

© В.А. Дербаба¹, С.Т. Пацера¹, О.О. Богданов¹, В.М. Рубан¹, Д.Г. Музичка²

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

²Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ СИЛ РІЗАННЯ ПІД ЧАС ТОЧІННЯ ВИСОКОТВЕРДИХ ЧАВУНІВ

© V. Derbaba¹, S. Patsera¹, O. Bohdanov¹, V. Ruban¹, D. Muzychka²

¹Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

²Dniprovsky State Technical University, Kamianske, Ukraine

STUDY OF CUTTING FORCES DURING TURNING OF HIGH-HARD CAST IRONS

Мета. Дослідження складових сили різання при механічній обробці високотвердих чавунів спеціальними збірними різцями з напайними вставками нібориту та кібориту. Встановлення впливу геометричних характеристик різального інструменту, режимів різання та твердості оброблюваного матеріалу на сили різання.

Методика. Методи проведення досліджень базувалися на основах теорії різання та різального інструменту, матеріалознавчих властивостях інструментального та оброблюваного матеріалу. Використання дослідницького стенду зі спеціальною апаратурою.

Результати. Експериментально досліджено характер зміни складових сил різання від глибини t , подачі S і швидкості v різання. Проведені дослідження показали перевищення результуючої сили в горизонтальній площині P_v над окружною P_z , що є головною особливістю точіння високотвердих металів. Встановлено, що головними обмежувальними факторами зносу ріжучих пластин інструменту є допустимі рівні сил. Твердість HB найбільшою мірою впливає на радіальну силу P_y . За ідентичних умов точіння матеріалів твердістю від 220 до 610 HB сили P_z , P_y і P_x зростають відповідно в 1,7; 3,3 та 2,3 рази. Крім закономірного зростання змінюється і співвідношення сил різання. Зменшення переднього кута леза спричиняє погіршення умов стружкоутворення і веде до збільшення всіх складових сил різання. Збільшення радіуса при вершині різця r зумовлює збільшення ширини і зменшення товщини шару, що зрізається, а також зменшення головного кута в плані ϕ_r на радіусній частині леза.

Наукова новизна. Отримано комплексну залежність у структурно-ступеневому вигляді, яка дає наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу точіння на його показники. Дана залежність являє собою математичну модель для розрахунку оптимальних режимних і геометричних параметрів процесу точіння високотвердих чавунів. Досліджено вплив переднього кута γ , величини зносу h і твердості чавуну HB на силові характеристики при механічній обробці високотвердих чавунів.

Практична значимість. Показано, що економічно вигідно доводити до максимально можливого значення знос ріжучих пластин з відносно дорогих композитів. При цьому необхідно застосування технологічної системи верстат-заготівля-інструмент високої жорсткості.

Ключові слова: теорія різання, різальний інструмент, сили різання, геометрія інструменту, чавуни, інструментальні матеріали, оптимальні режими різання.

Вступ. Сили різання є одними з найважливіших показників багатфакторного управління процесом механічної обробки. Складові сили різання слугують

вихідними даними для розрахунку потужності приводу робочих механізмів верстатів, міцності та жорсткості ланок технологічної системи (вузлів верстатів, елементів оснащення, ріжучих інструментів і заготовки), навантажень на контактних поверхнях ріжучих інструментів.

Аналіз проблеми визначення сил різання залежно від фізико-механічних характеристик оброблюваного матеріалу, геометрії ріжучого інструменту, режимів різання показав, що значний внесок її в розв'язання внесено роботами Брікса О.О., Кривоухова В.А., Грановського Г.І., Кравченка Б.А., Розенберга О.М., Зорева М.М., Резнікова А.М. та ін.

Цими та іншими дослідниками були закладені фундаментальні основи теорії з визначення сил різання. Існує низка підходів, пов'язаних із визначенням сил різання, заснованих на різних гіпотезах механіки різання, про що свідчать великі теоретичні та експериментальні дослідження. Теоретичні роботи, як правило, містять прийняті авторами допущення, які вносять певну похибку у визначення значень сил різання [1].

Так, у роботах Резнікова А.М. з визначення сил різання не враховано величину зносу фаски за нульового зносу по задній поверхні інструменту [2]. Вираз Кривоухова В.А. спрощено встановлює зв'язок між силами, що виникають на задній поверхні різального інструменту, і твердістю оброблюваного матеріалу. Слід зазначити, що практично всі автори не враховують впливу заднього кута, що є суттєвим під час визначення складових сил різання P_x та P_y , які багато в чому визначають точність оброблення, особливо на верстатах із ЧПК. Для визначення сил різання в інженерних розрахунках користуються емпіричними залежностями, які справедливі для конкретних умов обробки (матеріал, інструмент, діапазон режимів різання). Як правило, вирази в цьому випадку щодо визначення сил різання містять велику кількість поправочних коефіцієнтів, які є функціями деяких змінних.

Система сил опору стружкоутворенню становить основу механіки процесу різання. У практичних цілях використовують складові (проекції) сили різання, напрямки яких орієнтовані відносно напрямків головного руху різання і руху подачі.

