

© О.Л. Войчишен¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ КУТА ЗСУВУ ПРИ СТРУЖКОУТВОРЕННІ ЧЕРЕЗ СКЛАДОВІ СИЛИ РІЗАННЯ

© O. Voichyshen¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DETERMINATION OF THE SHEAR ANGLE DURING CHIP FORMATION THROUGH THE COMPONENTS OF THE CUTTING FORCE

Мета. Провести порівняльні розрахунки для кута зсуву по найбільш поширеним формулам відомих авторів та вивести нову спрощену формулу визначення кута зсуву при стружкоутворенні на прикладі механічної обробки для окремих груп сталей.

Методика. Дослідження базується на застосуванні аналітично-ймовірнісних способів розрахунку кута зсуву по емпіричній формулі на основі складових сили різання при гострому лезі і постійному значенні коефіцієнта тертя-зсуву, що адекватно відповідає значенням найбільш розповсюдженої формули на основі коефіцієнта потовщення стружки.

Результати. Одержана формула визначення кута зсуву в зоні стружкоутворення. Попередньо встановлена постійність значення коефіцієнта тертя-зсуву для окремих груп сталей. В порівнянні зі сталлю 45 більш пластична аустенітна сталь 12X18H9T має менші значення коефіцієнта тертя-зсуву. По мірі росту швидкості різання і переднього кута леза відбувається відповідне збільшення кута зсуву.

Наукова новизна. Виконано дослідження і встановлено параметричний взаємозв'язок кутів стружкоутворення. Розроблені функціональні залежності складових сили різання від режимних і геометричних параметрів процесу різання, встановлена постійність значення коефіцієнта тертя-зсуву в площині зсуву і виведена нова формула визначення кута зсуву. Це дає можливість визначати указані кути без застосування трудомісткого динамометрування складових сили різання при гострому лезі різця в процесі механічної обробки деталі.

Практична цінність. Застосування емпіричної формули розрахунку кута зсуву дозволяє виключити експериментальне визначення коефіцієнта потовщення стружки, а за рахунок метода «зворотнього» розрахунку складових сили різання при гострому лезі відмовитися від трудомісткого динамометрування складових сили різання в кожному випадку і для окремих груп оброблювальних матеріалів.

Ключові слова: металообробка, стружкоутворення, кут зсуву, сила різання, коефіцієнт тертя-зсуву, швидкість різання, передній кут.

Вступ. В основі процесу різання металів знаходиться пластична деформація зсуву з утворенням кута текстури стружки. Кут зсуву – кут нахилу умовної площини зсуву до площини різання.

Процес різання характеристик такими макро-показниками як складові сили різання, температура різання, період стійкості інструменту, шорсткість обробленої поверхні заготовки і продуктивність зрізання припуску в цілому.

Параметри режиму різання і геометрії леза, коефіцієнт потовщення (вкорочення) стружки, кут зсуву, довжина контакту стружка-лезо, напруження і коефіцієнт тертя на контактних поверхнях леза слугують в якості елементних показників процесу лезової обробки і використовується при розрахунках складових сили різання, густини теплових джерел, дослідженнях контактних явищ та оптимізації режимних і геометричних параметрів процесу [1–3].

При цьому кут зсуву представляється головним елементним показником процесу стружкоутворення і залишається складною проблемою аналітичного розрахунку.

Найбільш широкого розповсюдження при визначенні кута зсуву набула формула І.А. Тіме [2, 3]

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma}{(K_a - \sin \gamma)} \quad (1)$$

на основі коефіцієнта потовщення стружки $K = a_c / a$ ($a = S \cdot \sin \phi$ – товщина зрізу, S – подача, ϕ – головний кут в плані; a_c – товщина стружки або коефіцієнти вкорочення $K_L = L / L_c$ (L і L_c – довжина зрізу і стружки).

Недоліки реалізації – потребує в кожному випадку проведення експерименту і значних трудозатрат.

При емпіричному визначенні кута зсуву також заслуговує уваги структура формули [4] співвідношення дотичних напружень в площині зсуву і в контакті стружка-лезо

$$\frac{\tau_s}{\tau_\gamma} \cdot \frac{l_s}{l_\gamma} = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{M_\gamma} - \sin(\phi - \gamma),$$

яка аналітично пов'язує взаємодію указаних елементних процесу стружкоутворення: τ_s – дотичні напруження в площині зсуву; τ_γ – дотичні напруження в контакті стружка-лезо; l_s – довжина площини зсуву; l_γ – довжина контакту стружки з лезом; ϕ – кут зсуву; M_γ – коефіцієнт тертя між стружкою і лезом; γ – передній кут леза.

