і максимальним нормальним напруженням, коефіцієнту тертя-ковзання стружки по лезу і дотичним напруженням на пластичному контакті.

Збільшення переднього кута приводить до однозначного зменшення довжини площадки зсуву та довжини контакту стружки з лезом і збільшення коефіцієнту тертя-ковзання стружки з лезом та дотичних напружень на пластичному контакті стружка-лезо.

**Наукова новизна.** Новизна формули показника полягає у введенні кута тертя-зсуву в площині зсуву, який на відміну від коефіцієнта тертя-ковзання на передній поверхні в більшій мірі враховує фізико-механічні властивості сталі і практично мало залежить від режимних і геометричних параметрів та контактних явищ процесу різання.

**Практична значимість.** Одержана формула зв'язує дотичні напруження на пластичному контакті стружка-лезо з дотичними напруженнями в площині зсуву і призначена для точного розрахунку сили тертя на передній поверхні леза.

**Ключові слова:** дотичні і нормальні напруження, площина зсуву, передній кут, кут тертя-зсуву, показник залежності розподілу.

**Вступ.** Для глибоких досліджень контактних явищ на поверхнях леза (сили тертя, температурного поля та інтенсивності зношування) необхідно знати функцію розподілу і значення нормальних та дотичних напружень.

В цьому плані актуальність роботи М.М. Зорева [1] не втрачена до теперішнього часу.

Для визначення форми епюр напружень на контактних поверхнях леза застосовуються три основні експериментальні методи.

1. Поляризаційно-оптичний метод моделювання процесу різання на прозорих матеріалах (оброблюваному або інструментальному) при їх просвічуванні в поляризованому світлі. А.К. Зайцевим у роботі [2], М.Ф. Полетика [3], А.І. Бетачелі [4] виявлено зниження контактних напружень по довжині контакту і при збільшенні переднього кута, а також перехід форми епюри від увігнутої до опуклої при зміні переднього кута від  $-10^\circ$  до  $+10^\circ$ .

2. Методом розподілу ліній рівномірної мікротвердості на мікрошліфах коренів стружки А.І. Ісаєвим [5], М.І. Клушиним [6], Г.І. Грановським [7] встановлено, що по відношенню до початкової мікротвердості оброблюваного матеріалу HV середня твердість «холодної» стружки після первинної деформації дорівнює (1,4-1,8) HV (максимальне зміцнення відбувається в площині зсуву), а в прилезовій зоні вторинної деформації коефіцієнт зміцнення зростає до 1,8-2,4.

3. Методом «розрізного» різця на спеціальному приладі з вимірювання сили тертя М.Б. Гордон [8] отримав зміщену до різальної кромки горбоподібну криву розподілу дотичних напружень на передній поверхні. При точінні сталі 40Х різцем із швидкорізальної сталі (швидкість різання  $v = 1 - 1,5$  м/с, товщина зрізу  $a = 0,14$  мм) коефіцієнт тертя  $\mu_\gamma$  дорівнював 0,6 – 0,55. За допомогою «розрізного» різця з косою лінією роз'єму В.А. Остаф'єв [9] отримав випуклі осцилограми запису нормальних і дотичних контактних навантажень на передній поверхні для гострого леза при точінні латуні Л62.

Всі три методи із-за невідповідності реальним умовам різання, особливо перший, дають лише загальну картину епюр нормальних і дотичних напружень. Третій метод знайшов більше застосування при визначенні коефіцієнта тертя на передній поверхні леза.

В цілому на основі комплексу робіт [2-9] та ін. це дало М.М. Зореву [1] підставу запропонувати визначати розподіл нормальних напружень  $\sigma_l$  степеневою залежністю

$$\sigma_l = \sigma_{0\gamma} \cdot (1 - l/l_\gamma)^n \quad (1)$$

з формулою показника степені

$$n = 2 \cdot [l_\gamma / (a \cdot K_a (\mu_\gamma + \tan(\phi - \gamma))) - 1], \quad (2)$$

де  $\sigma_{0\gamma}$  – максимальні напруження біля різальної кромки;  $l_\gamma$  – довжина контакту стружки з лезом;  $l$  – поточне значення довжини контакту;  $a$  – товщина зрізу;  $K_a$  – коефіцієнт потовщення стружки;  $\mu_\gamma$  коефіцієнт тертя стружки;  $\phi$  – кут зсуву;  $\gamma$  – передній кут леза.

Відповідно середнє значення дотичних напружень  $\tau_\gamma$  дорівнює

$$\tau_\gamma = \mu_\gamma \cdot \sigma_\gamma, \quad (3)$$

тут  $\sigma_\gamma$  – середнє значення нормальних напружень.

Мета роботи – вивести нові формули показника степені функції розподілу нормальних напружень і значення дотичних напружень на ділянці пластичного контакту стружки з лезом.

**Постановка задачі.** Рішення поставленої мети виконується за рахунок застосування нової розрахункової схеми рівноваги стружки і вводу постійного значення коефіцієнта тертя-зсуву в площині зсуву для окремих груп сталей, який на відміну від коефіцієнта тертя-ковзання  $\mu_\gamma$  (1) на передній поверхні  $A_\gamma$  формули  $n$  (2) в повній мірі враховує фізико-механічні властивості оброблюваного матеріалу і практично мало залежить від режимних і геометричних параметрів процесу різання та впливу контактних явищ пари оброблюваного та інструментального матеріалів.

