

© Ю.Г. Кравченко¹, В.А. Дербаба¹, Д.В. Смагін¹

¹ Національний технічний університет “Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна

ВИЗНАЧЕННЯ І ВЗАЄМОЗВ’ЯЗОК КУТІВ ЗСУВУ І ТЕРТЯ ПРИ СТРУЖКОУТВОРЕННІ

© Yu. Kravchenko¹, V. Derbaba¹, D. Smagin¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

DETERMINATION AND RELATIONSHIP BETWEEN SHIFT AND FRICTION ANGLES IN CHIPPER FORMATION

Мета. Вивести розрахункові формули суми кутів зсуву, внутрішнього тертя-зсуву в площині зсуву і зовнішнього тертя-ковзання стружки через складові сили різання при гострому лезі. Провести порівняльні розрахунки для кута зсуву по найбільш поширеним формулам відомих авторів та визначити кут тертя стружки через кут зсуву і постійне значення кута тертя-зсуву для окремих груп сталей.

Методика. Дослідження базується на застосуванні аналітично-ймовірнісних способів розрахунків визначення залежності між кутами зсуву, внутрішнього тертя-зсуву в площині зсуву і зовнішнього тертя-ковзання стружки по передній поверхні леза. Величини осьової і нормальної складових визначалися методом динамометрування для конкретних умов різання або на підставі емпіричних залежностей методом «зворотнього розрахунку». Прийнята модель стружкоутворення дозволила методом проєціювання сил тертя і тиску стружки на передній поверхні леза в напрямку дотичної і нормальної складових сили зсуву аналітично отримати формули коефіцієнта тертя-зсуву і суми співвідношення досліджуваних кутів.

Результати. Одержана формула дослідження суми кутів зсуву, внутрішнього тертя-зсуву і зовнішнього тертя-ковзання.

Наукова новизна. Виконано дослідження і встановлено параметричний взаємозв’язок кутів стружкоутворення. Отримані значення і функціональні залежності кутів стружкоутворення призначені для застосування при аналітичному розрахунку сил і температури різання. Експериментально підтверджено, що для окремих груп оброблювальних матеріалів сума кутів зсуву і діє величиною постійною. Доведено, що визначення всіх кутів може виконуватися через обчислення складових сили різання із емпіричних залежностей методом «зворотнього розрахунку». Це дає можливість визначати указані кути без застосування трудомісткого динамометрування складових сили різання при гострому лезі різця.

Практична значимість. Практичний здобуток виявленої постійності кута тертя-зсуву для окремих груп оброблювальних матеріалів міститься в можливості визначити кут тертя і тертя-ковзання із суми кутів через один простий вихідний показник процесу різання – кут зсуву як функції коефіцієнта потовщення стружки.

Ключові слова: точіння сталей, гостре лезо, передня поверхня, стружка, кут зсуву, кут тертя-зсуву, кут тертя-ковзання.

Вступ. Однією з важливих проблем теорії різання, пов’язаних з дослідженням і розрахунками складових сили стружкоутворення і густини теплових потоків через відповідні дотичні напруження [1-4] є визначення кутів нахилу площини зсуву P_ϕ до площини різання P_η (кута зсуву Φ), внутрішнього тертя-зсуву

ρ_s метала в площині зсуву P_ϕ і зовнішнього тертя-ковзання ρ_γ між стружкою і передньою поверхнею леза A_γ .

Розподіл контактних напружень τ_γ і коефіцієнт тертя μ_γ на передній поверхні можуть визначатися на основі роздільних вимірів складових сили різання при гострому лезі за допомогою спеціального динамометричного приладу «розрізний різець» при передньому куті $\gamma=0$ з перпендикулярною [5] і косою [6] лінією рознімання.

Більш точним і простим є визначення середнього значення коефіцієнта тертя μ_γ на основі вимірювання динамометром при точинні дотичної P'_z і нормальної $P'_n = \sqrt{(P'_x)^2 + (P'_y)^2}$ (P'_x , і P'_y – осьова і радіальна) складових сили різання при гострому лезі і різних значеннях переднього кута γ по спеціальній формулі [7, 8].