Кут ϕ і коефіцієнт M_γ виступають саморегуляторами процесу утворення стружки із забезпеченням мінімальної витрати механічної енергії.

Виведена формула наочно свідчить складну залежність різниці кутів $(\phi - \gamma)$ від сили зсуву $T_s = \tau_s \cdot l_s \cdot b$ (b – ширина зрізу); сили тертя стружки на передній поверхні леза $F_\gamma = \tau_\gamma \cdot l_\gamma \cdot b$ і коефіцієнта тертя M_γ

$$\frac{T_s}{F_\gamma} = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{M_\gamma} - \sin(\phi - \gamma). \quad (2)$$

Недолік формули (2) полягає в неможливості прямого розрахунку кута ϕ на основі даних T_s , F_γ , M_γ , γ , а заслуга – у виявленні нового напрямку визначення кута ϕ через складові сили стружкоутворення.

Мета роботи – виведення нової формули і спрощення визначення кута зсуву в зони стружкоутворення.

Постановка задачі. Спрощення способу визначення кута зсуву досягається введенням емпіричних залежностей складових сили різання при гострому лезі від режимних і геометричних параметрів процесу різання, установленням постійного значення коефіцієнта тертя-зсуву в площині зсуву і виводу відповідної формули для кута зсуву, що виключає в кожному випадку трудомістких експериментів по визначенню коефіцієнта потовщення стружки або проведенню динамометрування складових сили різання [2, 3].

Вихідною базою для визначення дотичної P_z , радіальної P_y і осьової P_x складових сили різання від режиму точіння (глибини t , подачі S , швидкості V) і геометрії леза (переднього кута γ , радіусу при вершині r , величині зносу h по задній поверхні) служила розроблена система рівнянь [4, 5] типу

$$P_i = C_p \cdot t^x \cdot S^y \cdot V^z (1 - \gamma/90)^n \cdot (1 + r)^v \cdot (1 + h)^u \cdot K_{pi}, \quad (3)$$

з напрацьованими показниками $x - u$, коефіцієнтом розмірної пропорційності C_p і поправочними коефіцієнтами на марку K_m і міцність K_σ оброблюваного матеріалу, марку інструментального матеріалу K_i , кута в плані K_ψ і нахилу головної різальної кромки K_λ та мастильно-охолоджувальне середовище K_o ($K_{pi} = K_m \cdot K_\sigma \cdot K_i \cdot K_\psi \cdot K_\lambda \cdot K_o$).

Для умов непрямокутного різання нормальна складова різання дорівнює

$$P_n = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}. \quad (4)$$

Така структура системи рівнянь (3) дозволяє обчислювати сили P_z' і P_n' при гострому лезі ($r = 0$ і $h = 0$) методом «зворотнього» розрахунку.

Основна частина. Розрахункова схеми визначення при зсуву ϕ зображена на рис. 1: a і a_c – товщина зсуву і стружки; A γ – передня поверхня леза; γ – передній кут, T_s і T_n – дотична в нормальна проєкції результуючої сили стружкоутворення T на площину різання P_n і основну площину P_v ; P_z' і P_n' – дотична і нормальна складові сили різання при гострому лезі (величина зносу h і сили тертя на задній поверхні леза теоретично дорівнюють нулю).

Між складними сили зсуву T_s , T_n і сили різання при гострому лезі P_z' , P_n' існує згідно схеми рис. 1 зв'язок серед кут зсуву ϕ [6]. Формула коефіцієнта тертя-зсуву μ_s виводиться в результаті проєціювання сил P_z' і P_n' в напрямку дотичної T_s і нормальної T_n сил зсуву

$$\left. \begin{aligned} T_s &= P_z' \cdot \cos \phi - P_n' \cdot \sin \phi \\ T_n &= P_z' \cdot \sin \phi + P_n' \cdot \cos \phi \end{aligned} \right\}$$

звідки

$$\mu_s = \frac{T_s}{T_n} = \frac{P_z' - P_n' \cdot \operatorname{tg} \phi}{P_z' \cdot \operatorname{tg} \phi + P_n'} \quad (5)$$

