

Загальні питання технологій збагачення

дальнейшее уточнение методики расчета минимальной массы пробы и их количества.

Список литературы

1. Козин В.З. Контроль технологических процессов обогащения: Конспект лекций. – Екатеринбург, 2003. – 161 с.
2. Хан Г.А. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. – М.: Недра, 1979. – 320 с.
3. Козин В.З. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. М.: – Недра, 1985. – 294 с.
4. Чечотт Г.О. Опробование и испытание полезных ископаемых. – М.-Л.: ОНТИ, 1932. – 143 с.
5. Пожарицкий К.Л. Опробование месторождений цветных металлов и золота. – М.: Металургиздат, 1947.
6. Краснов Д.А. Теоретические основы и расчетные формулы определения веса проб. – М.: Недра, 1969.
7. Альбов М.Н. Опробование месторождений полезных ископаемых. – М., Недра, 1975.
8. Козин В.З., Тихонов О.Н. Опробование, контроль и автоматизация обогатительных процессов: Учеб. Для вузов. – М.: Недра, 1990. – 343 с.
9. Серго Е.Е. Опробование и контроль технологических процессов обогащения. – К.: Вища школа, 1979.
10. Випробування і контроль процесів збагачення корисних копалин: Навчальний посібник / І.К. Младецький, П.І. Пілов, К.А. Левченко, Я.Г. Куваев. – Дніпро: Журфонд, 2019. – 204 с.

© Гаврилко А.В., 2019

*Надійшла до редколегії 24.10.2019 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*

УДК 621.9.013.2

<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.25487.82082>

О.Ю. ЖУРАВЕЛЬ

(Україна, Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ КУТІВ СТРУЖКОУТВОРЕННЯ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПРОЦЕСУ ТОЧІННЯ БУРОВОЇ КОРОНКИ

У статті розглядається метод визначення кутів стружкоутворення, а саме внутрішнього тертя-зсуву та зовнішнього тертя-ковзання при точінні корпусу бурової коронки. Вивчаються співвідношення кутів з використанням моделювання напружено-деформованого стану, методу найменших квадратів та графоаналітичного методу розрахунку. Методика досліджень базується на застосуванні елементів теорії різання стосовно схеми утворення зливної стружки і моделі пластичної деформації металу з однією поверхнею зсуву при вільному рі-

занні без наросту на передній поверхні леза. Проведені комп'ютерні експерименти та визначені залежності кутів стружкоутворення від швидкості різання та від переднього кута леза. Результати статті можуть бути використані для автоматизації визначення раціональних режимів різання для зниження собівартості виготовленого продукту за рахунок зниження витрат матеріалу, інструменту та підвищення якості оброблювальної поверхні.

Вступ. При відпрацюванні родовищ підземним способом Застосування шпурової відбійки, у тому числі якісних бурових коронок, при шаровій системі розробки дозволило забезпечити не тільки зниження витрат і розубожіння, але і підвищити продуктивність праці на проходці гірничих виробок, отримати гранулометричний склад машинних класів для подальшої переробки [1].

Подальше вдосконалення бурової коронки лежить в основі її розробки конструкторсько-технологічних параметрів і технологічних процесів, які відповідають вимогам по якісним, ціновим і екологічним показникам.

Одним з варіантів вирішення зазначеної проблеми є розробка методу визначення кутів стружкоутворення при моделюванні процесу точіння бурової коронки, що дозволяють знизити витрати матеріалу, інструменту та підвищити якість оброблюваної поверхні.

Однією з важливих проблем теорії різання, пов'язаних з дослідженнями і розрахунками складових сили стружкоутворення і густини теплових потоків через відповідні дотичні напруження [2 – 5], є визначення наступних кутів:

–зовнішнього тертя-ковзання P_{γ} між стружкою і передньою поверхнею леза A_{γ} ,

–внутрішнього тертя-зсуву P_{ϕ} металу в площині зсуву P_{ϕ} ,

–нахилу площини зсуву P_{ϕ} до площини різання P_{π} (кута зсуву ϕ).

Метою роботи є розробка методики розрахунку співвідношення кутів процесу стружкоутворення з використанням моделювання напружено-деформованого стану, методу найменших квадратів та графоаналітичного методу розрахунку.

