

© В.А. Дербаба¹, О.Л. Войчишен¹

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

ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІЧНОЇ МОДЕЛІ РОЗРАХУНКУ КУТІВ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ

© V. Derbaba¹, O. Voichyshen¹

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SOFTWARE IMPLEMENTATION OF ALGORITHMIC MODEL CALCULATION OF CHIPS ANGLES

Мета. Розробка методики графоаналітичного розрахунку співвідношення кутів процесу стружкоутворення для випадку, коли початковими даними є достовірні емпіричні залежності для складових сили різання та експериментально визначені кути зсуву.

Методика. Дослідження базується на застосуванні аналітично-ймовірнісних способів розрахунку зовнішнього кута тертя-ковзання, внутрішнього кута тертя-зсуву та кута нахилу площини зсуву по емпіричним формулам 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. Розроблена алгоритмічна модель визначення співвідношення кутів зсуву, зовнішнього тертя-ковзання стружки по передній поверхні леза, внутрішнього тертя-зсуву в площині зсуву та переднього кута леза. Для найпоширеніших у промисловому виробництві марок сталей, кут внутрішнього тертя-зсуву характеризується відносною стабільністю в залежності від швидкості різання. В зв'язку з цим значення кута-зсуву може бути використано у якості першого наближення при інженерному аналізі процесу стружкоутворення.

Наукова новизна. Вперше виконана програмна реалізація алгоритмічної моделі у середовищі NI LabVIEW та графоаналітично у програмі Autodesk Inventor. 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.

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, зовнішній кут тертя-ковзання, внутрішній кут тертя-зсуву, кут нахилу площини зсуву, сила різання, коефіцієнт тертя-зсуву, швидкість різання, передній кут.

Вступ. Однією з важливих проблем теорії різання, пов'язаних з дослідженнями і розрахунками складових сили стружкоутворення і густини теплових потоків через відповідні дотичні напруження [1–4], є визначення наступних кутів:

- зовнішнього тертя-ковзання ρ_s між стружкою і передньою поверхнею леза A_γ ;
- внутрішнього тертя-зсуву ρ_s металу в площині зсуву P_ϕ ;
- нахилу площини зсуву P_ϕ до площини різання P_n (кута зсуву ϕ).

Провідними науковцями відповідні експериментальні дослідження базувались на доволі складному і кошовному устаткуванні. Так визначення розподілу контактних напружень τ_γ і коефіцієнта тертя μ_γ на передній поверхні виконувалось 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 простішим є відомий [7] спосіб визначення при точінні середнього значення коефіцієнта тертя μ_γ на основі вимірювання динамометром дотичної P'_z і нормальної $P'_n = \sqrt{(P'_x)^2 + (P'_y)^2}$ (P'_x і P'_y – відповідно осьової і радіальної) складових сили різання при гострому лезі і різних значеннях переднього кута γ по спеціальній формулі.

У роботах [8–10] для аналітичного визначення кута зсуву ϕ наведені формули, в яких аргументами являються кути ρ_γ та γ .

Для напружень τ_s і коефіцієнту "внутрішнього тертя" μ_s в площині зсуву P_ϕ існує метод їх визначення через дотичну і нормальну складові сили зсуву, які, в свою чергу, визначаються через складові P'_z і P'_n сили різання при гострому лезі і експериментальне значення кута зсуву ϕ [5, 7, 10].

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

У сучасних наукових виданнях математичному моделюванню складних процесів механіки різання металів приділяється значна увага, наприклад у роботах [8–10], але питання співвідношення кутів стружкоутворення у достатній мірі не розглядається.

Також треба відзначити значне поширення відносно нового виду математичних моделей, а саме алгоритмічних моделей. По суті вони є чисельними математичними моделями. В алгоритмічних математичних моделях зв'язок між функцією та аргументами задається неявно у вигляді алгоритму моделювання. У відмінну від аналітичного рішення, яке може давати явну параметричну залежність, при чисельному рішенні потрібне багатократне розв'язання задачі при зміні того чи іншого параметру. Окремим важливим випадком алгоритмічних моделей є «імітаційні математичні моделі». Тобто імітаційна модель в технології машинобудування і в матеріалознавстві – це алгоритмічна модель поведінки технологічного об'єкту, що реалізована на електронно-обчислювальній машині.