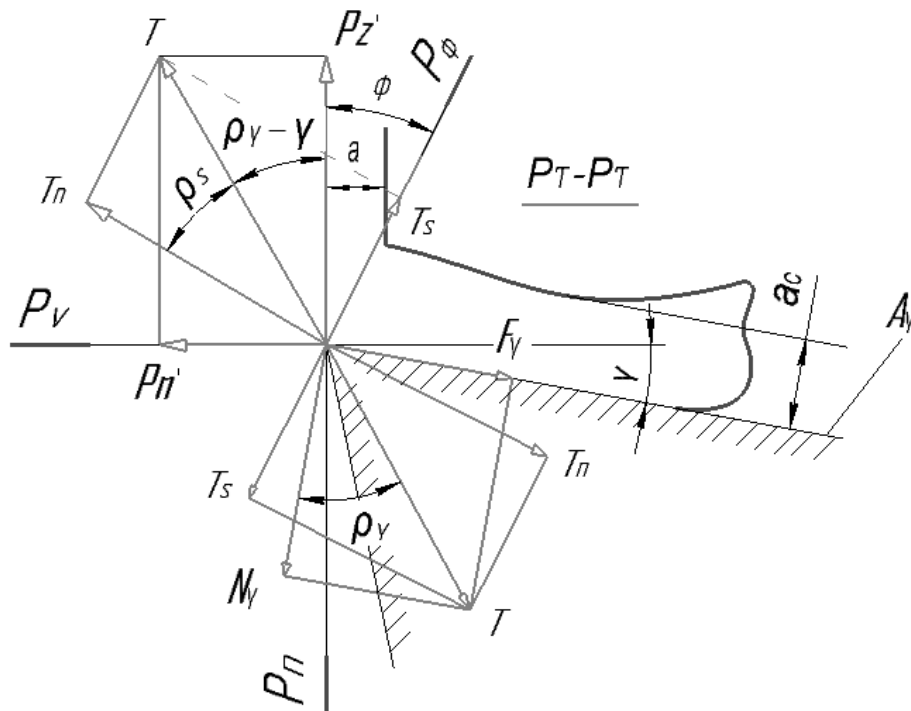


Рис. 1. Розташування проєкцій сили стружкоутворення T і кута зсуву ϕ в системі координат основної площини P_v , площини різання P_n і головної січної площини P_t

Кут тертя-зсуву $\rho_s = \arctg \mu_s$ входить в суму взаємодії кутів стружкоутворення [7].

$$\rho_s + \phi + \rho_\gamma - \gamma = 90^\circ. \quad (6)$$

Експериментально доказано, що для окремих груп оброблюваних сталей сума кутів зсуву ϕ і дії $W = S\gamma - \gamma(S\gamma = \arctg M\gamma)$ є величиною постійною $\phi + S\gamma - \gamma = c$ [8].

Тоді згідно рівності (6) величина кута тертя-зсуву також повинна бути постійною

$$\rho_s = 90 - (\phi + S\gamma - \gamma) = \text{const}, \quad (7)$$

Для перевірки такої рівності (7) і з метою визначення коефіцієнта μ_s (5) була поставлена серія відповідних експериментів при точінні сталей 45 в 12X18H9T з різним рівнем оброблюваності. Умова проведення експериментів і результати дослідження коефіцієнта тертя-зсуву μ_s в залежності від швидкості різання u і переднього кута γ наведені в таблицях 1 і 2.

Аналіз отриманих результатів таблиць 1 і 2 при куті ϕ (1) і на основі розрахунків P_z' (3) і P_n' (4) підтвердив постійність значенні коефіцієнта $\mu_s = \text{const}$ (5) для окремих груп оброблюваних сталей.

На цій підставі кут зсуву ϕ із (5) визначається після математичних перетворень

$$P_z \cdot \tg \phi \cdot \mu_s + P_n' \cdot \tg \phi = P_z' - P_n' \cdot \mu_s$$

по формулі

$$\tg \phi = \frac{P_z' - P_n' \cdot \mu_s}{P_z' \cdot \mu_s + P_n'}. \quad (8)$$

Таким чином була виведена нова формула розрахунку кута зсуву на основі емпіричних залежностей складових сили різання при гострому лезі від параметрів процесу різання і на підставі постійності значення коефіцієнта тертя-зсуву для окремих груп оброблюваних сталей.

Реалізація і аналіз. З метою перевірки виведеної формули φ (8) була поставлена серія відповідних експериментів при точінні сталей 45 і 12Х18Н9Т з різним рівнем оброблюваності.