Для коефіцієнта «внутрішнього тертя» $\mu_s = tg \rho_s$ і напружень τ_s в площині зсуву P_ϕ існує напрямок визначення через дотичну і нормальну складові сили зсуву, які в свою чергу вираховуються через складові P'_z , P'_n сили різання при гострому лезі і експериментальне значення кута зсуву Φ [8, 9].

Найбільш складною проблемою залишається аналітичний розрахунок кута зсуву Φ , в тому числі і по причині зміцнення стружки в залежності від властивостей оброблювального матеріалу, швидкості деформації і температурних явищ [4, 8].

В цілому всі елементні показники процесу стружкоутворення (кут зсуву Φ , коефіцієнт зовнішнього тертя μ_γ , дотичні напруження в площині зсуву τ_s і на передній поверхні τ_γ , довжини площини зсуву l_s і контакту стружки з лезом l_γ) пов'язані співвідношенням [9] між дотичними силами зсуву $T_s = \tau_s \cdot l_s$ і тертя стружки $F_\gamma = \tau_\gamma \cdot l_\gamma$

$$\frac{\tau_s \cdot l_s}{\tau_\gamma \cdot l_\gamma} = \frac{\cos(\Phi - \gamma)}{\mu_\gamma} - \sin(\Phi - \gamma)$$

При цьому кут зсуву Φ є природньо функціонально залежним (параметри τ_γ , l_γ , і μ_γ визначаються експериментально) і виступає саморегулятором забезпечення мінімальної затрати енергії на утворення стружки.

Мета роботи і постановка задачі. Полягає у визначенні залежності між кутами зсуву, внутрішнього тертя-зсуву в площині зсуву і зовнішнього тертя-ковзання стружки по передній поверхні леза.

Для схеми утворення зливної стружки застосована модель пластичної деформації металу з однією умовною площиною зсуву при вільному різанні без наросту на передній поверхні леза.

Розрахункова схема напрямків сил стружкоутворення при гострому лезі (величина фаски зносу і сила тертя на задній поверхні теоретично дорівнює нулю) в площині зсуву P_ϕ і на передній поверхні леза A_γ та розташування відповідних кутів зсуву Φ , тертя-зсуву ρ_s і тертя-ковзання ρ_γ зображені на рис.1.