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

На рис. 1 зображено розрахункову схему напрямків сил стружкоутворення при гострому лезі (величина фаски зносу і сила тертя на задній поверхні при цьому теоретично дорівнюють нулю) в площині зсуву P_ϕ і на передній поверхні леза A_γ .

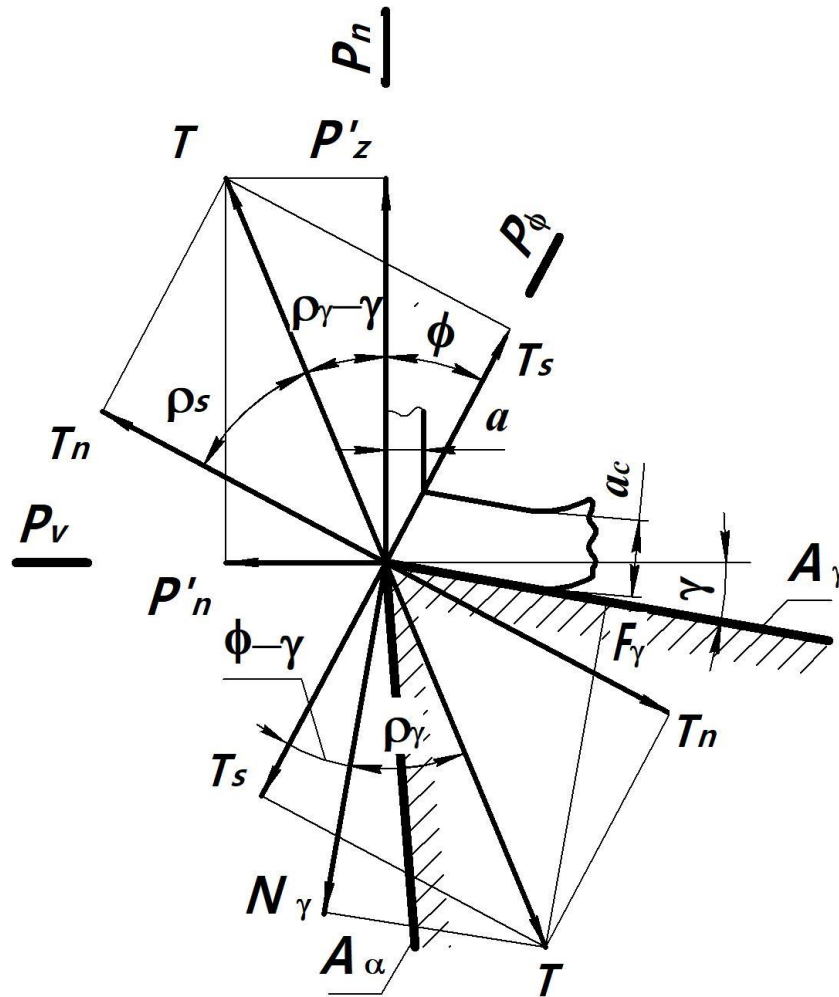


Рис. 1. Геометрична модель розташування сил і кутів при стружкоутворенні в системі координат $P_v - P_n$

Також показано розташування відповідних кутів зсуву ϕ , тертя-зсуву ρ_s і тертя-ковзання ρ_γ [7, 10]. Модель включає наступні параметри стружко-утворення: a і a_c – товщину перерізу зрізу та товщину 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 $\rho_s = \tan^{-1} \mu_s$ – коефіцієнт і кут тертя-зсуву в площині P_ϕ ; F_γ і N_γ – дотичну і нормальну сили тертя стружки на A_γ ; $\mu_\gamma = F_\gamma/F_n$ і $\rho_\gamma = \tan^{-1} \mu_\gamma$ – коефіцієнт і кут тертя стружки; P'_z і 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).

На рис. 2 наведено структурну схему розробленої алгоритмічної моделі графоаналітичного розрахунку значення кутів процесу стружкоутворення.