Емпіричні залежності P_i (3) для визначення сили різання по даним [2, 4, 5] проведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів C_p для сталей 45 = 750 МПа, твердий сплав Т15К6) і 12Х18Н9Т = 600 МПа, твердий сплав ВК8) та показників степені $x - u$ при $\Psi = 45^\circ$, $\lambda = 0$ в сухому різанні ($K_p = 1$)

Найменування сил, Н	C_p		x	y	$-z$	η	v	u
	сталь		t , мм	S , мм/об	v , м/с	$1 - \gamma/90$	$1 + r$, мм	$1 + h$, мм
	45	12Х18Н9Т						
Дотична P_z	1560	1790	1	0,75	0,15	1,1	0,1	0,4
Радіальна P_y	620	809	0,9	0,6	0,3	2,8	0,3	1,4
Осьова P_x	437	460	1	0,5	0,4	2,4	-0,2	1,2

Умови проведення експериментів і результати дослідження кута φ по формулах (1) і (8) в залежності від швидкості різання v і переднього кута γ наведені в таблицях 2 і 3.

Таблиця 2

Розрахункові значення кута зсуву φ при сухому точінні сталі 45 твердим сплавом Т15К6 ($t = 2,8$ мм, $S = 0,35$ мм/об, $a = 0,25$ мм, $r = 0$, $h = 0$)

Позначення параметрів		Результати визначення			
А. Вплив швидкості v , м/с ($\gamma = 10^\circ$)		0,5	1,25	2	2,75
Коефіцієнт потовщення K_a		2,7	2,2	2	1,9
Кут зсуву φ , град. (1)		21,3	25,9	28	29,7
Складові сили різання, Н	Дотична P_z' (3)	1936	1688	1575	1499
	Нормальна P_n' (4)	1032	751	640	574
Коефіцієнт тертя-зсуву M_s (5)		0,86	0,85	0,83	0,82
Кут зсуву φ , град. (8), $M_s = 0,83$		22,3	26,3	28,2	29,4
Б. Вплив переднього кута γ , град. ($v = 2$ м/с)		-10	0	10	20
Коефіцієнт потовщення K_a		2,5	2,25	2	1,75
Кут зсуву φ , град. (1)		20,2	24	28	33,7
Складові сили різання, Н	Дотична P_z' (3)	2011	1791	1575	1358
	Нормальна P_n' (4)	1164	880	640	450
Коефіцієнт тертя-зсуву M_s (5)		0,83	0,83	0,83	0,78
Кут зсуву φ , град. (8), $M_s = 0,83$		20,2	24,2	28,2	32

Таблиця 3

Розрахункові значення кута зсуву φ при сухому точінні сталі 12X18H9T
твердим сплавом BK8 ($t = 2,8$ мм, $S = 0,44$ мм/об, $a = 0,31$ мм, $r = 0$, $h = 0$)

Позначення параметрів		Результати визначення			
А. Вплив швидкості v , м/с ($\gamma = 15^\circ$)		0,5	1	1,5	2
Коефіцієнт потовщення K_a		2	1,8	1,7	1,65
Кут зсуву φ , град. (1)		29	32	33,8	
Складові сили різання, Н	Дотична P_z' (3)	2458	2206	2027	1995
	Нормальна P_n' (4)	1174	920	812	738
Коефіцієнт тертя-зсуву M_s (5)		0,71	0,71	0,70	0,70
Кут зсуву φ , град. (8), $M_s = 0,71$		29,1	31,2	32,8	34,3
Б. Вплив переднього кута γ , град. ($v = 1,5$ м/с)		-5	5	15	25
Коефіцієнт потовщення K_a		2,3	2	1,8	1,6
Кут зсуву φ , град. (1)		22,6	27	32	37,5
Складові сили різання, Н	Дотична P_z' (3)	2872	2541	2206	1954
	Нормальна P_n' (4)	1748	1298	920	636
Коефіцієнт тертя-зсуву M_s (5)		0,73	0,73	0,71	0,67
Кут зсуву φ , град. (8), $M_s = 0,71$		23,3	27,6	31,2	36,6

При визначенні кута φ (8) виявлено постійність значення коефіцієнта тертя-зсуву μ_s (5), середнє значення якого дорівнює $\mu_s = 0,83$ для сталі 45 і $\mu_s = 0,71$ для сталі 12X18H9T.

У порівнянні з експериментальними даними по куту φ (1) результати емпіричного визначення кута φ (8) на основі складових сили різання P_z' і P_n' при гострому лезі показали близьке сходження (3% для сталі 45 і 1% для сталі 12X18H9T).

Адекватність отриманих даних по формулах φ (1) і φ (8) указує на доцільність визначення кута φ (8) через емпіричні значення дотичної P_z' (3) і нормальної P_n' (4) складових сили різання при гострому лезі і через попередньо встановлений(установлений?) постійний коефіцієнт тертя-зсуву μ_s (5).