Основна частина. Закономірності процесу різання конструкційних сталей і деяких марок чавунів експериментально вивчені [3, 4] досить повно. Поряд із цим визначення сил різання під час лезової обробки високотвердих чавунів інструментом із композиційних матеріалів на основі щільних модифікацій кубічного нітриду бору має свої особливості та відмінності. Так, у роботі М.М.Зорева [3, 5] вплив умов точіння чавуну твердістю $HВ = 120 \div 320$ сплавом ВК8 (геометрія інструменту: $\varphi = 45^\circ$, $\gamma = 10 \div (-10)^\circ$, $\lambda = 0^\circ$, $r = 1 \div 4$ мм, $h = 0,5 \div 1,5$ мм, де φ – кут у плані, γ – передній кут, λ – кут нахилу ріжучої кромки, r – радіус заокруглення, h – характеристика зносу інструменту) на сили різання враховано поправочними коефіцієнтами. Опрацювання значень цих коефіцієнтів дало змогу отримати степеневі залежності сил різання від твердості оброблюваного матеріалу ($\frac{HВ}{200}$) – $q_z = q_y = q_x = 1,15$, пе-

реднього кута $(1 - \frac{\gamma}{90})^\eta$ – $\eta_z = 0,8$, $\eta_y = 2,1$, $\eta_x = 2,8$, радіуса при вершині леза різця

$(1+r)^v - v_z = 0$, $v_y = 0,25$, $v_x = -0,21$ та величини зносу задньої поверхні ріжучої частини інструмента $(1+h)^u - U_z = 0,32 \div 0,7$, $U_y = U_x = 0,54 \div 0,98$ для величини подачі $S = 0,3 \div 1,0$ мм/об.

Згідно з емпірико-розрахунковими даними під час точіння вибілених чавунів твердим сплавом ($\varphi = 30^\circ$, $\lambda = 30^\circ$, $r = 1$ мм, $h = 0,5$ мм) співвідношення сил $P_z : P_y : P_x$ дорівнює $1 : 1,5 : 0,6$ при HRC 35, $\gamma = -10^\circ$ та $1 : 2,2 : 1$ при HRC 65, $\gamma = -20^\circ$ становлять $q_z = 0,8$, $q_y = 1,1$, $q_x = 1,15$.

Порівняння значень складових сили різання під час точіння чавуну марки СЧ28 ($\sigma_s = 330$ МПа, $\sigma_{-s} = 900$ МПа, HB ≈ 200) і високохромистого марки ПЧХХ28Н2 ($\sigma_s = 330$ МПа, $\sigma_{-s} = 2150$ МПа, HB ≈ 500) твердим сплавом ВК6М ($l_\varphi = 2,5$ мм, $f_y \times \gamma_f = 1 \times (-5)^\circ$) з $t = 1 \div 3$ мм, $S = 0,5 \div 1,0$ мм/об, $v = 0,25$ м/с [6] показали, що твердість оброблюваного матеріалу чинить істотний вплив на сили різання за такого значення показників ступеня $q_z = 0,65$, $q_y = 1,65$, $q_x = 1,55$.

Дослідженнями процесу точіння загартованого чавуну твердістю HRC = 45÷50 різцями з композиту (ельбор – Р) з різним ступенем зношення ($\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 15^\circ$, $\gamma = -10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $r = 0,8$ мм) встановлено [7], що за величини зношення h , що змінюється від 0,05 до 0,5 мм, сила P_z зростає в 1,5–2 рази ($U_z \approx 0,25$), P_y – у 4–5 разів ($U_y \approx 0,65$), P_x – у 3–4 рази ($U_x \approx 0,55$).

Вплив режимів точіння на сили різання представлено ступеневими залежностями

$$P_i = c_i \cdot t^{0,7 \div 0,9} \cdot S^{0,4 \div 0,6} \cdot v^{-(0,05 \div 0,12)} \quad (1)$$

На середньому рівні варіювання вхідних параметрів режимів різання значення сил становить: $P_z = 320$ Н, $P_y = 920$ Н, $P_x = 420$ Н.

Переважна більшість робіт з дослідження сил різання, присвячені точенню загартованих швидкорізальних (Р18, Р6М5), легованих (НВГ, 9ХС) і підшипникових (ШХ15) сталей. При цьому умови обробки відповідали тонкому точенню: $t = 0,2 \div 0,8$ мм, $S = 0,02 \div 0,16$ мм/об, $v = 1 \div 3$ м/с, $\varphi/\varphi_1 = 45^\circ/15^\circ$, $\gamma = 0^\circ \div (-20^\circ)$, $\alpha = 6 \div 10^\circ$, $\lambda = 0 \div 5^\circ$, $r = 0,4 \div 0,8$ мм, $h = 0,4$ мм. В таблиці 1 приведені значення показників ступеня для складових сили різання.

Таблиця 1

Значення показників ступеня

Показники ступеня	P_z	P_y	P_x	Джерело
x	0,75÷1,0	0,75÷0,95	0,9÷1,1	[7, 8–10]
y	0,65÷0,75	0,58÷0,8	0,56÷0,65	
z	-(0,13÷0,38)	-(0,15÷0,25)	-(0,15÷0,41)	
q	0,2÷0,9	0,75÷1,5	0,65÷0,9	[10]
u	0,4÷0,9	0,85÷0,9	0,65÷0,7	[10]

Вплив переднього кута леза γ і радіуса при вершині r досліджено для отримання узагальнених даних вкрай обмежено. Різні умови проведення вимірювань сил різання (режими точіння, геометрія ріжучої частини і ступінь затуплення різців,

твердість і марка оброблюваної сталі) не дають змоги визначити усереднений коефіцієнт пропорційності c .