Функцією розподілу нормальних напружень на поверхні  $A_\gamma$  прийнята по аналогії з  $\sigma_l$  (1) спадна залежність з показником степені  $n$ , стосовно якого вивід спрощеної модифікованої формули є основою даної роботи.

Вихідною базою для визначення параметрів формули показника  $n$  і відповідних напружень служить розроблена система рівнянь емпіричних залежностей дотичної  $P_z$ , осьової  $P_x$ , осьової  $P_y$  складових сили різання (для умов непрямокутного різання нормальна складова  $P_n = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$ ) від глибини  $t$ , подачі  $s$ , швидкості  $v$  різання при певних передньому куті  $\gamma$ , радіусі при вершині  $r$ , величині зносу  $h$  по задній поверхні типу

$$P_i = C_p \cdot t^x \cdot s^y \cdot v^z \cdot (1 - \gamma/90)^n \cdot (1 + r)^\nu \cdot (1 + h)^u \cdot K_{mi} \cdot K_{pi}, \quad (4)$$

з напрацьованими показниками степені  $x - u$ , коефіцієнтом розмірної пропорційності  $C_p$  і поправковими коефіцієнтами на марку оброблюваного матеріалу  $K_m$  та умови різання  $K_p$  [10].

Така структура системи рівнянь (4) дозволяє обчислювати сили  $P'_z$  і  $P'_n$  при нульових значеннях параметрів  $r$  і  $h$  методом «зворотнього розрахунку».

**Основна частина.** Рішення складається з двох розділів.

1. Визначення параметрів функції розподілу  $\sigma_l(1)$ : показника степені  $n$  і максимального значення напружень  $\sigma_{0\gamma}$

Розрахункова схема представлена на рис.1, де  $P_v$  – основна координатна площа;  $P_n$  – координатна площа різання;  $P_\phi$  – площа зсуву;  $A_\gamma$  – передня поверхня леза;  $a$  і  $a_c$  – товщина перерізу зрізу і стружки;  $\gamma$  – передній кут леза;  $\phi$  – кут зсуву;  $T_s$  і  $T_n$  – дотична і нормальна складові результуючої сили стружкоутворення  $T$ ;  $\mu_s = T_s/T_n$  і  $\rho_s = \tan^{-1} \mu_s$  – коефіцієнт і кут тертя-зсуву в площині  $P_\phi$ ;  $F_\gamma$  і  $N_\gamma$  – дотична і нормальна складові результуючої сили тертя  $Q$  стру-

жки на поверхні  $A_\gamma$ ;  $\mu_\gamma = F_\gamma/N_\gamma$  і  $\rho_\gamma = \tan^{-1} \mu_\gamma$  – коефіцієнт і кут тертя стружки; ,  $ok = l_\gamma$  – довжина контакту стружки з лезом;  $ob = 0,5 \cdot l_\phi$  – половина довжини площини зсуву.

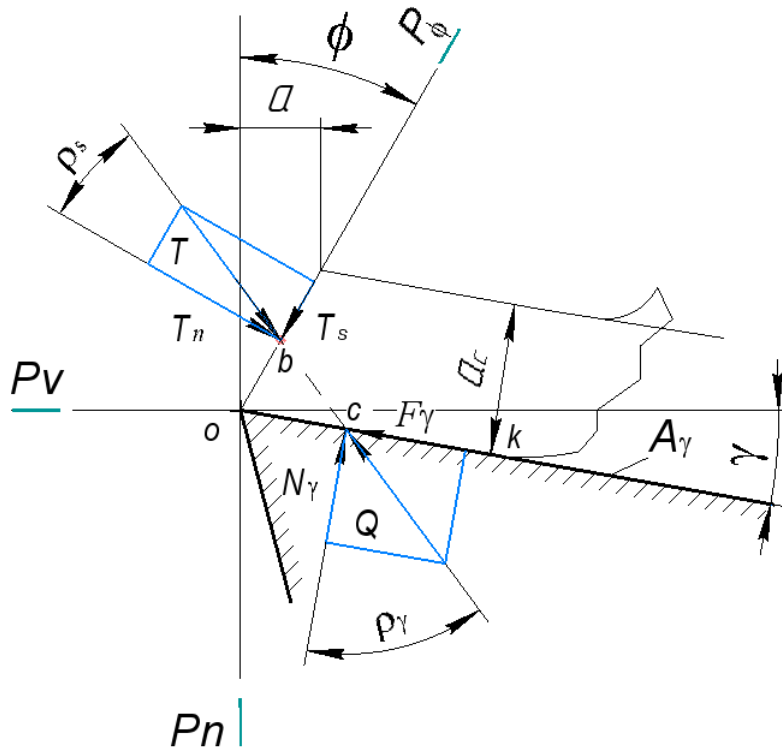


Рис. 1. Розрахункова схема рівноваги стружки під дією зовнішніх сил  $T = Q$  і моментів  $T_n \cdot ob = N_\gamma \cdot oc$  ( $P_v$  – основна площина,  $P_n$  – площина різання,  $P_\phi$  – площина зсуву,  $ob = 0,5 \cdot l_\phi$ ,  $oc = l_c$ ,  $ok = l_\gamma$ )

Вивід формули  $n$  залежності  $\sigma_l$  (1) ґрунтується на умові рівноваги стружки під дією результуючих сил  $T = Q$  і моментів сил  $T_n \cdot ob = N_\gamma \cdot oc$  зі сторони площини зсуву  $P_\phi$  і зі сторони передньої поверхні  $A_\gamma$ .