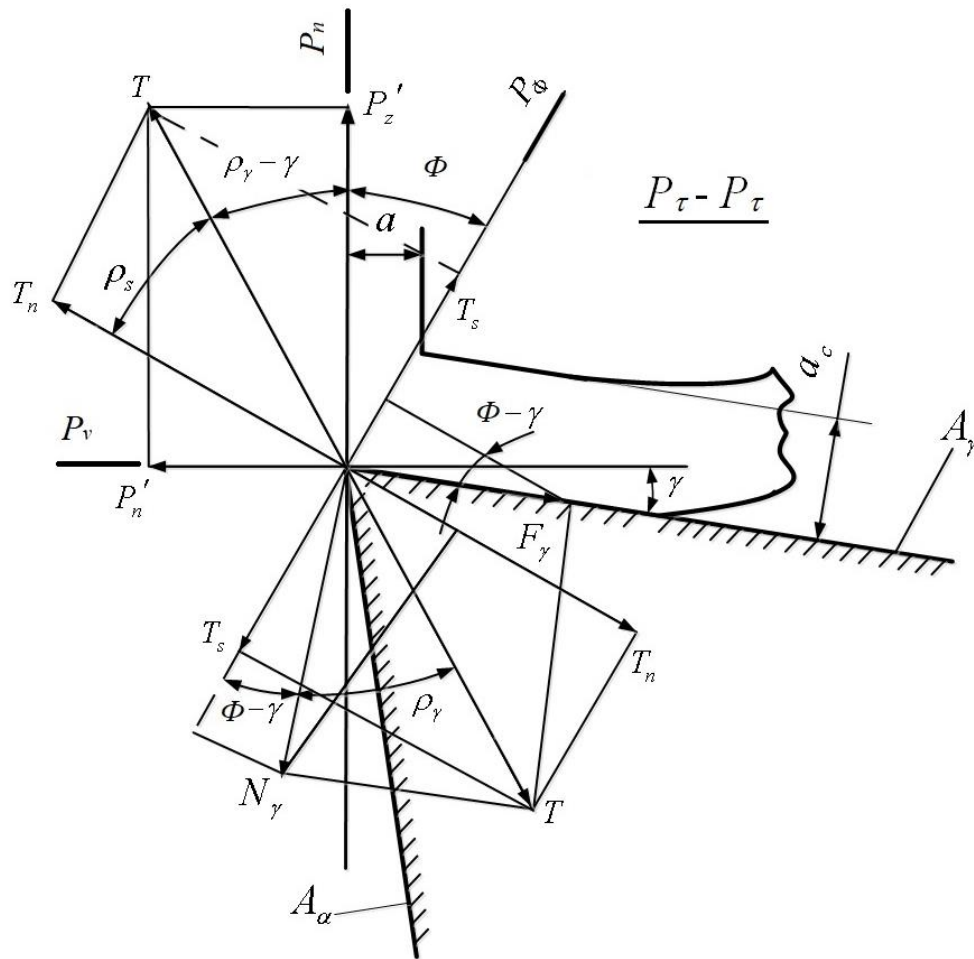


Рис.1. Розташування сил і кутів схеми стружкоутворення в системі координат основної площини P_v , площини різання P_n і головної січної площини P_τ

Схема включає: a і a_c – товщину перетину зрізу і стружки; γ – передній кут леза; T_s і T_n – дотичну і нормальну складові результуючої сили стружкоутворення T ; $\mu_s = T_s / T_n$ і $\rho_s = \arctg \mu_s$ – коефіцієнт і кут тертя-зсуву в площині P_Φ ; F_γ і N_γ – дотичну і нормальну сили тертя стружки на A_γ ; $\mu_\gamma = F_\gamma / N_\gamma$ і $\rho_\gamma = \arctg \mu_\gamma$ – коефіцієнт і кут тертя стружки; P'_z , P'_n – дотичну і нормальну складові сили різання при гострому лезі (проекції сили стружкоутворення T на координатну площину різання P_n і основну площину P_v).

Вихідними даними для розрахунково-дослідної частини служили параметричні результати попередньо виконаної роботи [9].

Основна частина. Зміст роботи складається з трьох блоків. Основою дослідження прийнята система рівнянь рівноваги складових T_s і T_n сили стружкоутворення та F_γ і N_γ сили тертя на передній поверхні A_γ .

1. Сума кутів стружкоутворення.

Проеціювання векторів сил тертя F_γ і тиску N_γ стружки на A_γ в напрямку дотичної T_s і нормальної T_n складових сили зсуву T (рис.1) дає систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} T_s &= N_\gamma \cdot \cos(\Phi - \gamma) - F_\gamma \cdot \sin(\Phi - \gamma) \\ T_n &= N_\gamma \cdot \sin(\Phi - \gamma) + F_\gamma \cdot \cos(\Phi - \gamma) \end{aligned} \right\}$$

з якої отримуємо коефіцієнт тертя-зсуву при внутрішній суцільності оброблюваного матеріалу в площині зсуву P_Φ

$$\mu_s = \frac{T_s}{T_n} = \frac{1 - \operatorname{tg} \rho_\gamma \cdot \operatorname{tg}(\Phi - \gamma)}{\operatorname{tg}(\Phi - \gamma) + \operatorname{tg} \rho_\gamma} = \operatorname{ctg}(\rho_\gamma + \Phi - \gamma), \quad (1)$$

де $\operatorname{tg} \rho_\gamma = \mu_\gamma$ – коефіцієнт тертя на A_γ .