Дослідження силових характеристик різання виконувалися в процесі точіння заготовок $\varnothing 120 \times 600$ мм на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16К20П. Оброблюваним матеріалом був низьколегований чавун СЧ25 різної твердості після поверхневого загартування ТВЧ і високохромистий чавун ІЧ210Х28Г3С у литому стані твердістю НВ = $530 \div 550$ і після термообробки твердістю НВ = $600 \div 620$ [11].

Як різальний інструмент застосовували спеціальні збірні різці з напайною вставкою з ПСТМ марки ніборит і квадратної форми $12,7 \times 12,7 + 4,76$ мм з ПСТМ марки кіборит. З метою запобігання поломок пластин із ПСТМ під час експлуатації з підвищеними навантаженнями і вібраціями площинність опорних поверхонь державки різця і різального елемента забезпечувалася в межах $0,01$ мм, і зазор у місці стику не допускався.

Оскільки точіння високотвердих матеріалів проводиться зазвичай з малими глибинами різання через невеликі припуски і порівняно збільшеними радіусами при вершині різця для підвищення міцності ріжучих пластин, то фактично різання відбувається радіусною частиною різця. Тому кути в плані залишалися незмінними $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. Заточування ріжучої частини інструменту здійснювали алмазними кругами $12A2 \times 45^\circ 150 \times 32 \times 10 \times 3$, АС4 100/80 В2-01-4 за ($t = 0,02 \div 0,03$ мм/подв. хід, $S = 0,015 \div 0,03$ мм/об, $v = 25 \div 30$ м/с з виходжуванням (параметр шорсткості $Ra \approx 0,63$ мкм) на універсально-заточувальному верстаті.

Вимірювання окружної P_z , радіальної P_y і осьової P_x складових сил різання проводили за допомогою універсального динамометра моделі УДМ-300 і УДМ-600, тензопідсилювача ТА-5, стенда з міліамперметрами М266М і 4-х каналних швидкодіючих самописних приладів моделі Н338-4П і Н3021-4 з шириною запису кожного вимірювального каналу на діаграмній стрічці шириною відповідно 40 і 80 мм. Тарувальний графік залежності сил різання від показань міліамперметра $P_i = c \cdot I$ будувався за результатами пружного навантаження кожної компоненти динамометра на вертикально-фрезерному верстаті через зразковий динамометр ДОУ-05 з межами вимірювань $0,5 \div 5 \cdot 10^3$ Н. Перед кожною серією експериментів проводилося контрольне тарування вимірювальної системи безпосередньо на робочому місці за допомогою вантажів. Принципова схема вимірювання сил різання, обладнання, апаратура, матеріал, інструмент наведені на рисунках 1–2.

Отримані дані щодо впливу режимів точіння на складові сили різання наведені в таблиці 2, яка представлена у вигляді матриці планування однофакторного експерименту, що базується на реєстрації сил різання (рис. 2).

Пропорційне зростання сил від глибини різання t (рис. 3) пов'язане з відповідним збільшенням ширини шару, що зрізається.