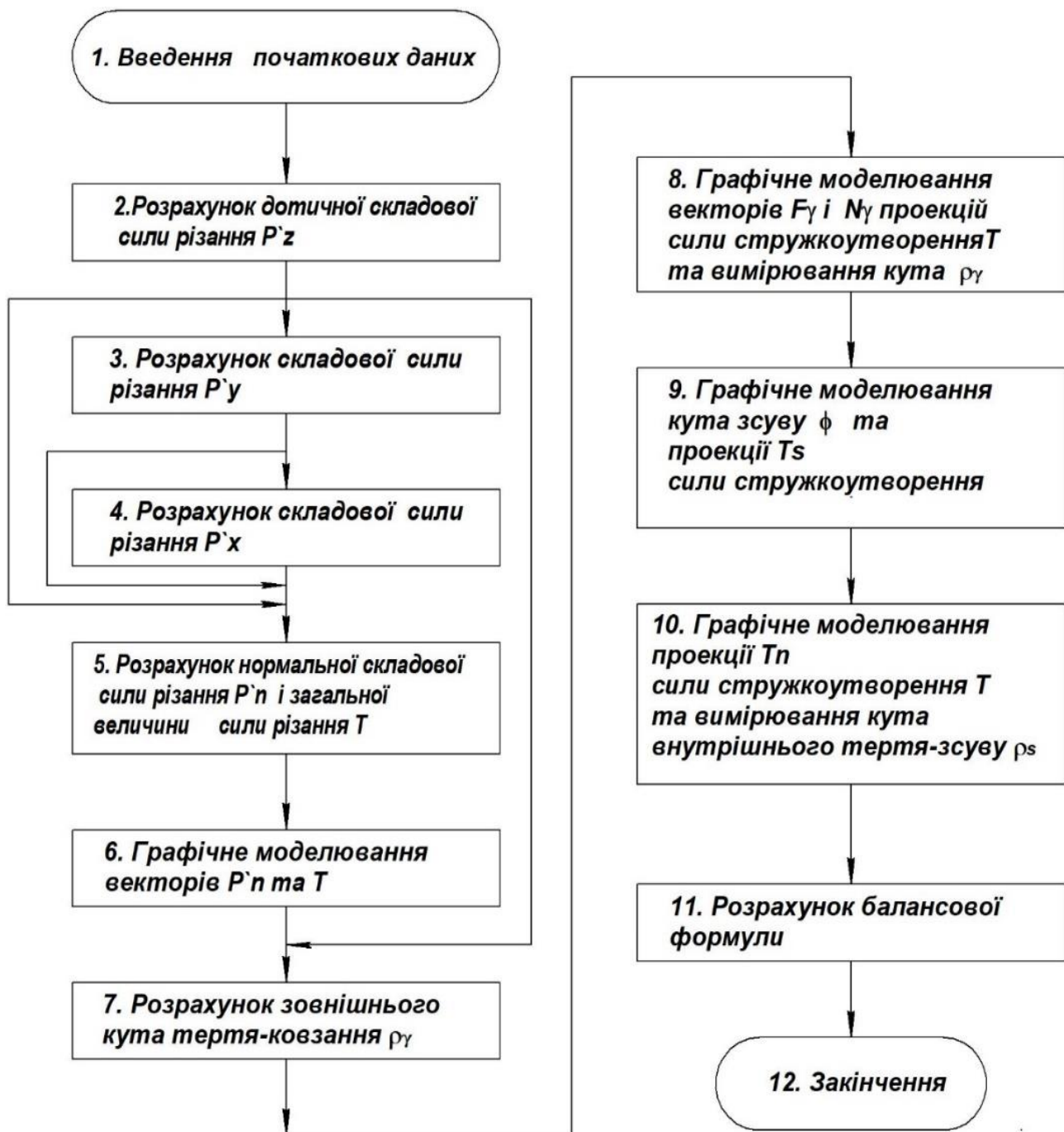
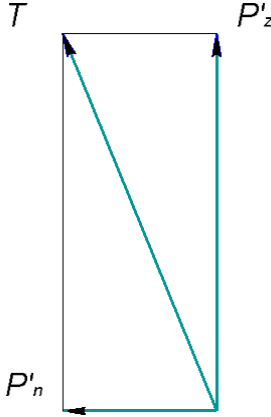


Рис. 2. Структурна схема алгоритму графоаналітичного розрахунку кутів процесу стружкоутворення