Виразив коефіцієнт μ_s (1) через кут тертя-зсуву $\operatorname{tg} \rho_s$ і через $\operatorname{tg} [90 - (\rho_\gamma + \Phi - \gamma)]$, знаходимо

$$\rho_s + \Phi + \rho_\gamma - \gamma = 90^\circ \quad (2)$$

Роздільно кожен із кутів (2) визначають експериментально:

$$\operatorname{tg} \Phi = \cos \gamma / (k - \sin \gamma) \text{ через коефіцієнт потовщення стружки } k = a_c / a; \quad (3)$$

по формулі І.Тіме [3].

$$\rho_\gamma = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \mu_\gamma \text{ через } \mu_\gamma = (P'_z \cdot \operatorname{tg} \gamma + P'_n) / (P'_z - P'_n \cdot \operatorname{tg} \gamma) \quad (4)$$

по формулі [7] зі значенням P'_z і P'_n при гострому лезі.

Для кута тертя-зсуву ρ_s після проєціювання складових P'_z , P'_n сили різання також в напрямку дотичної $T_s = P'_z \cdot \cos \Phi - P'_n \cdot \sin \Phi$ [8,10] і нормальної $T_n = P'_z \cdot \sin \Phi + P'_n \cdot \cos \Phi$ [8] складових сили зсуву T (рис.1) отримана формула

$$\rho_s = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \mu_s \text{ через } \mu_s = (P'_z - P'_n \cdot \operatorname{tg} \Phi) / (P'_z \cdot \operatorname{tg} \Phi + P'_n) \quad (5)$$

З формули μ_s (5) відповідно слідує

$$\operatorname{tg} \Phi = (P'_z - P'_n \cdot \mu_s) / (P'_z \cdot \mu_s + P'_n), \text{ де } \mu_s = \operatorname{tg} \rho_s, \quad (6)$$

В свою чергу кут тертя-зсуву ρ_s може визначатися для порівняння точності експериментів по Φ (3) і ρ_γ (4) також із суми (2) $\rho_s = 90^\circ + \gamma - \Phi - \rho_\gamma$.

Величини P'_z і P'_n визначаються методом динамометрування для конкретних умов різання або на підставі емпіричних залежностей методом «зворотнього розрахунку» [9].

2. Значення кута зсуву по формулам відомих авторів.

Зіставлення значень кута Φ по найбільш застосованим формулам при однакових вихідних даних кутів ρ_γ і ρ_s , отриманих розрахунково-емпіричним методом [9, табл.2] приведені в табл.1.

Таблиця 1

Формули і значення кута зсуву Φ для сталей 45 ($\gamma=10^\circ$, $\rho_\gamma=32,2$, $\rho_s=39,8$) і 12X18H9T ($\gamma=15^\circ$, $\rho_\gamma=37,6$, $\rho_s=25,4$)

Автор	Формула для Φ	Значення Φ , град	
		Сталь 45	12X18H9T
М.Мерчант [8,11]	$45-0,5(\rho_\gamma-\gamma)$	32,2	33,7
П. Окслі [8]	$50-0,8(\rho_\gamma-\gamma)$	22,2	31,9
Е. Лі і Б.Шаффер [8,11]	$45-(\rho_\gamma-\gamma)$	22,8 ($c=45$)	22,4
М. Зорєв [12]	$c-(\rho_\gamma-\gamma)$	25 ($i_o=50$)	27,4 ($c=50$)
С.Силін [13]	$(i_o-6)\cdot a^{-0,05}-(\rho_\gamma-\gamma)$	28	27,2 ($i_o=53$)
(2) даної статті	$90-\rho_s-(\rho_\gamma-\gamma)$		32

Слід зазначити, що авторська формула Φ (2) структурно включає вплив кута тертя-зсуву ρ_s .

У порівнянні з формулами відомих авторів табл.1 формула Φ (2) забезпечує адекватні результати.