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

Методика проведення дослідження:

– визначення початкових даних, допущень та обмежень у дослідженні;
– моделювання напружено-деформованого стану зони стружкоутворення методом кінцевих елементів за допомогою програмного забезпечення «DEFORM™-2D Machining (cutting) Lab» від SFTC, отримання відеоматеріалів процесу різання та зображень напружено-деформованого стану зони стружкоутворення;

– адаптація для подальшої обробки отриманих зображень після моделювання за допомогою програмного забезпечення для редагування зображень

Загальні питання технологій збагачення

FastStone «Image Viewer 7.4», отримання зображень зони по якій проходить поверхні зсуву матеріалу;

– обробка зони зсуву матеріалу за допомогою програмного забезпечення АСКОН «КОМПАС», отримання координат точок поверхні зсуву матеріалу;

– апроксимація лінійною залежністю точок поверхні зсуву матеріалу за допомогою методу найменших квадратів, отримання значень кутів зсуву матеріалу для різних параметрів обробки;

– визначення графоаналітичним методом кутів внутрішнього тертя-зсуву та зовнішнього тертя-ковзання, отримання залежностей кутів стружкоутворення від швидкості різання та передньою кута леза.

Таблиця 1

Матеріал заготовки				
Сталь 45				
Геометричні параметри леза				
Передній кут, град	Радіус при вершині r [мм]	Фаска зносу h [мм]	Кут у плані j [град]	Кут нахилу різальної кромки l [град]
-10 -5 0 5 10 15 20	0	0	45	0
Режими різання				
Швидкість різання, м/с	Глибина різання t [мм]		Подача s [мм/об]	
0,50 0,85 1,25 1,60 2,00 2,35 2,75	2,80		0,35	

Допущення та обмеження у дослідженні:

– використовується класична теорія пластичної деформації яка описується тензорами та базується на постулаті Друкера;

– застосована вільна схема різання;

– не враховується наріст на передній поверхні різця;

– не враховується тертя по задній поверхні різця;

– дослідження проходить у двомірній системі координат;

Результати та матеріали дослідження. Для моделювання напружено-деформованого стану зони стружкоутворення та визначення кута зсуву викори-

стовувалось програмне забезпечення «DEFORM™-2D Machining (cutting) Lab» від SFTC.

DEFORM-2D кінцево-елементна система моделювання, призначена для аналізу двовимірної (2D) поведінки металу при різних процесах механічної обробки. DEFORM-2D надає важливу інформацію про поведінку матеріалів і розподілі температур під час процесів різання.

З метою скорочення часу на моделювання використовуються певні спрощення, зокрема розглядається тільки фрагмент (сектор) заготовки та різального інструменту рис. 1.