Спочатку визначаємо центр тиску  $l_c$  для рівняння рівноваги моментів зовнішніх сил відносно різальної кромки в точці  $o$ .

$$T_n \cdot 0,5l_\phi - N_\gamma \cdot l_c = 0, \tag{5}$$

де  $T_n, N_\gamma$  і  $0,5l_\phi, l_c$  – нормальні сили і центр їх тиску на  $P_\phi$  і  $A_\gamma$  ( $l_\phi = a/\sin \phi$  – довжина площини зсуву  $P_\phi$ ,  $a = s \cdot \sin \phi$  – товщина зрізу,  $s$  – подача,  $\phi$  – кут в плані).

Центр тиску (ваги) однорідної криволінійної фігури має [11] абсцису  $l_c = \left( \int_0^l x \cdot y(x) \cdot dx \right) / S$ . Тут:

$y(x)$  – рівняння кривої,  $S$  – площа фігури;

$$\begin{aligned} \text{інтеграл } J &= \int_0^l x \cdot (1 - x/l)^n \cdot dx = \left| \begin{array}{ll} 1 - x/l = u & -dx = l \cdot du \\ x = 0 & u_1 = 1, \\ x = l & u_2 = 0 \end{array} \right| = \\ &= l^2 \cdot \int_0^1 (u^n - u^{n+1}) \cdot du = l^2 / ((n + 1) \cdot (n + 2)); \end{aligned}$$

$$\text{площа } S = \int_0^l (1 - x/l)^n \cdot dx = l \cdot \int_0^1 u^n \cdot du = l/(n + 1).$$

Тоді відстань

$$l_c = J/S = l_\gamma/(n + 2), \quad (6)$$

де  $l_\gamma = ok$  – довжина контакту стружки з лезом.

Потім визначаємо спільний центр тиску для сили  $Q$  і моменту  $N_\gamma \cdot l_c$  на поверхні  $A_\gamma$ . Із трикутника  $obc$  слідує:  $\angle obc = 90^\circ - \rho_s$ ;  $\angle cob = 90^\circ - \phi + \gamma$ ;  $\angle ocb = \rho_s + \phi - \gamma$ . Далі з пропорції

$$0,5 \cdot l_\phi / \sin(\rho_s + \phi - \gamma) = l_c / \sin(90^\circ - \rho_s)$$

визначається відстань до центру тиску

$$l_c = 0,5 \cdot l_\phi \cdot \cos \rho_s / \sin(\rho_s + \phi - \gamma). \quad (7)$$

Прирівнявши  $l_c$  (6) і  $l_c$  (7) отримуємо розрахунковий вираз показника степені [12]

$$n = 2 \cdot [l_\gamma \cdot \sin(\rho_s + \phi - \gamma) / l_\phi \cdot \cos \rho_s - 1]. \quad (8)$$

Вихідні дані для  $n$  (8) обчислюються за формулами:

кут зсуву згідно залежності I.A. Тіме

$$\tan \phi = \cos \gamma / (k_a - \sin \gamma), \quad (9)$$

через коефіцієнт потовщення стружки  $K_a = a_c/a$ ;

кут тертя-зсуву в площині зсуву [13, 14]

$$\rho_s = \tan^{-1} \mu_s \quad (10)$$

через коефіцієнт тертя-зсуву

$$\mu_s = T_s/T_n = (P'_z - P'_n \cdot \tan \phi) / (P'_z \cdot \tan \phi + P'_n)$$

зі значеннями  $P'_z$  і  $P'_n$  при гострому лезі ( $h = 0$ ,  $F_\alpha = 0$ ,  $N_\alpha = 0$ );

довжина контакту стружки з лезом [15]

$$l_\gamma = 2a \cdot \cos(\phi - \gamma) / [\sin \phi \cdot \sin[2 \cdot (\phi - \gamma + \psi)]] \quad (11)$$

через кут текстури  $\tan \psi = 2 / (\varepsilon + \sqrt{\varepsilon^2 + 4})$  і відносний зсув

$$\varepsilon = 1 / \tan \phi + \tan(\phi - \gamma).$$

Кут зсуву

$$\tan \phi = (P'_z - P'_n \cdot u) / (P'_z \cdot u + P'_n) \quad (12)$$

також може визначатися через  $P'_z$  і  $P'_n$  та постійне значення коефіцієнта тертя-зсуву  $u = \mu_s = \tan \rho_s$  для окремих груп оброблюваних матеріалів [14].

Середнє значення дотичних напружень в площині зсуву дорівнює

$$\tau_s = T_s / (l_\phi \cdot b) \quad (13),$$

де дотична сила зсуву визначається через  $P'_z$  і  $P'_n$  [10]:  $T_s = P'_z \cdot \cos \phi - P'_n \cdot \sin \phi$ ;

$l_\phi = a / \sin \phi$  – довжина площини зсуву;  $b = t / \sin \phi$  – ширина зрізу.