3. Постійність величини кута тертя-зсуву

Експериментально доказано, що для окремих груп оброблювальних матеріалів сума кутів зсуву Φ і дії $\omega = \rho_\gamma - \gamma$ є величиною постійною $\Phi + \rho_\gamma - \gamma = c$ [12,13]. Тоді згідно рівності (2) величина кута тертя-зсуву також повинна бути постійною

$$\rho_s = 90 - (\Phi + \rho_\gamma - \gamma) = const \quad (7)$$

Для перевірки такої рівності (7) була поставлена серія відповідних експериментів при точінні сталей 45 і 12X18H9T з різним рівнем оброблюваності. Умови проведення експериментів і результати дослідження кутів Φ (3), ρ_γ (4), ρ_s (5) і (7) в залежності від швидкості різання v і переднього кута γ наведені в табл.2.

Отримані результати дослідження виявили постійність значення кута тертя-зсуву

$$\rho_s = u \quad (8)$$

для кожної із сталей. Середнє значення і похибка відхилення складали: для сталі 45 $\rho_s = 39,8$ (+1, -1,8); для сталі 12X18H9T $\rho_s = 35,3$ (+1.2, -1.4).

Установлена закономірність відкриває можливість спрощеного визначення кута тертя-зсуву ρ_γ із суми (2) через постійну u (8)

$$\rho_\gamma = 90 + \gamma - u - \Phi \quad (9)$$

Аналіз і реалізація. Прийнята модель стружкоутворення дозволила методом проєціювання сил тертя F_γ і тиску N_γ стружки на передній поверхні леза в напрямку дотичної T_s і нормальної T_n складових сили зсуву аналітично отримати формули коефіцієнта тертя-зсуву μ_s (1) і суми співвідношення досліджуваних кутів (2).

Кожен із суми кутів Φ (3), ρ_γ (4) і ρ_s (5) визначається експериментально окремо.

Розрахункові значення кутів стружкоутворення при сухому точінні сталей 45 (А) і 12Х18Н9Т (Б)

Позначення кутів		Значення кутів			
А. Сталь 45 – твердий сплав Т15К6 (товщина зрізу $a=0,25 \cdot 10^{-3}$ м)					
Швидкість v , м/с ($\gamma=10^\circ$)		0,5	1,25	2	2,75
Φ (3)		21,3	25,9	28	29,7
ρ_γ (4)		37,9	33,8	32,2	31
ρ_s	(5)	40,7	40,4	39,7	39,3
	(7)	40,8	40,3	39,8	39,3
Кут γ , град. ($v=2$ м/с)		-10	0	10	20
Φ (3)		20,2	24	28	33,7
ρ_γ (4)		19,8	26	32,2	38,3
ρ_s	(5)	39,7	39,7	39,7	38
	(7)	40	40	39,8	40
Б. Сталь 12Х18Н9Т – твердий сплав ВК8 (товщина зрізу $a=0,31 \cdot 10^{-3}$ м)					
Швидкість v , м/с ($\gamma=15^\circ$)		0,5	1	1,5	2
Φ (3)		29	32	33,8	34,8
ρ_γ (4)		40,5	37,6	36,3	35,3
ρ_s	(5)	35,4	35,4	34,9	34,9
	(7)	35,5	35,4	34,9	34,9
Кут γ , град. ($v=1$ м/с)		-5	5	15	25
Φ (3)		22,6	27	32	37,5
ρ_γ (4)		26,3	31,5	37,6	43,5
ρ_s	(5)	36,1	36	35,4	33,9
	(7)	36,1	36,5	35,4	34

Для визначення кута тертя-зсуву ρ_s отримана емпірична формула (5) на основі співвідношення дотичної P'_z і нормальної P'_n складових сили різання при гострому лезі і кута Φ зсуву. З урахуванням постійності коефіцієнта тертя-зсуву $\mu_s = \tan \rho_s = \tan \gamma$ (8) для окремих груп сталей кут зсуву може визначатися по формулі Φ (6).