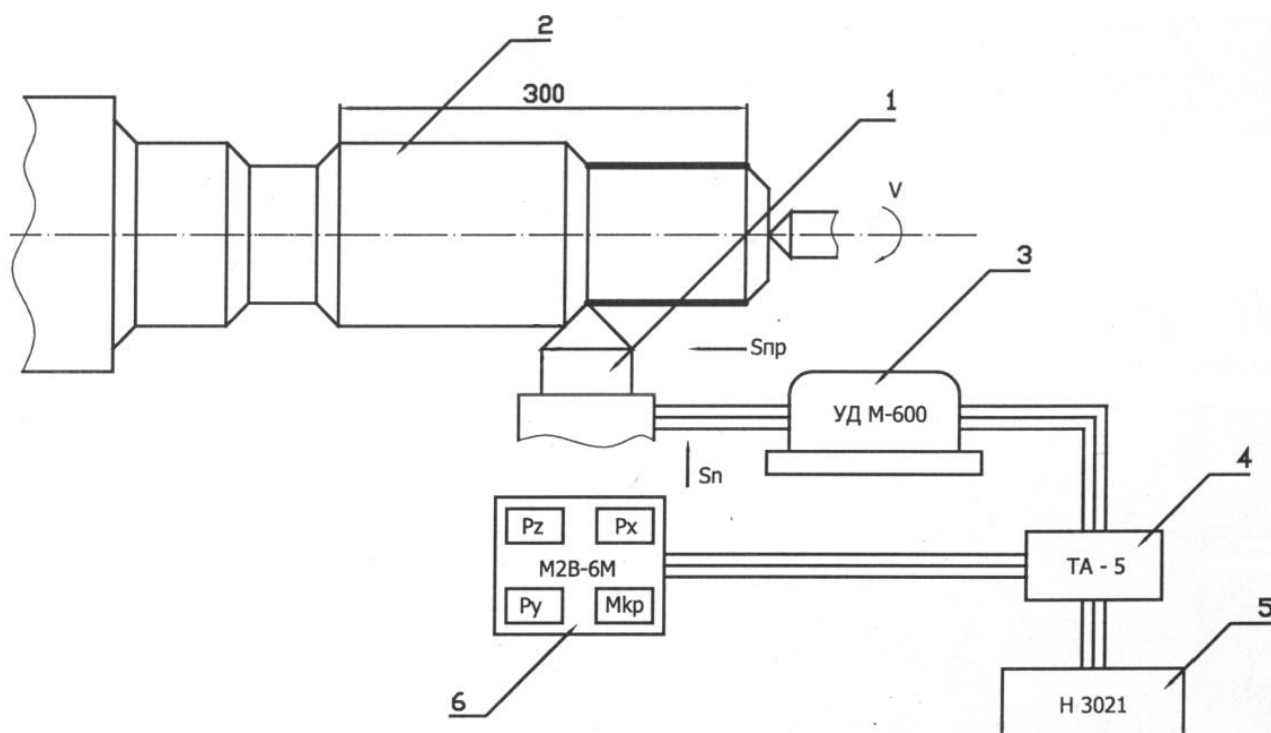
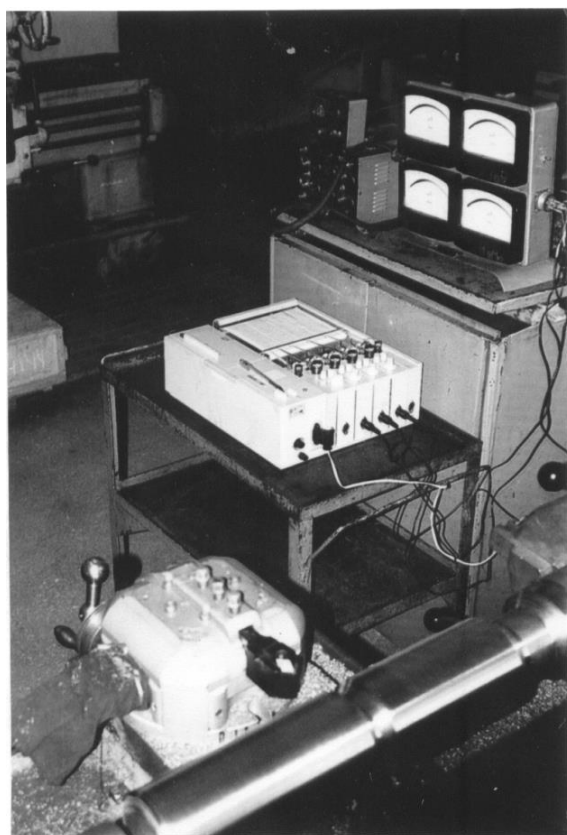
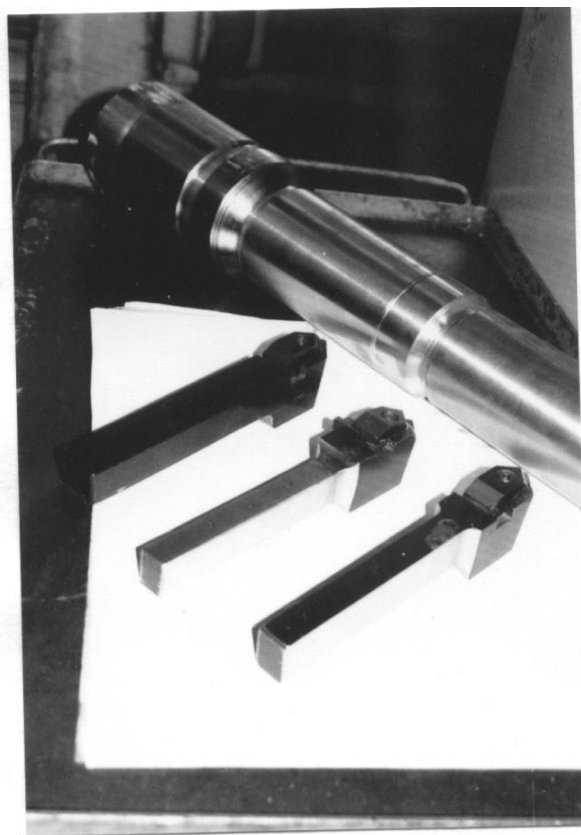


Рис. 1. Схема вимірювання сил P_z , P_y , P_x у зоні різання під час обробки чавунів різцями з кібориту та нібориту: 1 – різець, 2 – ділянка досліджень, 3 – динамометр, 4 – підсилювач, 5 – осцилограф, 6 – щит приладів



а)



б)

Рис. 2. Вихідне положення інструменту та зразка (а), зразок – чавун ІЧ210Х28ГЗС та інструмент – різці з кібориту та нібориту (б)

Таблиця 2

Значення складових сили різання залежно від режимів точіння
($\gamma = -20^\circ, r = 2 \text{ мм}, h = 0,4 \text{ мм}$)

$t, \text{ мм}$	$S, \text{ мм/об}$	$v, \text{ м/с}$	$P_z, \text{ Н}$	$P_y, \text{ Н}$	$P_x, \text{ Н}$
1,5	0,3	1	2000	3000	1250
0,5	0,3	1	850	1050	400
2,5	0,3	1	3020	4700	2020
1,5	0,1	1	1000	1600	700
	0,5	1	2850	4020	1600
1,5	0,3	0,5	2200	3200	1300
		1,5	1900	2900	1200

При збільшенні подачі (товщини зрізу) відбувається незначне збільшення кута зсуву і зменшення коефіцієнта усадки стружки. Через зменшення ступеня деформації шару, що зрізається, зростання сил на передній поверхні відстає від зростання товщини зрізу, і тому ступінь впливу подачі завжди значно менший за одиницю [12–14].