Середнє значення нормальних напружень на  $A_\gamma$  визначається через силу тиску [10]:  $N_\gamma = P'_z \cdot \cos \gamma - P'_n \cdot \sin \gamma$  і площу контакту стружки з лезом  $l_\gamma \cdot b$

$$\sigma_\gamma = N_\gamma / (l_\gamma \cdot b). \quad (14)$$

З другої сторони  $\sigma_\gamma$  може визначатися через  $\sigma_{0\gamma}$  (1) по теоремі про середнє значення інтегралу

$$\sigma_\gamma = \sigma_{0\gamma} \cdot 1/l \cdot \int_0^l (1 - x/l)^n \cdot dx = \sigma_{0\gamma} / (n + 1),$$

звідки

$$\sigma_{0\gamma} = \sigma_\gamma \cdot (n + 1). \quad (15)$$

Новизна формули  $n$  (8) полягає у введенні кута тертя-зсуву  $\rho_s$  (10) в площині  $P_\phi$ , який на відміну від коефіцієнта тертя-ковзання  $\mu_\gamma$  (21) на поверхні  $A_\gamma$  формули  $n$  (2), в більшій мірі враховує фізико-механічні властивості сталі і практично мало залежить від режимних і геометричних параметрів та контактних явищ процесу різання.

2. Визначення дотичних напружень  $\tau_\mu$  пластичного контакту на передній поверхні

При різанні більшості вуглецевих і легованих сталей, особливо за умов наростуотворення, характерною відзнакою є комбінована форма епюр дотичних напружень  $\tau$  на поверхні  $A_\gamma$ .

Епюри напружень на ділянках пластичного контакту (вторинної деформації з внутрішнім тертям)  $l_\mu$  і пружного контакту (зовнішнього тертя)  $l_\gamma - l_\mu$  загально визнаної моделі [16, 17, 18] М.М. Зорева [1] наведені на рис. 2.

Згідно виразу  $\tau_\gamma = \mu_\gamma \cdot \sigma_\gamma$  (3) для  $\tau_\mu$  і  $\tau_l$  запишемо

$$\tau_\mu = \mu_\gamma \cdot \sigma_{0\gamma} \cdot \left(1 - \frac{l_\mu}{l_\gamma}\right)^n \text{ і } \tau_l = \mu_\gamma \cdot \sigma_{0\gamma} \cdot \left(1 - \frac{l}{l_\gamma}\right)^n.$$

Позначимо  $l_\mu/l_\gamma = p$  і  $l/l_\gamma = q$ . Тоді  $\sigma_{0\gamma} = \tau_\mu / \mu_\gamma \cdot (1 - p)^n$  і

$$\tau_l = \tau_\mu \cdot (1 - q)^n / (1 - p)^n \quad (16)$$

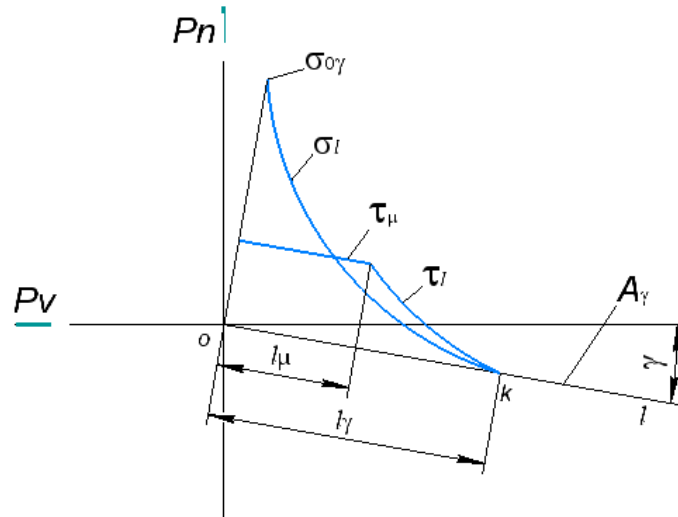


Рис. 2. Розрахункова схема визначення дотичних напружень  $\tau_\mu$  на ділянці пластичного контакту  $l_\mu$

Відповідно на ділянці зовнішнього тертя-ковзання  $l_\gamma - l_\mu$  дотична сила тертя на основі  $\tau_l$  (16) дорівнює

$$\begin{aligned} F_l &= b \cdot \int_{l_\mu}^{l_\gamma} \tau_l \cdot dl = l_\gamma \cdot b \cdot \left( \frac{\tau_\mu}{(1-p)^n} \right) \cdot \int_p^1 (1-q)^n \cdot dq = \\ &= \left| \begin{array}{l} 1-q = u, \quad -dq = du \\ q = p \quad u_1 = 1-p, \quad q = 1 \quad u_2 = 0 \end{array} \right| = \\ &= \left| \int_0^{1-p} u^n \cdot du = \frac{(1-p)^{n+1}}{(n+1)} \right| = l_\gamma \cdot b \cdot \tau_\mu \cdot \frac{(1-p)}{(n+1)}. \end{aligned}$$