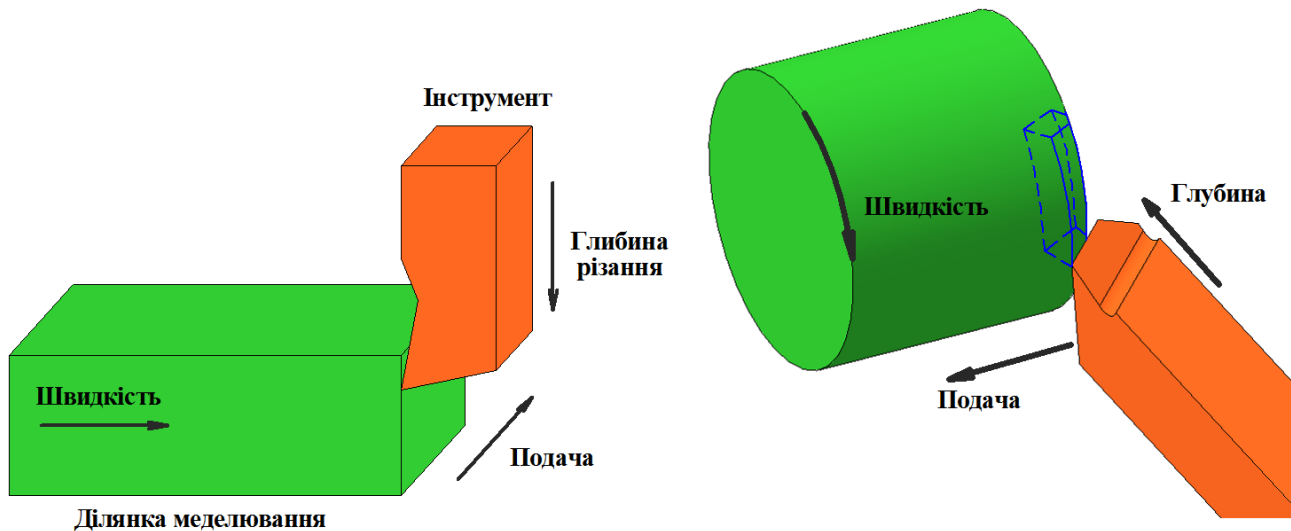


Рис. 1. Зв'язок між даними процесу та даними аналізу

Обрано параметри різання які максимально охоплюють усі поширені випадки обробки металів, відображені у таблиці 1. Початкові дані експерименту.

Програма DEFORM Machining 2D моделює процес різання металу і відображає його у двовірній системі координат рис. 2.

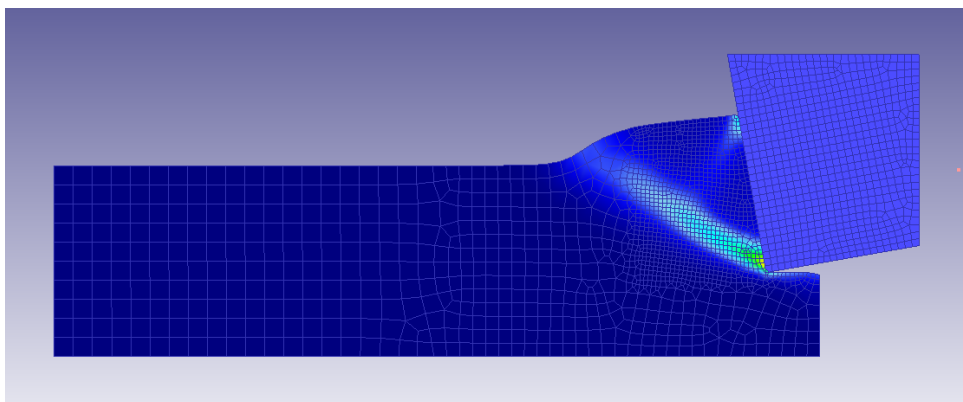


Рис. 2. Приклад відображення процесу різання у програмі DEFORM Machining 2D

За допомогою програмного забезпечення DEFORM Machining 2D виконано

Загальні питання технологій збагачення

серію комп'ютерних експериментів з різноманітними технологічними параметрами. Зображення процесу моделювання отримане для випадку де передній кут різця мінус 10 градусів відображено на рис. 3.

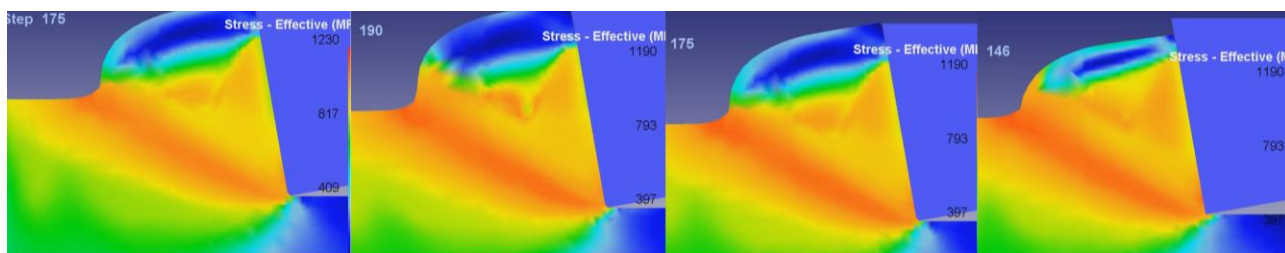


Рис. 3. Зображення процесу моделювання, передній кут різця мінус 10 град

Використовуючи програмне забезпечення для редагування зображень FastStone «Image Viewer 7.4» підвищено контрастність, яскравість, насиченість для чіткого виділення області стружкоутворення на кожному зображенні. Ця операція дає змогу прибрати плавні переходи кольору у зоні різання та виділити зону по якій проходить поверхня зсуву матеріалу. Завдяки чому, зона стружкоутворення приймає чіткі контури, значення яких можна задати як координати точок двомірного простору. На даному етапі площина зсуву матеріалу має вигляд плями з безкінечною кількістю точок яка має чітко описаний контур рис. 4.