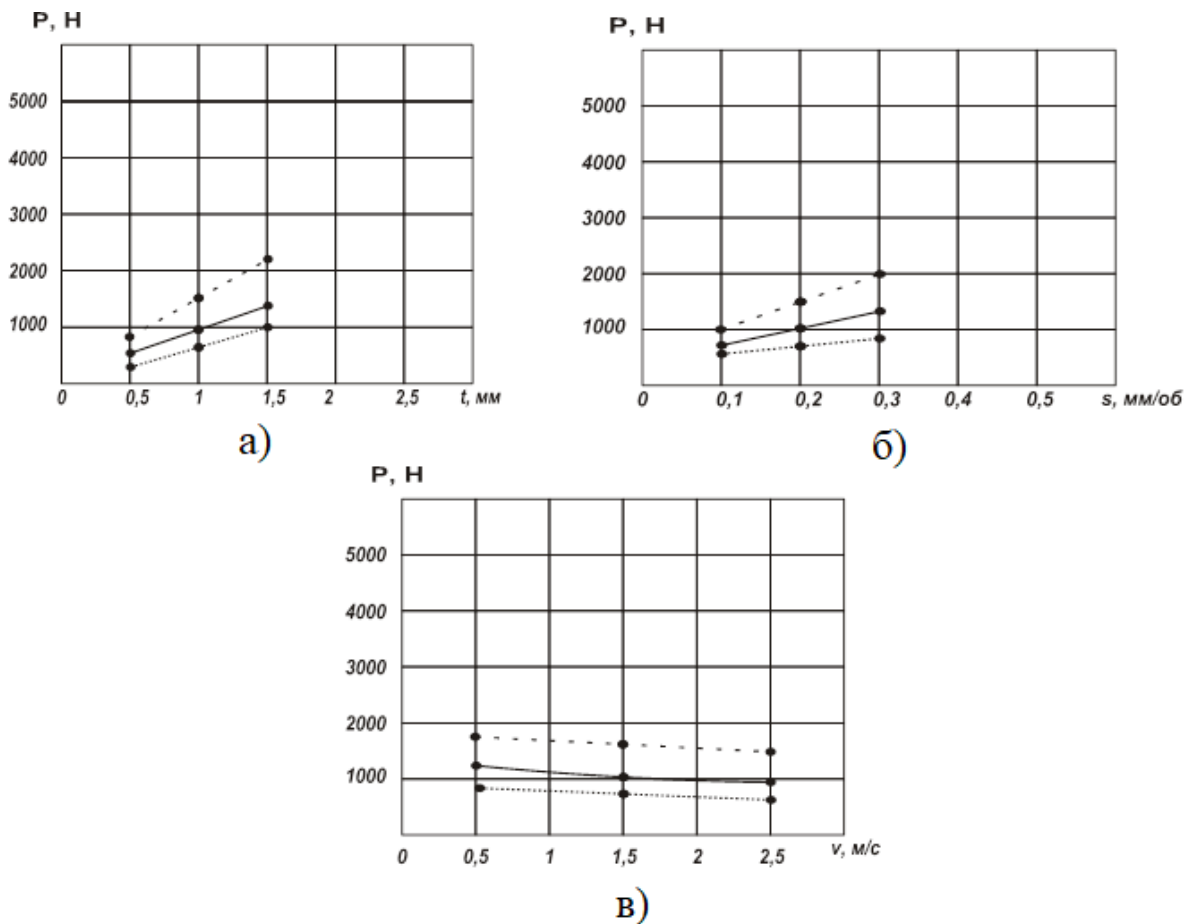


Рис. 3. Зміна тангенціальної P_z (—), радіальної P_y (----) і осьової P_x (.....) сил різання залежно від глибини t (а), подачі S (б) і швидкості v (в) різання; чавун ІЧ210Х28Г3С НВ 600÷620; кіборит ($f_\gamma \times \gamma_f = 0,2 \text{ мм} \times (-20^\circ)$, $r = 1,6 \text{ мм}, h = 0,3 \text{ мм}$): а) $S = 0,2 \text{ мм/об}, v = 1,5 \text{ м/с}$; б) $t = 1 \text{ мм}, v = 1,5 \text{ м/с}$; в) $t = 1 \text{ мм}, v = 0,2 \text{ м/с}$

У таблиці 3 і рисунку 4 наведено експериментальні дані щодо впливу геометрії леза на складові сили різання. Кути в плані $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ і задні кути $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$ залишалися незмінними. Передня поверхня виконувалася із захисною (зміцнювальною) фаскою $f_\gamma = 0,5$ мм під потрібними кутами γ .

Таблиця 3

Значення складових сил різання залежно від геометричних параметрів леза
($t = 1,5$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $v = 1$ м/с)

γ , град	r , мм	h , мм	P_z , Н	P_y , Н	P_x , Н
-20	2	0,4	2000	3000	1250
-30			2100	3400	1400
-10	2	0,4	1900	2700	1125
0			1700	2300	1000
	1		1900	2700	1400
-20	3	0,4	2100	3200	1175
	4		2200	3400	1100
		0,1	1800	2100	950
-20	2	0,7	2250	4100	1600