Пропонуємий напрямок розрахунків включає використання достатньо напрацьованої інформаційної бази технічної літератури по силових залежностях процесу різання для більшості оброблюваних матеріалів.

По мірі росту швидкості різання v і переднього кута леза γ кут зсуву φ (8) також збільшується.

Висновки.

1. Установлено постійність значення коефіцієнту тертя-зсуву для окремих груп сталей. В порівнянні зі сталлю 45 більш пластична аустенітна сталь 12X18H9T має менші значення коефіцієнта тертя-зсуву.

2. Кут зсуву по емпіричній формулі на основі складових сили різання при гострому лезі і постійному значенні коефіцієнта тертя-зсуву адекватно відповідає розрахунковим значенням найбільш розповсюдженої формули на основі коефіцієнта потовщення (вкорочення) стружки.

3. Застосування емпіричної формули розрахунку кута зсуву на основі складових сили різання при гострому лезі дозволяє виключити експериментальне визначення коефіцієнта потовщення стружки, а за рахунок метода «зворотнього» розрахунку складових сили різання при гострому лезі відмовитися від трудоемного динамометрування складових сили різання в кожному випадку.

Перелік посилань

1. Яковенко, І. Е., Пермяков, О. А. & Фесенко, А.В. (2022). *Технологічні основи машинобудування: навчальний посібник для студентів спеціальностей 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування*. НТУ «ХПІ».
2. Добрянський, С.С. & Малафєєв, Ю.М. (2020). *Технологічні основи машинобудування [Електронний ресурс] : підручник для студентів спеціальностей 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування*. КПІ ім. Ігоря Сікорського.
3. Будяк, Р.В., Гіосвягенко, Е.К., Швець, Л.В. & Жученко, Г.А. (2020). *Конструкційні матеріали і технології: навч. посіб.* ФОП Т.П. Барановська.
4. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Збірник наукових праць НГУ*, 63, 123–133. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>
5. Кравченко, Ю.Г. & Дербаб, В.А. (2022). *Спосіб визначення кута зсуву при стружкоутворенні*. (Patent No 126198).
6. Дербаб, В.А., Пацера, С.Т. & Григоренко, В.У. (2022). Особливості механічної обробки зносостійких чавунів. *Збірник наукових праць НГУ*, 71, 217–230. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/71.217>
7. Кравченко Ю.Г., Дербаб В.А. & Смагін Д.В. (2020). Визначення і взаємозв'язок кутів зсуву і тертя при стружкоутворенні. *Збірник наукових праць НГУ*, 61, 193–201. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.193>
8. Щербина, Є.Ю., Дербаб, В.А & Козечко, В.А (2022) Критерії стійкості ріжучого інструменту для висошвидкісної обробки. *Збірник наукових праць НГУ*, 67, 77–95. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/67.077>

ABSTRACT

Purpose. To make comparative calculations for the shear angle according to the most common formulas of well-known authors and to derive a new simplified formula for determining the shear angle during chip formation on the example of machining for certain groups of steels.

Methods. The study is based on the use of analytical and probabilistic methods for calculating the shear angle using an empirical formula based on the cutting force components at a sharp blade and a constant value of the friction-shear coefficient, which adequately corresponds to the values of the most common formula based on the chip thickening coefficient.

Findings. The formula for determining the shear angle in the chip formation zone was obtained. The constant value of the friction-shear coefficient for certain groups of steels was previously established. Compared to steel 45, the more ductile austenitic steel 12H18N9T has lower values of the friction-shear coefficient. As the cutting speed and blade rake angle increase, the shear angle increases accordingly.

The originality. The parametric relationship of chip formation angles was studied and established. Functional dependences of the cutting force components on the operating and geometric parameters of the cutting process were developed, the constancy of the friction-shear coefficient in the shear plane was established, and a new formula for determining the shear angle was derived. This makes it

possible to determine these angles without the use of laborious dynamometry of the cutting force components at a sharp cutter blade during machining of a part.

Practical implementation. The use of an empirical formula for calculating the shear angle eliminates the experimental determination of the chip thickening coefficient, and due to the method of “reverse” calculation of the cutting force components with a sharp blade, it eliminates the laborious dynamometry of the components of the cutting force in each case and for individual groups of machining materials.

Keywords: *metalworking, chip formation, shear angle, cutting force, friction-shear coefficient, cutting speed, leading angle.*