Практичний здобуток виявленої постійності $\rho_s = \gamma$ (8) міститься в можливості визначити кут тертя ρ_γ (9) із суми кутів (2) через один простий вихідний показник процесу різання – кут зсуву Φ як функції коефіцієнта k_a потовщення стружки по формулі (3). Визначення всіх кутів ρ_γ (4), ρ_s (5) і Φ (6) може виконуватися через обчислення складових P'_z і P'_n сили різання із емпіричних залежностей методом «зворотнього розрахунку» [9,15]. Це дає можливість визначати указані кути без застосування трудомісткого динамометрування складових сили різання при гострому лезі різця.

Новизна роботи захищена патентом на винахід [14] і патентом на корисну модель [15].

Таким чином було виконано дослідження і встановлено параметричний взаємозв'язок кутів стружкоутворення. Отримані значення і функціональні залежності кутів стружкоутворення призначені для застосування при аналітичному розрахунку сил і температури різання.

Висновки

1. Отримана формула суми співвідношення кутів зсуву, внутрішнього тертя-зсуву в площині зсуву і зовнішнього тертя-ковзання стружки.

2. Кут зсуву по формулі співвідношення кутів тертя-зсуву і тертя-ковзання адекватно відповідає розрахунковим значенням по найбільш розповсюдженим формулам відомих авторів.

3. Експериментально підтверджено постійність кута тертя-зсуву для окремих груп сталей. В порівнянні зі сталлю 45 більш пластична аустенітна сталь 12X18H9T має менші значення кута тертя-зсуву.

4. По мірі росту швидкості різання і переднього кута відбувається відповідне зменшення і збільшення кута тертя-ковзання.

5. Постійність кута тертя-зсуву дає можливість визначати кут тертя-ковзання через змінний кут зсуву і постійне значення кута тертя-зсуву без застосування динамометричних вимірів складових сили різання при гострому лезі.

Перелік посилань

1. Зорев, Н.Н. (1956). *Вопросы механики процесса резания металлов*. Машгиз.
2. Розенберг, А.М. & Еремин, А.Н. (1956). *Элементы теории процесса резания металлов*. Машгиз.
3. Бобров, В.Ф. (1975). *Основы теории резания металлов*. Машиностроение.
4. Мазур, М. П., Внуков, Ю. М., & Доброскок, В. Л. (2010). *Основы теории резания материалов* (М. П. Мазура (Ред.)). Новий світ – 2000.
5. Гордон, М.Б. (1972). *Исследование трения и смазки при резании металлов*. Трение и смазка при резании металлов. Изд-во Чувашского гос.ун-та.
6. Остафьев, В.А. (1979). *Расчет динамической прочности режущего инструмента*. Машиностроение.
7. Макаров, А.Д. (1966). *Износ и стойкость режущих инструментов*. Машиностроение.
8. Армарего, И.Д. & Браун, Р.Х. (1977). *Обработка металлов резанием*. Машиностроение.
9. 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: Международный. науч.-техн. сб. Харьков: НТУ «ХПИ»*, (85), 137–148.
10. Трент, Е.М. (1980). *Резание металлов*. Машиностроение.
11. Малышев, В.И. (2011). *Очерки истории науки о резании материалов. Монография*. ТГУ.
12. Зорев, Н.Н. (1958). *Расчет проекций силы резания*. Машгиз.
13. Силин, С.С. (1979). *Метод подобия при резании металлов*. Машиностроение.
14. Кравченко, Ю. Г., Крюкова, Н. В., & Дербаба, В. А. (2017). *Спосіб визначення коефіцієнта тертя стружки з лезом* (Патент No. 115833).
15. Кравченко, Ю.Г. & Дербаба, В.А. (2020). *Спосіб визначення кута зсуву при стружкоутворенні* (Патент No. 140418).