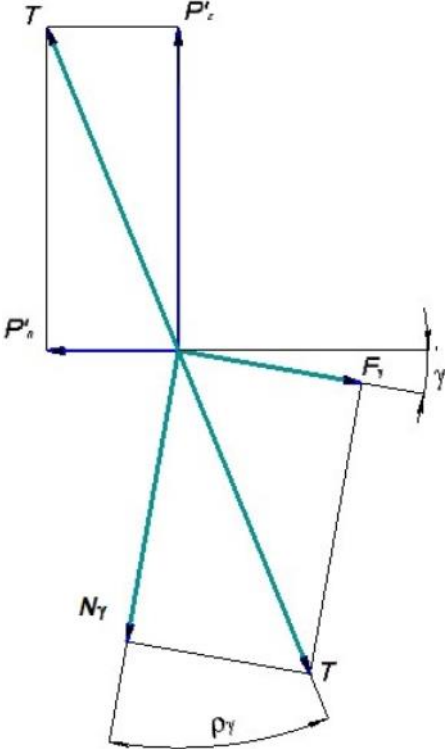
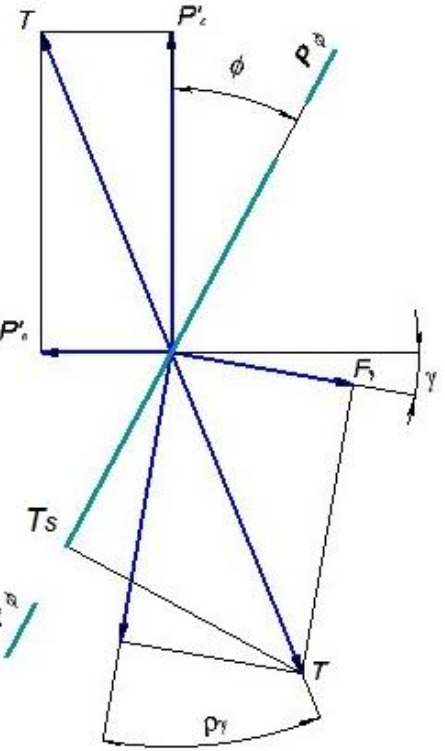
Початковими даними для розрахунку є: величина переднього кута леза γ , прийняті режими різання і емпіричні залежності для складових сили різання, а також значення кута зсуву ϕ , що виведені дослідниками по результатах адекватних натурних експериментів. Слід зауважити, що при розробці алгоритмічної моделі зроблено допущення, що стружкоутворення здійснюється при гострому лезі, тобто величина фаски зносу і сила тертя на задній поверхні теоретично дорівнюють нулю. В таблиці 1 наведені посилання, математичні залежності та графічні процедури, що стосуються кожного із блоків алгоритмічної моделі.

Таблиця 1

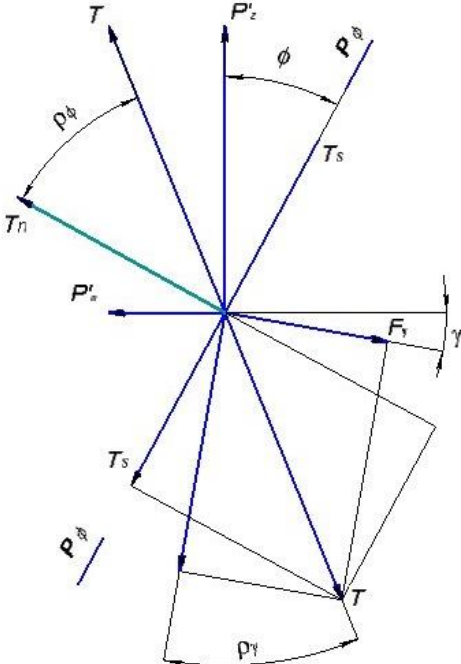
Математичні та графічні моделі чи посилання