Сумарна дотична сила на  $A_\gamma$  складає

$$\begin{aligned} F_\gamma &= F_\mu + F_l = b \cdot \left( \tau_\mu \cdot l_\gamma \cdot p + \tau_\mu \cdot l_\gamma \cdot \frac{(1-p)}{(n+1)} \right) = \\ &= l_\gamma \cdot b \cdot \tau_\mu \cdot \frac{(p \cdot n + 1)}{(n+1)}. \end{aligned} \quad (17)$$

На основі середнього значення  $\tau_\gamma$  вона також дорівнює

$$F_\gamma = l_\gamma \cdot b \cdot \tau_\gamma. \quad (18)$$

Рівність виразів  $F_\gamma$  (17) і  $F_\gamma$  (18) приводить до пошукового значення

$$\tau_\mu = \tau_\gamma \cdot \frac{(n+1)}{(p \cdot n + 1)}. \quad (19)$$

При  $\tau_\mu$  (19) і  $p = 0$  вираз  $F_\gamma$  (17) перетворюється у (18).

В теорії різання особливий інтерес по контактним процесам при стружкоутворенні представляє співвідношення дотичних напружень пластичного контакту  $\tau_\mu$  і напружень зсуву  $\tau_s$  для розрахунку сили  $F_\gamma$  (17).

В свою чергу напруження  $\tau_\gamma$  (19) можуть визначатися із рівняння

$$\tau_s \cdot l_\phi^2 / 2 \cdot \mu_s = \tau_\gamma \cdot l_\gamma^2 / \mu_\gamma \cdot (n + 2) \quad (5) \text{ зі значенням } l_c \quad (6)$$

$$\tau_\gamma = \frac{\tau_s \cdot l_\phi^2 \cdot \mu_\gamma \cdot (n + 2)}{2 \cdot l_\gamma^2 \cdot \mu_s} \quad (20)$$

Для визначення коефіцієнта тертя-ковзання на поверхні  $A_\gamma$  існує відома формула [13, 19]

$$\mu_\gamma = F_\gamma / N_\gamma = (P'_z \cdot \tan \gamma + P'_n) / (P'_z - P'_n \cdot \tan \gamma) \quad (21)$$

на основі даних  $P'_z$  і  $P'_n$  при гострому лезі.

Після підстановки  $\tau_\gamma$  (20) у  $\tau_\mu$  (19) отримуємо розрахункову формулу

$$\tau_\mu = \tau_s \cdot \left( l_\phi / l_\gamma \right)^2 \cdot \frac{\mu_\gamma \cdot (n + 1) \cdot (n + 2)}{2 \cdot \mu_s \cdot (p \cdot n + 1)} \quad (22)$$

Відношення  $p$  при точінні конструкційних сталей найбільш часто складало 0,5 і не перебільшувало 0,6 [20, 21].

Одержана формула зв'язує дотичні напруження на пластичному контакті стружка-лезо  $\tau_\mu$  з дотичними напруженнями в площині зсуву  $\tau_s$  і призначена для точного розрахунку сили тертя  $F_\gamma$  (17) на передній поверхні леза.

Реалізація і аналіз.

Емпіричні залежності складових сили різання (4) щодо базових за оброблюваністю сталей та застосуванню твердих сплавів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів пропорційності  $C_p$

(чисельник – сталь 45,  $\sigma_B = 750$  МПа, – твердий сплав Т15К6;

знаменник – сталь 12Х18Н9Т,  $\sigma_B = 600$  МПа, – твердий сплав ВК8)

та показників степені  $x$  –  $u$  залежності (4) при  $\varphi = \varphi' = 45^\circ$  і сухому різанні [10, 14]

Складові сили різання, $H$	$C_p$	$x$	$y$	$-z$	$\eta$	$v$	$u$
		$t$ , мм	$s$ , мм/об	$v$ , м/с	$\left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)$	$(1 + r)$ , мм	$(1 + h)$ , мм
Дотична $P_z$	1560/1790	1,00	0,75	0,15	1,1	0,1	0,4
Радіальна $P_y$	620/809	0,90	0,60	0,30	2,8	0,3	1,4
Осьова $P_x$	437/460	1,00	0,50	0,40	2,4	-0,2	1,2

Порядок і результати розрахунків елементних показників для середини інтервалу застосування параметрів процесу різання зведені в табл. 2.



Таблиця 2

Значення елементних показників процесу точіння сталей 45 і 12Х18Н9Т  
(глибина  $t = 2,8$  мм, радіус  $r = 1$  мм, ширина зрізу  $b = 4$  мм, відношення  $p = 0,5$ )