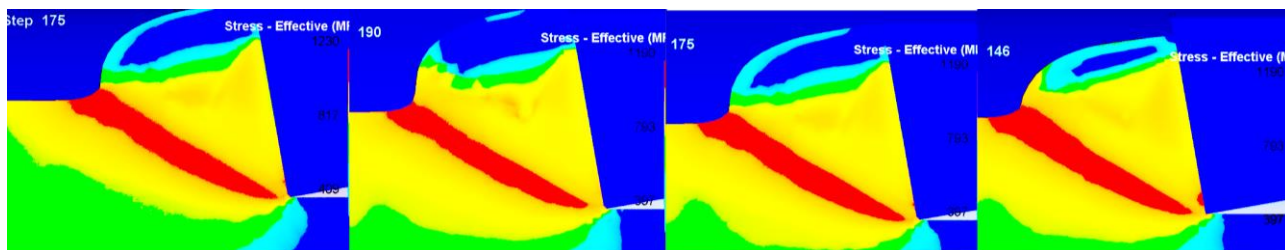


Рис. 4. Вдосконалене зображення процесу різання, передній кут різця мінус 10 град

За допомогою програмного забезпечення АСКОН «КОМПАС» зону зсуву матеріалу розбито на десять рівних частин по осі абсцис за допомогою паралельних допоміжних прямих. Кожна допоміжна пряма перетинає лінію границі зони зсуву матеріалу у двох точках. Проведено відрізок по кожній допоміжній прямій, де початкова та кінцева точки відрізків будуть точками у яких допоміжні прямі перетинають зону зсуву матеріалу. Середини усіх відрізків відмічено точками координати яких і будуть використані для розрахунку кута зсуву матеріалу рис. 5.

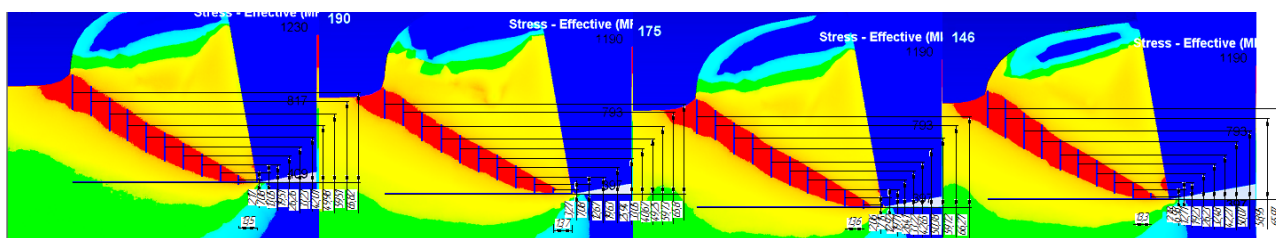


Рис. 5. Вдосконалене зображення процесу різання з координатами точок для визначення кута зсуву

Нульовою точкою відліку двомірної системи координат для вирахування розташування точок задано перетином двох допоміжних прямих які побудовані на лініях які являються передньою та задньою поверхнями різця. Усі координати відносні та неприв'язані до жодних одиниць вимірювання Координати точок для одного з випадків відображено у таблиці 2. Координати точок поверхні зсуву матеріалу для випадку з параметрами: сталь 45, передній кут різця 0 град, швидкість різання 2 м/с.

Таблиця 2

№ точки	Координата абсцис x	Координата ординат y
1	11,7	3,98
2	23,4	9,57
3	35,1	15,94
4	46,8	22,91
5	58,5	30,36
6	70,2	37,17
7	81,9	46,00
8	93,6	53,53
9	105,3	61,16
10	117,0	67,96

Для визначення кута зсуву значення координат точок апроксимуються лінійною залежністю за допомогою методу найменших квадратів [6,7].

Метод найменших квадратів служить для оцінки невідомих величин за результатами вимірювань, які містять випадкові похибки. Серед багатьох застосовувань цього методу найважливішим є знаходження рівняння, яке найбільш точно описує дану залежність для подання дослідних результатів.