Номер та назва блоку алгоритмічної моделі	Математичні та графічні моделі чи посилання	Примітки, посилання чи прийняті допущення при моделюванні вказаного блоку
1. Введення початкових даних	Початкові дані наведені в табл. 2, 3	—
2, 3, 4. Розрахунки складових сили різання P'_z, P'_y, P'_x	$P'_z = Cp_z \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^z \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^\eta \times (1+r)^v \cdot (1+h)^u;$ $P'_y = Cp_y \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^z \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^\eta \times (1+r)^v \cdot (1+h)^u;$ $P'_x = Cp_x \cdot t^x \cdot s^y \cdot V^z \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^\eta \times (1+r)^v \cdot (1+h)^u.$	Застосовані формули, що наведена в роботі [4]. Показники ступеню наведені далі в таблиці 4
5. Розрахунки сили різання T , та складової сили різання P'_n ,	$P_n = \sqrt{(P'_y)^2 + (P'_x)^2}$ $T = \sqrt{(P'_z)^2 + (P'_y)^2 + (P'_x)^2}$	Застосовані формули, що наведена в роботі [4]
6. Графічне моделювання векторів сили різання T , та складової сили різання P'_n		Проводиться з дотриманням довжини векторів сил у масштабі (для перевірки розрахунків складових сили різання)
7. Розрахунок кута зовнішнього тертя-ковзання ρ_γ між стружкою і передньою поверхнею леза A_γ	$\mu_\gamma = \frac{(P'_z \cdot \tan \gamma + P'_n)}{(P'_z - P'_n \cdot \tan \gamma)};$ $\rho_\gamma = \tan^{-1} \mu_\gamma$	Кут γ повинен відповідати значенню, що було використано при розрахунках складових сили різання P'_z, P'_y, P'_x

Продовження таблиці 1

Номер та назва блоку алгоритмічної моделі	Математичні та графічні моделі чи посилання	Примітки, посилання чи прийняті допущення при моделюванні вказаного блоку
8. Графічне моделювання векторів проекцій сили стружкоутворення F_γ і N_γ, вимірювання кута зовнішнього тертя-ковзання ρ_γ	 The diagram shows a coordinate system with horizontal axis x and vertical axis y. A force vector T is shown in the second quadrant. Its projections are P'_x (horizontal, to the left) and P'_y (vertical, upwards). Another vector F_γ is shown in the fourth quadrant, with its projection N_γ on the negative y-axis. The angle between the negative y-axis and the vector T is labeled ρ_γ.	Проводиться з дотриманням довжини векторів сил у масштабі (для перевірки розрахунків проекцій сили стружкоутворення F_γ та N_γ)
9. Графічне моделювання кута зсуву ϕ та проекції T_s сили стружкоутворення	 The diagram is similar to the one in block 8 but includes additional elements. A vector P_ϕ is shown in the first quadrant, making an angle ϕ with the positive x-axis. A vector T_s is shown in the third quadrant. The angle between the negative y-axis and the vector T is still ρ_γ.	Величини кутів ϕ запозичені з роботи [4], що спирається на опубліковані результати експериментальних досліджень.

Продовження таблиці 1

Номер та назва блоку алгоритмічної моделі	Математичні та графічні моделі чи посилання	Примітки, посилання чи прийняті допущення при моделюванні вказаного блоку
10. Графічне моделювання вектору проекції T_n сили стружкоутворення та вимірювання кута внутрішнього тертя-зсуву ρ_s		Графічне моделювання проводиться з дотриманням довжини векторів сил у масштабі для визначення кута ρ_s
11. Розрахунок балансової формули	$\rho_s + \phi + \rho_\gamma - \gamma = 90$	Проводиться для перевірки правильності розрахунків і відповідності геометричній моделі розташування сил і кутів при стружкоутворенні

В таблицях 2, 3 наведені режими різання та геометричні параметри леза [5, 10] .

Таблиця 2

Режими різання

Режими різання	Для сталі 45	Для сталі 12X18H9T
Швидкість різання V , м/с	0,5–2,8	0,5–2,0
Глибина різання t , мм	2,8	2,8
Подача s , мм/об	0,35	0,44

Таблиця 3

Параметри леза, що покладені в основу розрахунків

Геометричні параметри леза					Матеріал леза
Передній вугол γ , град	Радіус r при вершині, мм	Фаска зносу h , мм	Кут в плані ϕ , град	Кут нахилу різальної кромки λ , град	
10 для сталі 45, 15 для сталі 12X18H9T	0	0	45	0	T15K6 для сталі 45, BK8 для сталі 12X18H9T

Таблиця 4

Показники ступеню у формулах для визначення складових сили різання

Складові сили різання [Н]	Коефіцієнт C_p для сталі		x	y	z	η	v	u
	45	12X18HT						
Дотична P_z	1560	1790	1,0	0,75	-0,1	1,1	0,1	0,4
Нормальна P_y	620	809	0,9	0,60	-0,3	2,8	0,3	1,4
Осьова P_x	437	460	1,0	0,50	-0,4	2,4	-0,2	1,2

Програмна реалізація алгоритмічної моделі здійснена у середовищі NI LabVIEW та графоаналітично у програмі Autodesk Inventor. Одержані залежності кутів стружкоутворення від швидкості різання показані на рис. 3–4.