Найменування параметрів і показників процесу			Умови точіння і розрахункові значення для		
			сталі 45	сталі 12Х18Н9Т	
Режими різання і геометрія леза	подача $s$ , мм/об		0,35	0,44	
	швидкість $v$ , м/с		2	1	
	кут $\gamma$ , град.		10	15	
Сили різання при $r = 0, h = 0$	дотична $P'_z$	(4), Н	1575	2206	
	нормальна $P'_n$		640	920	
Зона стружкоутворення	товщина $a$ , мм		0,25	0,31	
	коефіцієнт $K_a$		2	1,8	
	кут $\phi$ (9), град.		28	32	
	довжина $l_\phi$ , мм		0,53	0,59	
	коефіцієнт $\mu_s$		0,83	0,71	
	кут $\rho_s$ (10), град.		39,8	35,4	
	напруження $\tau_s$ (13), МПа		514	586	
Передня поверхня	довжина $l_\gamma$ (11), мм		0,99	1,12	
	показник $n$ (8)		2,12	1,65	
	напруження	$\sigma_\gamma$ (14),	МПа	363	422
		$\sigma_{0\gamma}$ (15),		1132	1118
	коефіцієнт $\mu_\gamma$ (21)		0,63	0,77	
	напруження $\tau_\mu$ (22), МПа		349	466	

Залежність досліджуваних показників від найвпливовішого переднього кута  $\gamma$  наведена в табл. 3 для сталі 45 і в табл. 4 для сталі 12Х18Н9Т.

Розрахунки показали, що сталь 45 перлітного класу з показником степені  $n = 1,39 - 2,18$  і коефіцієнтом тертя-зсуву  $\mu_s = 0,83$  у порівнянні з аустенітною сталлю 12Х18Н9Т більш низької оброблюваності з  $n = 1,65 - 1,86$  і  $\mu_s = 0,71$  має в цілому більші значення  $n$  і  $\mu_s$ .

По дотичним напруженням  $\tau_s$ , середнім  $\sigma_\gamma$  та максимальним  $\sigma_{0\gamma}$  нормальним напруженням, коефіцієнту тертя-ковзання  $\mu_\gamma$  і дотичним напруженням  $\tau_\mu$  більші значення має сталь 12Х18Н9Т.

Зі збільшенням переднього кута  $\gamma$  довжина площини зсуву  $l_\phi$ , дотичні напруження  $\tau_s$ , довжина контакту стружки з лезом  $l_\gamma$  середні  $\sigma_\gamma$  та максимальні  $\sigma_{0\gamma}$  нормальні напруження зменшуються, а коефіцієнт тертя-ковзання  $\mu_\gamma$ , дотичні напруження  $\tau_\mu$  – збільшуються.

Таблиця 3

Значення елементних показників процесу точіння сталі 45  
(товщина зрізу  $a = 0,25$  мм, ширина зрізу  $b = 4$  мм, швидкість  $v = 2$  м/с,  
коефіцієнт  $\mu_s = 0,83$  та кут тертя-зсуву  $\rho_s = 39,8$  град.)

Позначення показників			Результати визначення при		
			куті $\gamma$ , град.		
			0	10	20
Сили різання при $r = 0, h = 0$	дотична $P'_z$	(4), Н	1791	1575	1358
	нормальна $P'_n$		880	640	450
Коефіцієнт потовщення $K_a$			2,25	2,00	1,75
Кут зсуву $\phi$ (9), град.			24,0	28,0	33,7
Довжина площини зсуву $l_\phi$ , мм			0,61	0,53	0,45
Дотичні напруження $\tau_s$ (13), МПа			524	514	490
Довжина контакту $l_\gamma$ (11), мм			1,15	0,99	0,90
Показник степені $n$ (8)			1,39	2,12	2,18
Середні напруження $\sigma_\gamma$ (14), МПа			396	363	312
Максимальні напруження $\sigma_{0\gamma}$ (15), МПа			946	1132	992
Коефіцієнт тертя-ковзання $\mu_\gamma$ (21)			0,49	0,63	0,79
Дотичні напруження $\tau_\mu$ (22), МПа			216	349	371

Таблиця 4

Значення елементних показників процесу точіння сталі 12Х18Н9Т (товщина  
зрізу  $a = 0,31$  мм, ширина зрізу  $b = 4$  мм, швидкість  $v = 1$  м/с, коефіцієнт  
 $\mu_s = 0,71$  та кут тертя-зсуву  $\rho_s = 35,4$  град.)

Позначення показників			Результати визначення при		
			куті $\gamma$ , град.		
			5	15	25
Сили різання при $r = 0, h = 0$	дотична $P'_z$	(4), Н	2541	2206	1954
	нормальна $P'_n$		880	640	450
Коефіцієнт потовщення $K_a$			2,00	1,80	1,60
Кут зсуву $\phi$ (9), град.			27	32	36,6
Довжина площини зсуву $l_\phi$ , мм			0,68	0,59	0,52
Дотичні напруження $\tau_s$ (13), МПа			616	586	572
Довжина контакту $l_\gamma$ (11), мм			1,27	1,12	1,05
Показник степені $n$ (8)			1,86	1,65	1,86
Середні напруження $\sigma_\gamma$ (14), МПа			476	422	358
Максимальні напруження $s$ (15), МПа			1361	1118	1024
Коефіцієнт тертя-ковзання $\mu_\gamma$ (21)			0,63	0,77	0,93
Дотичні напруження $\tau_\mu$ (22), МПа			448	466	525

Певної закономірності зміни функції показника степені  $n$  від впливу кута  $\gamma$  не встановлено.

Усі функції  $\sigma_l(1)$  за  $n > 1$  мають ввігнуту форму епюр розподілу нормальних напружень на довжині контакту  $l_\gamma(11)$ .