Нехай x_1, x_2, \dots, x_n – послідовність значень незалежної змінної, а y_1, y_2, \dots, y_n – послідовність відповідних значень залежної змінної. Припустимо, що точки $M_1(x_1; y_1), M_2(x_2; y_2), \dots, M_n(x_n; y_n)$ приблизно розташовуються на одній прямій. Поставимо за мету підібрати рівняння прямої $y=ax+b$, яка є найточнішим наближенням залежності між x та y .

За допомогою вбудованої функції, яка описує метод найменших квадратів, за допомогою програмного забезпечення Microsoft Excel, проведено усі розрахунки. Результатом розрахунку є рівняння яке описує пряму.

Загальні питання технологій збагачення

Наступним етапом обчислюється значення $y_{\text{лін}}$ по формулі $y_{\text{лін}} = ax + b$ для усіх значень x . Знаходиться коефіцієнт нахилу прямої за формулою:

$$k = \frac{y_{\text{лін}}^{10} - y_{\text{лін}}^1}{x^{10} - x^1}, \quad (1)$$

де $y_{\text{лін}}^{10}$ – значення $y_{\text{лін}}$ для 10-ї точки; $y_{\text{лін}}^1$ – значення $y_{\text{лін}}$ для 1-ї точки; x^{10} – значення x для 10-ї точки; x^1 – значення x для 1-ї точки.

Значення кута зсуву знаходяться за формулою:

$$\varphi = \text{arctg}(k) \quad (2)$$

Показники кутів зсуву φ для усіх випадків відображені у таблиці 3. Показники кутів зсуву φ .

Таблиця 3

Швидкість різання, м/с	Передній кут різця, град						
	-10	-5	0	5	10	15	20
0,5	28,2919	30,2858	32,5141	34,8255	37,7053	41,9957	48,1870
0,85	28,0556	30,1282	32,0723	33,5791	35,5873	39,7605	47,5863
1,25	27,9416	29,9621	31,8432	33,2706	35,2025	39,3510	47,3229
1,6	27,9758	29,9104	31,7889	33,3192	35,3797	39,5563	47,2730
2	28,1158	29,9266	31,8432	33,6357	36,0042	40,2291	47,3229
2,35	28,3074	30,1089	32,0603	33,9555	36,4329	40,6509	47,4577
2,75	28,6502	30,6615	32,7433	34,6716	37,1232	41,2538	47,7520

Для визначення внутрішнього та зовнішнього кутів зсуву використана алгоритмічна модель розрахунку частина якої вперше представлена у роботі [8]. Структурна схема алгоритму графоаналітичного розрахунку кутів процесу стружкоутворення відображена на рис. 6.

Початковими даними для розрахунку є: величина переднього кута леза g , прийняті режими різання і емпіричні залежності для складових сили різання, а також значення кута зсуву φ , що приведені вище у таблиці 3. Показники кутів зсуву φ .

Усі посилання, математичні залежності та графічні процедури, що стосуються кожного із блоків алгоритмічної моделі опубліковані у роботі [9].

В таблиці 1 наведені режими різання та геометричні параметри леза, що були прийняті у якості початкових даних для експериментів.

Програмна реалізація алгоритмічної моделі здійснена у середовищі Microsoft Excel та графоаналітично у програмі КОМПАС-3D.

Усі функції блоку розрахунку знаходяться в структурі Microsoft Excel, тобто використовується відкрита послідовність розрахунків.