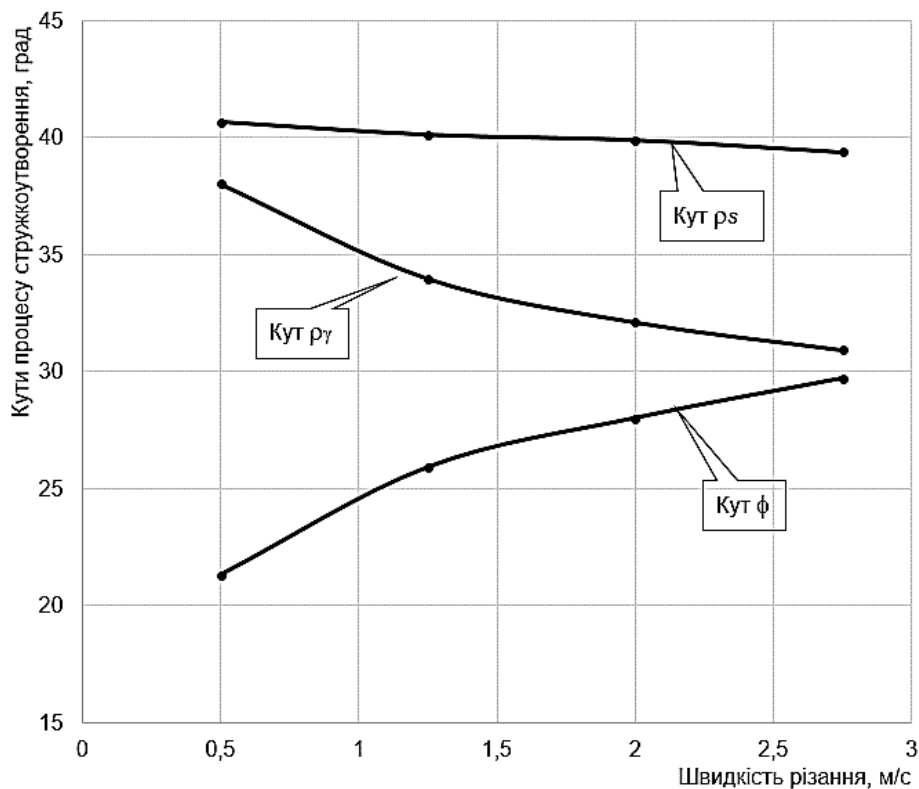


Рис. 3. Залежності кутів стружкоутворення від швидкості різання для сталі 45

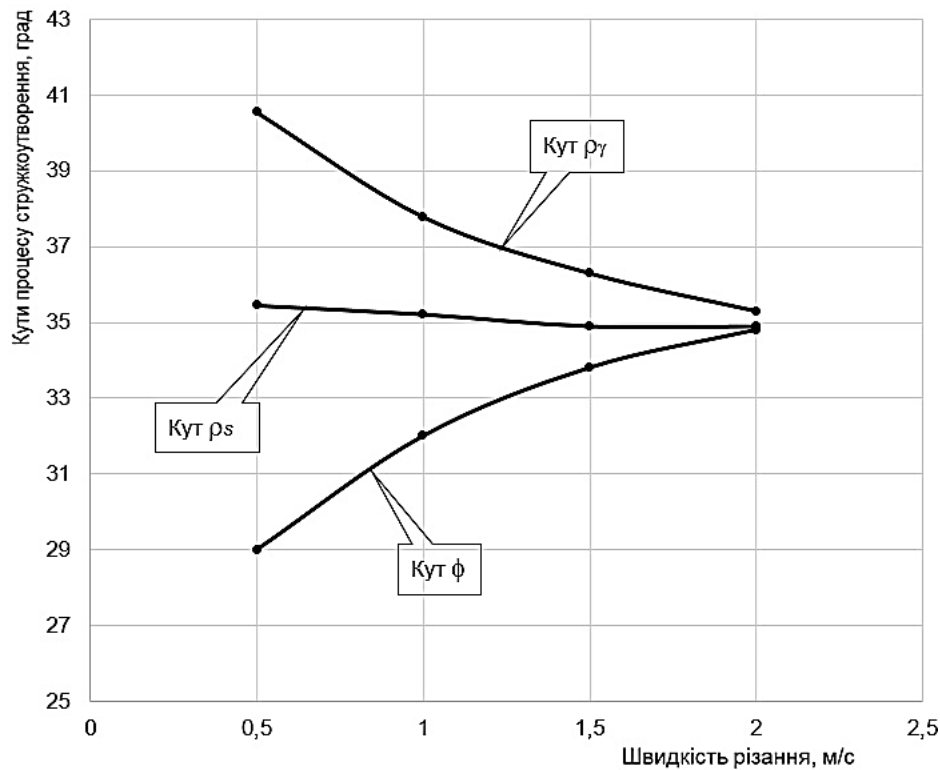


Рис. 4. Залежності кутів стружкоутворення від швидкості різання для сталі 12X18H9T

Зіставлення одержаних значень кута ϕ , ρ_γ і ρ_s з наведеними у роботі [7] показує їх відповідність одне одному, що підтверджує адекватність розробленої алгоритмічної моделі.

Висновки.

1. Розроблена алгоритмічна модель визначення співвідношення кутів зсуву, зовнішнього тертя-ковзання стружки по передній поверхні леза, внутрішнього тертя-зсуву в площині зсуву та переднього кута леза.
2. Проведені комп'ютерні експерименти та визначені залежності кутів процесу стружкоутворення від швидкості різання.
3. У порівнянні з відомими емпіричними формулами для розрахунку кутів процесу стружкоутворення одержані адекватні результати при використанні формули балансу кутів та запропонованої алгоритмічної моделі їх визначення.
4. Для найпоширеніших у промисловому виробництві матеріалів марок сталь 45 та 12X18H9T кут ρ_s характеризується відносною стабільністю в залежності від швидкості різання. В зв'язку з цим стає значення кута ρ_s може бути використано у якості першого наближення при інженерному аналізі процесу стружкоутворення.

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*. Харків: НТУ «ХПІ».

2. Добрянський, С.С. & Малафєєв, Ю.М. (2020). *Технологічні основи машинобудування: підручник для студентів спеціальностей 131 Прикладна механіка, 133 Галузеве машинобудування*. КПІ ім. Ігоря Сікорського. 379с.
3. Будяк, Р.В., Гіосвягенко, ЕК., Швець, Л.В. & Жученко, Г.А. (2020). *Конструкційні матеріали і технології: навч. посіб.* Вінниця: ФОП Т.П. Барановська.
4. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2020). Empirical definition of the shearing angle and chip-edge contact length when cutting. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 123–133. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>
5. Кравченко, Ю.Г. & Дербаба, В.А. (2022). *Спосіб визначення кута зсуву при стружкоутворенні*. (Patent No 126198).
6. Дербаба, 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., Дербаба, 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., Дербаба, 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>