Більш достовірно сили різання розраховувати через об'єднуючу характеристику оброблюваних сталей – істинний опір розриву [18, 22, 23]

$$S_B = \sigma_B \cdot (1 + \delta),$$

де  $\sigma_B$  – тимчасовий опір при розтягуванні;  $\delta$  – відносне видовження.

При  $\sigma_B = 750$  МПа і  $\delta = 0,17$  для нормалізованої сталі 45 істинний опір розриву дорівнює 877 МПа, при  $\sigma_B = 600$  МПа і  $\delta = 0,4$  для сталі 12Х18Н9Т –  $S_B = 840$  МПа.

По даним табл. 2 встановлені наступні співвідношення:

для сталі 45  $\sigma_{0\gamma}/S_B = 1,3$ ,  $\tau_s/S_B = 0,6$ ,  $\tau_\mu/\tau_s = 0,6$ ;

для сталі 12Х18Н9Т  $\sigma_{0\gamma}/S_B = 1,33$ ;  $\tau_s/S_B = 0,7$ ,  $\tau_\mu/\tau_s = 0,8$ .

### Висновки.

1. Відмінною особливістю формули визначення показника степені функції розподілу нормальних напружень на передній поверхні леза є введення значення кута тертя-зсуву в площині зсуву замість коефіцієнта тертя-ковзання стружки з лезом.

2. Основою формули визначення дотичних напружень на пластичному контакті стружка-лезо є значення дотичних напружень в площині зсуву, які в залежності від умов різання змінюються не суттєво.

3. Сталь 45 (перлітного класу) у порівнянні зі сталлю 12Х18Н9Т (аустенітного класу) має більші значення показника степені функції розподілу нормальних напружень і коефіцієнту тертя-зсуву в площині зсуву, а менші значення дотичних напружень в площині зсуву, середніх і максимальних нормальних напружень, коефіцієнту тертя-ковзання стружки по лезу і дотичних напружень на пластичному контакті.

4. Дотичні напруження на пластичному контакті відносно дотичних напружень в площині зсуву в першому наближенні дорівнюють  $\tau_\mu \approx 0,6 \cdot \tau_s$  для сталі 45 і  $\tau_\mu \approx 0,8 \cdot \tau_s$  для сталі 12Х18Н9Т.

5. Збільшення переднього кута приводить до однозначного зменшення довжини площадки зсуву та довжини контакту стружки з лезом і збільшення коефіцієнту тертя-ковзання стружки з лезом та дотичних напружень на пластичному контакті стружка-лезо.

### Перелік посилань

1. Зорев, Н.Н. (1963) О взаимодействии процессов в зоне стружкообразования и в зоне контакта передней поверхности инструмента. *Вестник машиностроения*, 12.
2. Губкин, С.И. (1960) *Пластическая деформация металлов. Т.III. Теория пластической обработки металлов. Глава IV. Теория резания металлов.* (с. 237 – 301). Металлургиздат.
3. Полетика, М.Ф. (1969) *Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента.* Машиностроение.

4. Бетачели, А.И. (1969) *Хрупкая прочность режущей части инструмента*. Изд. ГПИ.
5. Исаев, А.И. (1950) *Процесс образования поверхностного слоя*. Машгиз.
6. Клушин, М.И. (1952) *Резание металлов*. Машгиз.
7. Грановский, Г.И., Грудов, П.П. & Кривоухов, В.А. (1954) *Резание металлов*. Машгиз.
8. Гордон, М.Б. (1972) *Исследование трения и смазки при резании металлов*. В кн.: *Трение и смазка при резании металлов*. Изд. ЧГУ.
9. Остафьев, В.А. (1979) *Расчет динамической прочности режущего инструмента*. Машиностроение.
10. Кравченко, Ю.Г., Дербаба, В.А. & Крюкова, Н.В. (2015) К вопросу эмпирического определения напряжений и коэффициентов трения при стружкообразовании. *Резание и инструмент в технологических системах. Междун. науч.-техн. сб.*, 85, 137–148.
11. Бронштейн, И.Н. & Семендяев, К.А. (1962) *Справочник по математике для инженеров и учащихся*. ГИФМЛ.
12. Кравченко, Ю.Г. & Дербаба, В.А. (2020) Патент України на корисну модель UA 146482. Київ: Український інститут інтелектуальної власності.
13. Кравченко, Ю.Г. & Дербаба, В.А. (2017) Патент України на винахід UA 115833. Київ: Український інститут інтелектуальної власності.
14. Кравченко, Ю.Г. & Дербаба, В.А. (2020) Патент України на корисну модель UA 140418. Київ: Український інститут інтелектуальної власності.
15. Кравченко, Ю.Г., Дербаба, В.А. & Пугач, Р.С. (2018) Патент України на винахід UA 118302. Київ: Український інститут інтелектуальної власності.
16. Резников, А.Н. (1968). *Теплофизика резания*. Машиностроение.
17. Армарего, И.Д. & Браун, Р.Х. (1977) *Обработка металлов резанием*. Машиностроение.
18. Мазур, М.П. (ред.), Внуков, Ю.М., & Доброскок, В.Л. (2011) *Основы теории резания материалов*. Новый світ-2000.
19. Макаров, А.Д. (1966) *Износ и стойкость режущих инструментов*. Машиностроение.
20. Зорев, Н.Н. (1956) *Вопросы механики процесса резания металлов*. Машгиз.
21. Бобров, В.Ф. (1975) *Основы теории резания металлов*. Машиностроение.
22. Золотаревский, В.С. (1974) *Механические испытания и свойства металлов*. Металлургия.
23. Резников, Н.И., (ред.), Жарков, И.Г (1960) *Производительная обработка нержавеющей и жаропрочных материалов*. Машгиз.