АННОТАЦИЯ

Цель. Вывести расчетные формулы суммы углов сдвига, внутреннего трения-сдвига в плоскости сдвига и внешнего трения-скольжения стружки через составляющие силы резания при остром лезвии. Провести сравнительные расчеты для угла сдвига по наиболее распространенным формулам известных авторов и определить угол трения стружки из-за угла сдвига и постоянное значение угла трения-сдвига для отдельных групп сталей.

Методика. Исследование базируется на применении аналитически-вероятностных методов расчетов определения зависимости между углами сдвига, внутреннего трения-сдвига в плоскости сдвига и внешнего трения-скольжения стружки по передней поверхности лезвия. Величины осевой и нормальной составляющих определялись методом динамометрирования для конкретных условий резания или на основании эмпирических зависимостей методом «обратного расчета». Принятая модель стружкообразования позволила методом проецирования сил трения и давления стружки на передней поверхности лезвия в направлении касательной и нормальной составляющих силы сдвига аналитически получить формулы коэффициента трения-сдвига и суммы соотношения исследуемых углов.

Результаты исследований. Получена формула суммы углов сдвига, внутреннего трения-сдвига и внешнего трения-скольжения.

Научная новизна. Выполнены исследования и установлено параметрическую взаимосвязь углов стружкообразования. Полученные значения и функциональные зависимости углов стружкообразования предназначены для применения при аналитическом расчете сил и температуры резания. Экспериментально подтверждено, что для отдельных групп обрабатываемых материалов сумма углов сдвига является величиной постоянной. Доказано, что определение всех углов может выполняться через вычисления составляющих силы резания с эмпирических зависимостей методом «обратного расчета». Это дает возможность определять указанные углы без применения трудоемкого динамометрирования составляющих силы резания при остром лезвии резца.

Практическая значимость. Практическое достижение установленного постоянства угла трения-сдвига для отдельных групп обрабатываемых материалов содержится в возможности определить угол трения α трения-скольжения из суммы углов через один простой выходной показатель процесса резания – угол сдвига как функции коэффициента усадки стружки.

Ключевые слова: *точение сталей, острое лезвие, передняя поверхность, стружка, угол сдвига, угол трения-сдвига, угол трения-скольжения.*

ABSTRACT

Purpose. Derive the calculated formulas of shear angles sum, internal friction-shear in the shear plane and external friction-sliding of chips through the components of the cutting force with a sharp blade. Carry out comparative calculations of the shear angle according to the most common formulas of known authors and determine the angle of friction of the chips through the shear angle and the constant value of the friction-shear angle for individual groups of steels.

Methodology. The study is based on the use of analytical-probabilistic methods of calculations to determine the relationship between shear angles, internal friction-shear in the shear plane and external friction-sliding of the chips on the front surface of the blade. The values of the axial and normal components were determined by the method of dynamometer for specific cutting conditions or based on empirical dependences by the method of "inverse calculation". The accepted model of chip formation allowed analytically to obtain the formulas for the coefficient of friction-shear and the sum of

the studied angles using the method of projecting the friction forces and chip pressure on the front surface of the blade in the direction of the tangent and normal components of the shear force.

Findings. The formula for studying the sum of shear angles, internal friction-shear and external friction-sliding is obtained.

Originality. The research was performed and the parametric relationship of chip formation angles was established. The obtained values and functional dependences of chip formation angles are intended for application in analytical calculation of forces and cutting temperature. It is experimentally confirmed that for specific groups of machining materials the sum of shear angles is a constant value. It is proved that the determination of all angles can be performed by calculating the components of the cutting force from empirical dependences using the method of "inverse calculation". This makes it possible to determine these angles without the use of time-consuming dynamometer components of the cutting force with a sharp blade of the cutter.

Practical value. A practical achievement of the detected constancy of the friction-shear angle for specific groups of machining materials is the ability to determine the friction-sliding angle from the sum of angles through one simple output index of the cutting process - shear angle as a function of chip thickness.

Key words: *turning of steels, sharp blade, front surface, chip, shear angle, friction-shear angle, friction-sliding angle.*