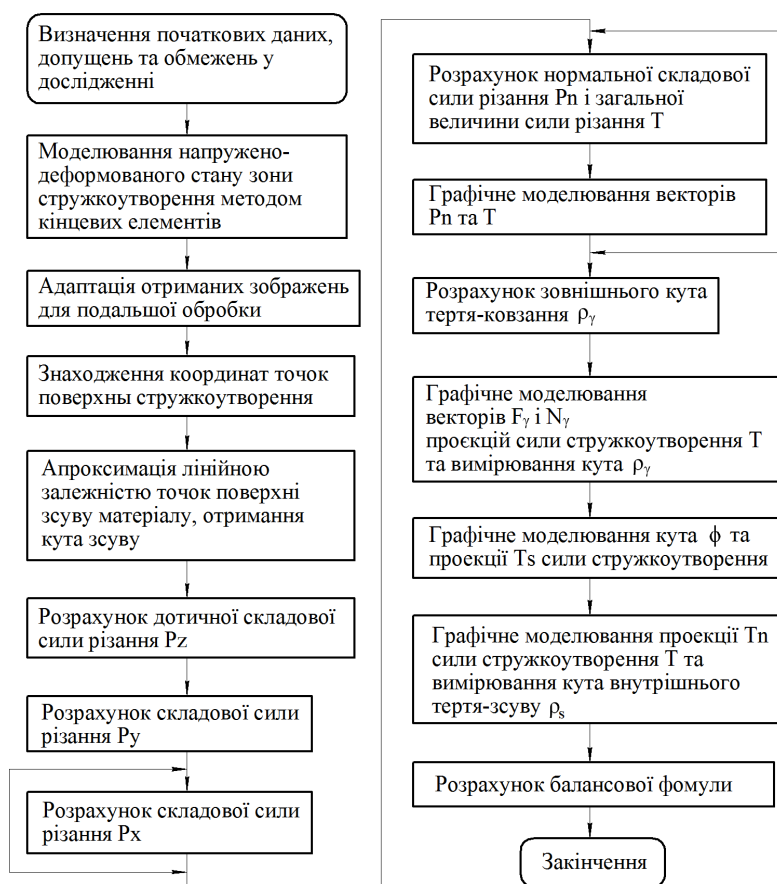


Рис. 6. Структурна схема алгоритму графоаналітичного розрахунку поверхні зсуву за допомогою метода кінцевих елементів

Для розрахунків застосована формула, що наведена в роботі [8]:

$$P_z = C_{P_z} t^{x_z} s^{y_z} V^n K_{P_z} \quad (3)$$

де x , y , z , h , n , u – показники ступеню (табл. 4. Показники ступеню у формулі (3)).

Таблиця 4

Складові сили різання [Н]	Коефіцієнт C_p для сталі		x	y	z	h	n	u
	45	12X18H9T						
Дотична P_z	1560	1790	1,0	0,75	-0,15	1,1	0,1	0,4
Нормальна P_y	620	809	0,9	0,60	-0,30	2,8	0,3	1,4
Осьова P_x	437	460	1,0	0,50	-0,40	2,4	-0,2	1,2

Враховуючи на те, що всі три складові сили різання підраховуються по одній і тій же формулі (2), то була створена відповідна підпрограма.

Дотичні напруження в площині зсуву T_s повинні бути відповідні розрахованим.

Загальні питання технологій збагачення

ним по емпіричним формулам складовим силам різання. Тому у подальших комп'ютерних обчисленнях показники ступенів у формулі (3) та величини кутів приведені у таблиці 3. Показники кутів зсуву ϕ .

З використанням запропонованої алгоритмічної моделі проведено серію комп'ютерних експериментів та одержані залежності кутів стружкоутворення від переднього кута леза (рис. 7) та від швидкості різання (рис. 8).