#### АННОТАЦИЯ

**Цель работы** – вывести новые формулы показателя степени функции распределения нормальных напряжений и значений касательных напряжений на участке пластического контакта стружки с лезвием.

**Методика исследования** состоит в использовании новой расчетной схемы равновесия стружки и вводе постоянного значения коэффициента трения-сдвига в плоскости сдвига для отдельных групп сталей. Исходной базой для определения параметров формулы показателя и соответствующих напряжений служит разработанная система уравнений эмпирических зависимостей касательной, радиальной, осевой составляющих сил резания от глубины, подачи, скорости резания при определенных переднем угле, радиусе при вершине, величине износа по задней поверхности с определенными показателями степени, коэффициентом размерной пропорциональности и поправочными коэффициентами на марку обрабатываемого материала и условий резания.

Решение состоит из двух разделов:

- определения функции распределения нормальных напряжений;
- определения касательных напряжений пластического контакта на передней поверхности.

Вывод формулы показателя зависимости основан на условии равновесия стружки под действием результирующих сил и моментов сил со стороны плоскости сдвига и со стороны передней поверхности.

**Результаты исследований.** Сталь 45 (перлитного класса) в сравнении со сталью 12X18H9T (аустенитного класса) имеет большие значения показателя степени функции распределения нормальных напряжений и коэффициента трения-сдвига в плоскости сдвига, а меньшие значения по касательным напряжениям в плоскости сдвига, средним и максимальным нормальным напряжениям, коэффициенту трения-скольжения стружки по лезвию и касательным напряжениям на пластическом контакте.

Увеличение переднего угла приводит к однозначному уменьшению длины площадки сдвига и длины контакта стружки с лезвием, а также к увеличению трения-скольжения стружки с лезвием и касательных напряжений на пластическом контакте стружка-лезвие.

**Научная новизна.** Новизна формулы показателя состоит во введении угла трения-сдвига в плоскости сдвига, который в отличие от коэффициента трения-скольжения на передней поверхности в большей мере учитывает физико-механические свойства стали и практически мало зависит от режимных и геометрических параметров и контактных явлений процесса резания.

**Практическое значение.** Полученная формула связывает касательные напряжения на пластическом контакте стружка-лезвие с касательными напряжениями в плоскости сдвига и предназначена для точного расчета сил трения на передней поверхности лезвия.

**Ключевые слова:** касательные и нормальные напряжения, плоскость сдвига, передний угол, угол трения-сдвига, показатель зависимости распределения.

### ABSTRACT

**The purpose of this paper** is to derive new formulas for the exponent of distribution function for normal stresses and values of shear stresses along the plastic blade-to-chip contact area.

**The research technique** consists in using a new design pattern for the equilibrium of the chips and introducing a constant value of the shear friction factor in the shear plane for individual groups of steels. The starting basis for determining the parameters of index equitation and corresponding stresses is the developed system of equations of empirical dependences of the tangential, radial and axial components of the cutting forces on the depth, feed and cutting speed at certain front rake angle and radius at the vertex, the rate of wear along the rear surface with certain exponents, the dimensional proportionality factor and correction factors for the grade of the process material and cutting conditions.

There are two decision options:

- Determination of the distribution function for normal stresses;
- Determination of shear stresses of plastic contact on the front surface.

The derivation of formula for the dependence index is based on the conditions of equilibrium of the chips under the action of resulting forces and moments of forces from the side of the shear plane and from the side of the front surface.

**Research results.** Steel 45 (pearlite class) in comparison with steel 12KH18N9T [12X18H9T] (austenitic class) has larger values of the exponent of distribution function for normal stresses and shear friction factor in the shear plane, and lower values of shear stresses in the shear plane, average and maximum normal stresses, coefficient of sliding friction of chips along the blade and shear stresses on the plastic contact area.

An increase in the front rake angle leads to an unambiguous decrease in the length of the shear area and the length of blade-to-chip contact area, as well as an increase in the sliding friction of the chips along the blade and the shear stresses on the plastic blade-to-chip contact area.

**Scientific novelty.** The novelty of the index equitation consists in the introduction of the shear friction angle in the shear plane, which, in contrast to the coefficient of sliding friction on the front surface, in a large measure takes into account the physical and mechanical properties of steel and depends almost not at all on the operating parameters, geometric parameters and contact phenomena of the cutting process.

**Practical importance.** The resulting formula connects the shear stresses along the plastic blade-to-chip contact area with the shear stresses in the shear plane, and it is intended to make careful calculation of the friction forces on the front surface of the blade.

**Keywords:** *shear stress and normal stress, shear plane, front rake angle, shear friction angle, distribution dependence index.*