Зменшення переднього кута (рис. 4) спричиняє відоме в теорії різання погіршення умов стружкоутворення (зменшення кута зсуву і збільшення коефіцієнта усадки стружки) і, як випливає з табл. 3, збільшення всіх складових сил різання. Незважаючи на підвищення енергетичних показників процесу, негативні значення γ під час точіння високотвердих матеріалів необхідні для того, щоб вектор рівнодійної сил різання збігався якомога ближче з лінією об'ємної симетрії леза, і композити, які не мають достатньої міцності на вигин, працювали на стиск. Зменшення кута γ спричиняє не тільки зростання сил, а й зміну їхнього співвідношення. При зменшенні γ від 0 до -30° складові сили різання P_z , P_y і P_x збільшуються відповідно в 1,23, 1,48, 1,40 рази, що вказує на зростання результуючої сили в основній площині $P_v = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$ і сприятливе з погляду міцності леза

зменшення кута нахилу вектора рівнодійної сил різання $R = \sqrt{P_z^2 + P_v^2}$ до основної площини. Збільшення радіуса при вершині різця r зумовлює збільшення ширини і зменшення товщини шару, що зрізається, а також зменшення головного кута в плані φ_r на радіусній частині леза. Від збільшення ширини та зменшення товщини зрізу відбувається збільшення окружної сили P_z , а від зменшення кута φ_r – зростання радіальної та зменшення осьової сил.

Знос ріжучих пластин з відносно дорогих композитів економічно вигідно доводити до максимально можливого значення, головними обмежувальними факторами якого є допустимі рівні сил. Зростання нормальної і дотичної сил на задній поверхні в міру розвитку її зносу спричиняє додатковий приріст загальної сили різання. Збільшення зносу по задній поверхні від 0,1 до 0,7 мм призводить до зростання сил на задній поверхні і в міру розвитку її зносу спричиняє

додатковий приріст складових сил різання. Збільшення зносу на задній поверхні від 0,1 до 0,7 мм призводить до зростання сил P_z в 1,25; P_y – 1,95; P_x – 1,68 рази. Таке перевищення сил P_y і P_x вимагає для роботи з великими зносами застосування технологічної системи верстат-заготівля-інструмент високої жорсткості.