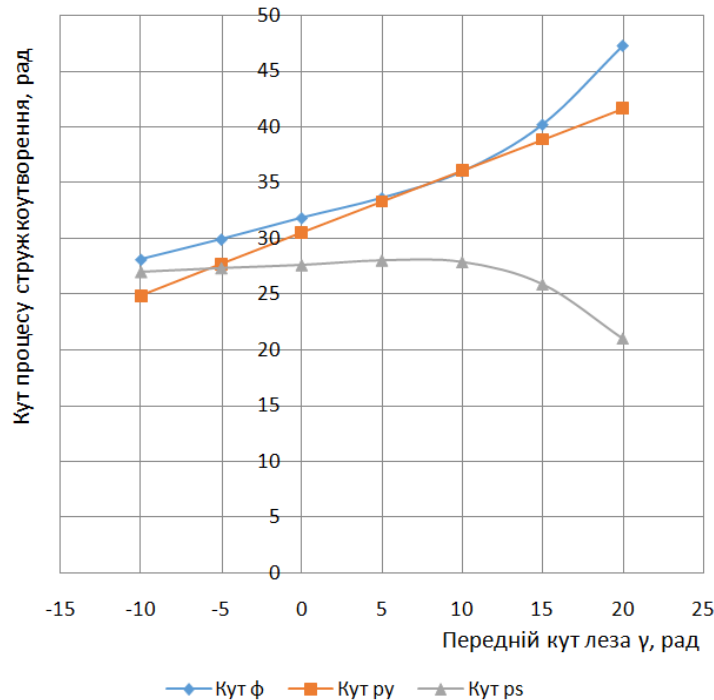


Рис. 7. Залежності кутів стружкоутворення від переднього кута леза для сталі 45

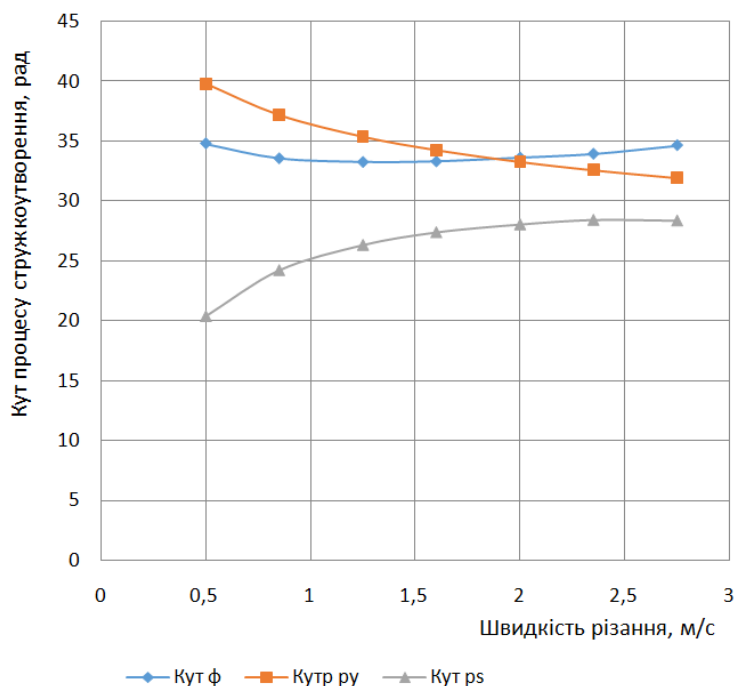


Рис. 8. Залежності кутів стружкоутворення від швидкості різання для сталі 45

Надані методики графоаналітичного розрахунку співвідношення кутів процесу стружкоутворення відповідають основним напрямкам наукових досліджень в технології машинобудування та матеріалознавстві. Наприклад, в роботах [10, 11] наведені результати експериментальних досліджень механізмів, оснований на терті. В роботах [12, 13] досліджено вплив проектних параметрів на експлуатаційні показники механізмів тертя. В роботах [14, 15] розглянуто способи підвищення міцності матеріалів та вплив їх на показники безпеки. В роботі [16] проаналізовано використання результатів моделювання для розрахунку параметрів механізмів.

Результати

1. Розроблена методика розрахунку співвідношення кутів процесу стружкоутворення з використанням моделювання напружено-деформованого стану, методу найменших квадратів та графоаналітичного методу розрахунку.

2. Програмна реалізація алгоритмічної моделі здійснена в середовищах DEFORM™-2D Machining, КОМПАС-3D та Microsoft Excel.

Висновки

1. Проведені комп'ютерні експерименти та визначені залежності кутів процесу стружкоутворення від швидкості різання та від переднього кута леза.

2. Для найпоширенішої у промисловому виробництві матеріалу марки сталі 45 кут ρ_s характеризується відносною стабільністю і, як правило, є більшим від кута ρ_γ на 5÷15 % в залежності від швидкості різання. В зв'язку з цим значення кута ρ_s може бути використано у якості першого наближення при інженерному аналізі процесу стружкоутворення.

3. Результати статті можуть бути використані для автоматизації підходу до визначення раціональних режимів різання для зниження собівартості виготовленого кінцевого продукту за рахунок зниження витрат матеріалу, інструменту та підвищення якості оброблювальної поверхні.

Список літератури

1. Проців В.В, Пацера С.Т., Журавель О.Ю., Недельский О.Г. Підвищення якості мінеральної сировини при відпрацюванні складно-структурних родовищ корисних копалин підземним способом // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2019. – Вип. 73(114). – С. 33-43.

2. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов / Н.Н. Зорев – М.: Машгиз, 1956. – 368 с.

3. Розенберг А.М. Элементы теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.Н. Еремин. – М.: Машгиз, 1956. – 319 с.

4. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров – М.: Машиностроение, 1975. – 344 с.

5. Мазур М.П. Основы теории резания металлов / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, В.Л. Доброскок та ін., під заг. ред. М.П. Мазура. – Новий світ 2000, 2010. – 422 с.

6. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применения. – М.: Мир. 1980

7. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – 2-е изд. – М., 1962. (математическая теория)

8. Zhuravel, O., Derbaba, V.A., Protsiv, V.V., Patsera, S.T. Interrelation between Shearing Angles of External and Internal Friction During Chip Formation. *Solid State Phenomena*, (291). *Materials Properties and Technologies of Processing*, 193-203 doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193

9. Кравченко Ю.Г. К вопросу эмпирического определения напряжений и коэффициентов трения при стружкообразовании / Ю.Г. Кравченко, В.А. Дербабя, Н.В. Крюкова // *Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. науч.-техн. сб. Харьков : НТУ "ХПИ"*, 2015. – Вып. 85. – С. 137 – 148.

10. Protsiv V.V. and Monya A.G. (2003). Experimental determination of characteristics of clutch of mine locomotive under the braking conditions, *Metallurgicheskaya i Gornorudnaya Promyshlennost* [online], 2, P. 95-97.

https://www.researchgate.net/publication/293546988_Experimental_determination_of_characteristics_of_clutch_of_mine_locomotive_under_the_braking_conditions [Accessed 20 January 2003].

11. Kyrychenko, Y., Samusia, V., Kyrychenko, V. and Goman, O., 2012. Experimental investigation of aeroelastic and hydroelastic instability parameters of a marine pipeline. *Geomechanical Processes During Underground Mining – Proceedings of the School of Underground Mining* [online], P. 163 – 167. <http://www.crcnetbase.com/doi/abs/10.1201/b13157-28> [Accessed 1 May 2017].

12. Protsiv, V.V., Samoilov, A.I., Bondarev, A.O. (2012). Design of braking process of mine diaxonic locomotive on rail way. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 66-70.

<http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/glavnaya/71-ruscat/arkhiv-zhurnala/2012/soderzhanie-5-2012/geotekhnicheskaya-i-gornaya-mekhanika-mashinostroenie/107-modelirovanie-protsesta-tormozheniya-shakhtnogo-dvuosnogo-lokomotiva-na-relsovom-puti> [Accessed 07 November 2012].

13. Protsiv, V.V., Novitsky, O.V., Samoilov, A.I. (2012). Advantages of magnetic loader over rail brakes on mine locomotive. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (4), 79-83.

<http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/glavnaya/89-ruscat/arkhiv-zhurnala/2012/soderzhanie-4-2012/geotekhnicheskaya-i-gornaya-mekhanika-mashinostroenie/184-preimushchestva-magnitorelsovogo-dogruzhatelya-nad-relsovim-tormozom-na-shakhtnom-lokomotive> [Accessed 09 November 2012].

14. Patsera S. Feasible Ways To Improve The Durability Of The Pumps' Parts Operating With Hydroabrasive Mixtures / S. Patsera, V. Protsiv, V. Kosmin // *Mechanics, Materials Science & Engineering : Journal – Viena : Magnolithe GmbH*, 2015. – Vol. 1. – P. 135 – 139. DOI 10.13140/RG.2.1.4039.5286.

15. Ziborov K. On Influence Of Design Parameters Of Mining Rail Transport On Safety Indicators / Ziborov K., Protsiv V., Fedoriachenko S., Verner I. // *Mechanics, Materials Science & Engineering : Journal – Viena: Magnolithe GmbH*, 2016. – Vol. 2. – P. 62-69. DOI 10.13140/RG.2.1.2548.5841.

16. Protsiv, V.V. (2013). Usage of tire-shoe brake on mine locomotive. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (3), 59-64.

<http://nv.nmu.org.ua/index.php/ru/glavnaya/776-ruscat/arkhiv-zhurnala/2013/soderzhanie-3-2013/geotekhnicheskaya-i-gornaya-mekhanika-mashinostroenie/2169-ispolzovanie-bandazhno-kolodochno-tormoza-na-shakhtnom-lokomotive> [Accessed 09 July 2013].

© Журавель О.Ю., 2019

*Надійшла до редколегії 10.09.2019 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. В.П. Надутим*