9. Derbaba, V., Nosachov, V., & Rizo, Z. (2021). Research and improvement of methods of testing machines for geometric and kinematic accuracy. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 64, 198–212. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.198>
10. Кравченко, Ю.Г., Крюкова, Н.В. & Дербаба, В.А. (2017). *Спосіб визначення коефіцієнта тертя стружки з лезом*. (Patent No 115883).

ABSTRACT

Purpose. To develop a methodology for graph-analytical calculation of the ratio of chip formation angles for the case when the initial data are reliable empirical dependencies for the components of the cutting force and experimentally determined shear angles.

Methods. The study is based on the use of analytical and probabilistic methods to calculate the outer friction-sliding angle, the inner friction-shear angle, and the angle of inclination of the shear plane using empirical formulas based on the components of the cutting force 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. An algorithmic model for determining the ratio of shear angles, external friction-sliding of chips on the front surface of the blade, internal friction-shear in the shear plane, and the front angle of the blade has been developed. For the most common steel grades in industrial production, the internal friction-shear angle is characterized by relative stability depending on the cutting speed. Therefore, a constant value of the shear angle can be used as a first approximation in the engineering analysis of the chip formation process.

The originality. For the first time, the software implementation of the algorithmic model was implemented in the NI LabVIEW environment and graphically analyzed in the Autodesk Inventor program. The parametric interaction of chip formation angles was studied and established. Functional dependencies 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.

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 components of the cutting force 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, external friction-sliding angle, internal friction-shear angle, angle of inclination of the shear plane, cutting force, friction-shear coefficient, cutting speed, leading angle.*