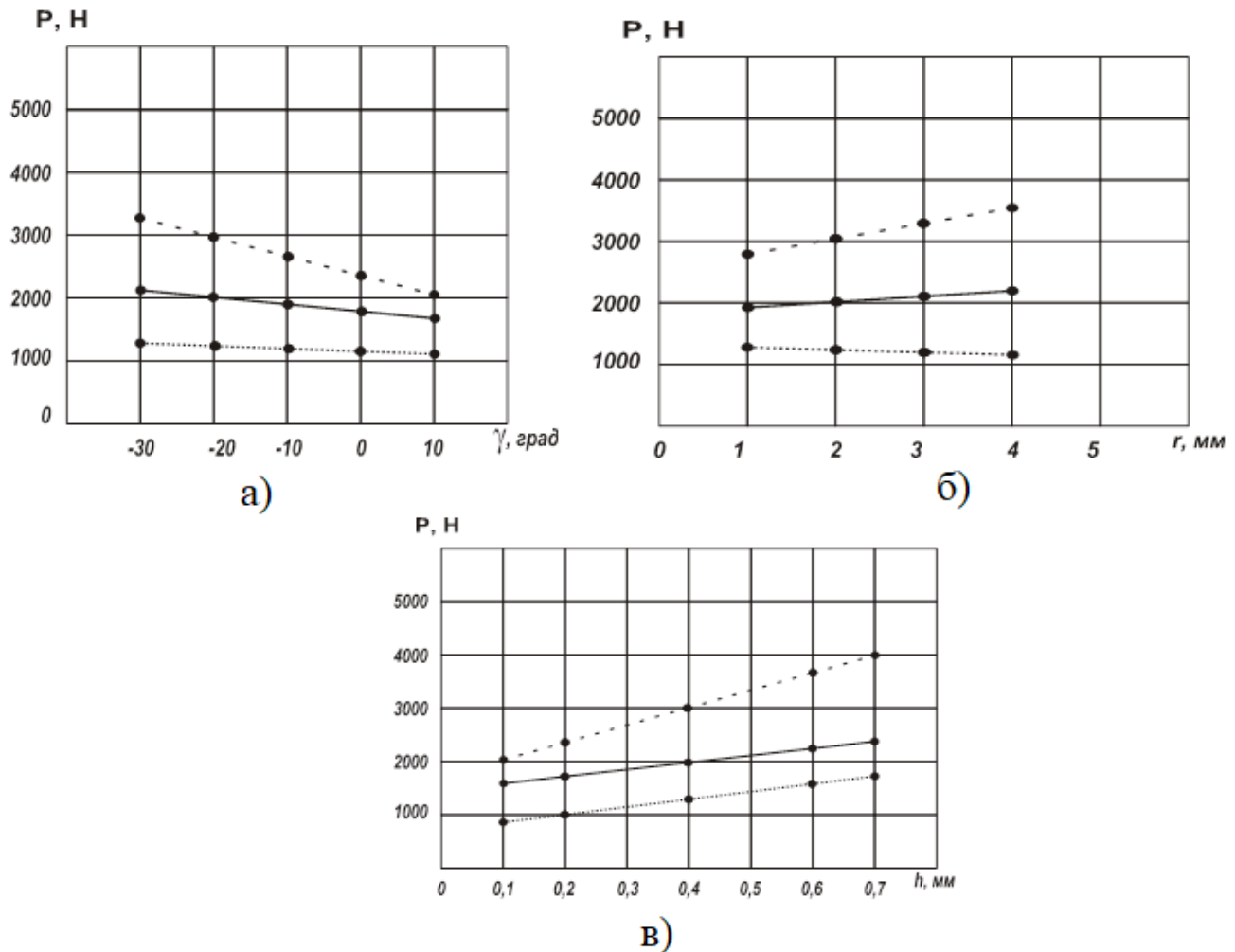


Рис. 4. Зміна тангенціальної P_z (—), радіальної P_y (----) і осьової P_x (.....) сил різання залежно від переднього кута γ (а), радіуса при вершині r (б) і величини зносу h (в) у процесі різання чавуну ІЧ210Х28Г3С НВ 530 ÷ 550 різцем із нібориту ($t = 1,5$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $v = 1$ м/с): а) $S = 0,2$ мм/об, $v = 1$ м/с; б) $\gamma = 20^\circ$, $v = 1,5$ м/с; в) $\gamma = 20^\circ$, $v = 0,2$ м/с

Твердість, як найбільш значуща характеристика оброблюваності металів, взаємопов'язана з силами різання через міцність на зсув. Вплив твердості НВ представлено на рис. 5. Різна твердість низьколегованого чавуну СЧ25 досягалася поверхневим загартуванням СВЧ, а твердість НВ = 600 ÷ 620 чавуну ІЧ210Х28Г3С – об'ємним загартуванням та відпустком.

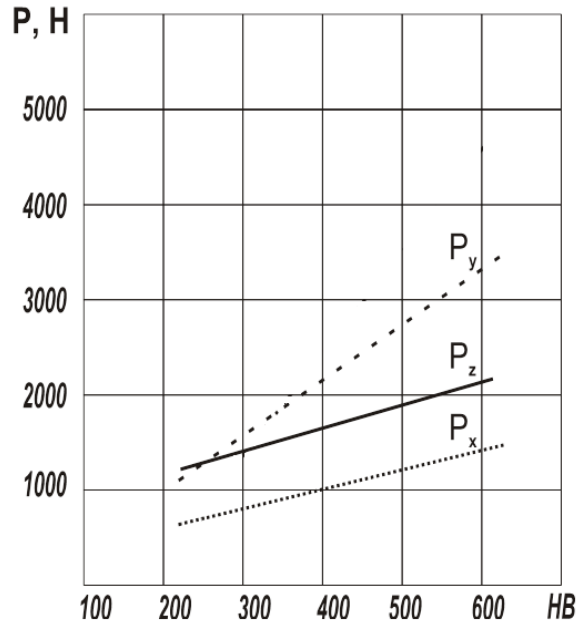


Рис. 5. Зміна тангенціальної P_z (—), радіальної P_y (----) і осьової P_x (.....) сил різання залежно від твердості оброблюваних чавунів HB: чавуни СЧ25 HB 220, 330, 400, 470 і ІЧ210Х28Г3С HB 540, 610 – ніборит ($t = 1,5$ мм, $S = 0,3$ мм/об, $v = 1$ м/с, $\gamma = -20^\circ$, $r = 2$ мм, $h = 0,4$ мм)

З графіків слід, що твердість HB найбільшою мірою впливає на радіальну силу P_y . За ідентичних умов точіння матеріалів твердістю від 220 до 610 HB сили P_z , P_y і P_x зростають відповідно в 1,7; 3,3; 2,3 рази. Крім закономірного зростання змінюється і співвідношення сил різання (табл. 4).

Таблиця 4

Співвідношення сил різання під час обробки чавунів різної твердості

HB	P_z	P_y	P_x	P_v
220	1	0,84	0,48	0,96
400	1	1,24	0,59	1,37
540	1	1,50	0,62	1,62
610	1	1,57	0,64	1,69

Перевищення результуючої сили P_v над окружною силою P_z є головною особливістю процесу точіння високотвердих чавунів і вимагає відповідних умов їх обробки.

Систематизація та опрацювання експериментальних даних дали змогу отримати комплексні залежності в зручному для розрахунку й аналізу структурно-ступеневому вигляді:

$$P = C_n \cdot t^{x_n} \cdot S^{y_n} \cdot v^{z_n} \cdot \left(1 - \frac{\gamma}{90}\right)^{h_n} \cdot (1+r)^{v_n} \cdot (1+h)^{u_n} \cdot \left(\frac{HB}{200}\right)^{q_n} \quad (2)$$

Значення коефіцієнта пропорційності та показників ступеня наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Значення коефіцієнта пропорційності та показники ступеня

P	C_p	x_n	y_n	z_n	h_n	v_n	u_n	q_n
P_z	1149	0,85	0,68	-0,15	0,6	0,15	0,6	0,55
P_y	480	0,92	0,60	-0,11	1,4	0,23	1,5	1,15
P_x	429	1,00	0,54	-0,11	1,2	-0,19	1,3	0,85

Встановлені залежності дають наочне уявлення про ступінь впливу кожного параметра процесу точіння на його енергетичні показники. Особливий інтерес становлять отримані результати малодослідженого до теперішнього часу впливу переднього кута γ , величини зносу h і твердості чавуну НВ.

Рівняння (2) досліджених показників з технічними обмеженнями спільно з показниками зносостійкості, надійності інструменту і якості обробленої поверхні, являють собою математичну модель для розрахунку оптимальних режимних і геометричних параметрів процесу точіння чавунів.

Висновки. Існуючі математичні залежності для визначення сил різання небездоганні щодо точності розрахунку (похибка розрахунку становить від 10,5 % до 180 %), оскільки вони не враховують впливу анізотропії оброблюваного матеріалу, радіус заокруглення ріжучої крайки r , передній кут леза γ та величини зносу інструменту h .

Знос ріжучих пластин з дорогих композитів економічно вигідно доводити до максимально можливого значення, головним обмежувальним фактором якого є допустимі рівні сил різання.

Найбільшою мірою твердість оброблюваного матеріалу впливає на радіальну силу P_y . За ідентичних умов точіння чавунів твердістю від 220 до 610 НВ сили P_z , P_y і P_x зростають відповідно в 1,7; 3,3 та 2,3 рази.

Перевищення результуючої сили в горизонтальній площині P_v над окружною P_z є головною особливістю точіння високотвердих металів.

Систематизація та обробка експериментальних даних дала змогу отримати комплексні залежності у структурно-ступеневому вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу точіння на його показники.

Перелік посилань

1. Мазур, М.П., Внуков, Ю.М., Грабченко, А.І., Доброскок, В.Л., Залого, В.О., Новосьолов, Ю.К., & Якубов, Ф.Я. (2020). *Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищ. навч. закладів]*. Новий Світ-2000.
2. Резников, А.М. (1981). *Теплофізика процесів механічної обробки матеріалів*. Машинобудування.
3. Зорєв, М.М. (1956). *Питання механіки процесу різання металів*. Машгіз.
4. Розенберг, А.М., & Єремін, А.Н. (1956). *Елементи теорії процесу різання металів*. Машгіз.
5. Зорєв М.М. (1958). *Розрахунок проєкції сил різання*. Машгіз.
6. Сташков, А.Н., Теслер, Ш.Л., Шабашов, С.П., & Елинсон, Д.С. (1977). *Обробка різанням важкообробних матеріалів з нагріванням*. Машинобудування.
7. Кочеровський, А.С., & Негинський, Є.А. (1988). Сила різання при чистовій обробці чавуну композитами із різальною кераміки. *Верстати та інструмент*, 5, 27–29.

8. Каменкович, А.С., Музикант, Я.А. (1972). Застосування різців із ельбору. *Верстати та інструмент*, 6, 27–29.
9. Резников, А.М. (1977). *Абразивна та алмазна обробка матеріалів: Довідник*. Машинобудування.
10. Lysanov, V. (1978). *Elbor in Mechanical Engineering*. Mashinostroenie.
11. Дідик, Р.П., Кравченко, Ю.Г., & Мелещук, В.А. (2002). Сили та температура різання при точінні композитами зносостійких чавунів. *Зб. наук. праць НГУ*, 64–69.
12. Bohdanov, O. & Protsiv, V. & Derbaba, V. & Patsera, S. (2020). Model of surface roughness in turning of shafts of traction motors of electric carst. *Naukovy Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 41–45.
<https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-1/041>
13. Дербабa, В.А. (2013). Моделювання впливу похибок виміру загальних нормалей зубів на показники розбракування. *Східноєвропейський журнал передових технологій*, 6(4 (66)), 48–52.
14. Пацера, С.Т., Корсун, В.І., Дербабa, В.А., & Ружин, П.О. (2016). Алгоритм імітаційно-статистичного дослідження контрольно-вимірювальної системи та його програмна реалізація у Ni LabVIEW. *Системи обробки інформації*, (6), 116–119.

ABSTRACT

Purpose. Research of cutting force components during machining of high-hard cast iron by special prefabricated cutters with brazed nioborite and cborite inserts. Determination of the influence of geometric characteristics of the cutting tool, cutting modes and hardness of the material being machined on the cutting forces.

The methods. The research methods were based on the fundamentals of cutting theory and cutting tools, material science properties of the tool and processed material. A research bench with special equipment was used.

Findings. The nature of the change in the components of cutting forces with depth t , feed rate S and cutting speed v was experimentally investigated. The studies have shown an excess of the resulting force in the horizontal plane P_v over the circumferential one P_z , which is the main feature of turning high-hard metals. It has been established that the main limiting factors in the wear of tool cutting inserts are the permissible levels of forces. The hardness of HB has the greatest effect on the radial force P_y . Under identical turning conditions for materials with a hardness of 220 to 610 HB, the forces P_z , P_y and P_x increase by 1,7; 3,3 and 2,3 times, respectively. In addition to the natural increase, the ratio of cutting forces also changes. Reducing the front angle of the blade causes a deterioration in chip formation conditions and leads to an increase in all components of the cutting forces. An increase in the radius at the top of the cutter r causes an increase in the width and decrease in the thickness of the layer to be cut, as well as a decrease in the main angle in the plan φ_r on the radial part of the blade.

The originality. A complex dependence in the structural-stage form was obtained, which gives a clear picture of the influence of each parameter of the turning process on its performance. This dependence is a mathematical model for calculating the optimal operating and geometric parameters of the turning process of high-hard cast irons. The influence of the frontal angle γ , wear value h , and hardness of HB cast iron on the power characteristics during machining of high-hard cast irons has been studied.

Practical implementation. It has been shown that it is economically advantageous to maximize the wear of cutting inserts made of relatively expensive composites. In this case, it is necessary to use a technological system of machine-workpiece-tool of high rigidity.

Keywords: cutting theory, cutting tools, cutting forces, tool geometry, cast irons, tool materials, optimal cutting conditions.