

© В.А. Дербаба<sup>1</sup>, С.Т. Пацера<sup>1</sup>, В.У. Григоренко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ЗНОСОСТІЙКИХ ЧАВУНІВ

© V. Derbaba<sup>1</sup>, S. Patsera<sup>1</sup>, V. Hryhorenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

### FEATURES OF MECHANICAL PROCESSING OF WEAR-RESISTANT CAST IRON

**Мета.** Розв'язання науково-технічної задачі, пов'язаної з технологічним забезпеченням високопродуктивної механічної обробки зносостійких чавунів шляхом оптимізації та управління їх оброблюваністю інструментом з полікристалічних надтвердих матеріалів.

**Методика.** Методологічною основою роботи є системний підхід та аналіз вивчення об'єкта досліджень, що ґрунтується на використанні: графо-аналітичного методу дослідження з метою встановлення системного зв'язку параметрів точіння з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту та його стійкістю, зношування ріжучої частини та методу стандартних вимірювань.

**Результати.** Одержані формули досліджень для науково-обґрунтованого підходу у розв'язанні технічної задачі високопродуктивної обробки деталей зі зносостійких марок чавунів, що містить сукупність математичних моделей та алгоритмів для прогнозування їхньої оброблюваності із забезпеченням надійності різального інструменту з надтвердих матеріалів. Отримані результати порівнювалися з відомими роботами, пов'язаними з дослідженнями процесів механічного оброблення загартованих марок сталей, чавунів, оцінкою надійності ріжучих інструментів, точності та шорсткості обробленої поверхні, результатами вимірювань силових параметрів різання. Максимальна відносна похибка вимірювань не перевищувала 10–12 %.

**Наукова новизна.** Встановлення повного і системного зв'язку параметрів оброблення з властивостями оброблюваного матеріалу, геометрією інструменту і надійністю його роботи. У математико-статистичному опрацюванні експериментальних даних, що дало змогу вперше одержати комплексні залежності в зручному для розрахунку й аналізу вигляді, які дають наочне уявлення про вплив кожного параметра процесу точіння на його енергетичні показники. Визначення стійкості інструменту з надміцних матеріалів при змінній величині зносу.

**Практична значимість.** Полягає у виборі й обґрунтуванні матеріалу, оптимальних геометричних параметрів різальних інструментів, установленні характеру впливу умов обробки зносостійких чавунів на основні показники процесу – стійкість різального інструменту та режими різання в залежності від твердості матеріалу. Розробці технічних обмежень для розрахунку основних показників оброблюваності та оптимізації технологічних операцій обробки зносостійких чавунів різальним інструментом із надтвердих композиційних матеріалів.

**Ключові слова:** *точіння, верстат, чавун, інструментальний матеріал, знос, стійкість, ріжучий інструмент, режими різання.*

**Вступ.** Сучасні умови роботи промислового комплексу зумовлюють необхідність ухвалення рішень, пов'язаних з використанням оптимальних технологій виробництва машин і устаткування з урахуванням обмежень сировинної ба-

зи України. Значною мірою розв'язання цього завдання може бути забезпечено обґрунтованим вибором матеріалу деталей, а також знаходженням шляхів його ефективної обробки.

Найважливішим напрямком технічного прогресу в машинобудуванні є впровадження у виробництво матеріалів з підвищеними властивостями, що забезпечують конструкційну міцність, зносо- і корозійну стійкість деталей вузлів і механізмів машин протягом усього заданого ресурсу їх експлуатації.

Незважаючи на те, що останніми роками досягнуто значних успіхів у створенні принципово нових матеріалів, особливо на базі порошкової та гранульної металургії, а також шаруватих і волокнистих композитів, питомих споживання в машинобудуванні литих сталей і чавунів залишається переважним. Сталь і чавун, як і раніше, є основними конструкційними матеріалами у виробництві великих корпусних виробів, виготовлення яких з цих матеріалів економічно доцільно, а часто і є єдиним можливим.

В умовах гострого дефіциту легованих сталей і спеціальних сплавів особливої ролі в машинобудуванні набувають зносостійкі чавуни, що мають унікальні експлуатаційні властивості.

Однак, широке використання цього матеріалу обмежене, зокрема через труднощі, пов'язані з його механічною обробкою.

**Мета роботи і постановка задачі.** Для досягнення поставленої мети необхідно встановити взаємозв'язок вхідних чинників режимів різання, геометрії леза інструменту, властивостей оброблюваного матеріалу з технічними та економічними показниками процесу, тобто побудувати структурно-параметричну модель точіння та на цій основі оптимізувати механічну обробку зносостійких чавунів інструментом з полікристалічних надтвердих матеріалів.

Вивчення впливу умов точіння зносостійких чавунів інструментом з твердого сплаву, ріжучої кераміки, полікристалічних надтвердих композиційних матеріалів і знаходження шляхів підвищення продуктивності обробки та стійкості інструменту показав, що, незважаючи на постійно зростаючу актуальність вказаної проблеми, сам процес різання ще недостатньо досліджено та не повністю розкрито потенційні можливості й умови ефективного застосування інструменту з надтвердих композиційних матеріалів [1, 2].

Так, недостатньо вивчено вплив геометрії леза інструмента на складові сили різання та їхню зміну в міру зношування ріжучої кромки леза. Вкрай мало існує робіт з вимірювання температури під час точіння композитами, зокрема й для зносостійких чавунів. Не повною мірою досліджені залежності періоду стійкості композитів від швидкості різання і твердості вибілених і зносостійких чавунів. Проблема ймовірності безвідмовної роботи композитів практично взагалі не розглядали, і наявні дані щодо періоду стійкості напрацьовували поза зв'язком із нею. Щодо шорсткості обробленої поверхні для композитів і зносостійких чавунів є лише фрагментарні дані, на підставі яких установити багатofакторну залежність не представляється можливим.

У більшості робіт процес різання експериментально досліджується лише за двома-трьома показниками [3]. При цьому дослідженню піддавалися лише де-

які окремі вхідні фактори. Тому немає результатів багатопланового і комплексного дослідження впливу всіх параметрів режимів різання, геометрії інструменту, твердості оброблюваних чавунів тощо, які дають змогу за певних технічних обмежень оптимізувати умови обробки.

Виходячи з цього, розв'язання задачі високопродуктивної обробки зносостійких з високим вмістом хрому чавунів є винятково важливим і актуальним.

**Основна частина.** Для експериментальних робіт, пов'язаних із вибором ефективного ріжучого інструменту та параметрів різання, були використані зносостійкі чавуни різного хімічного складу з різною структурою матриці та типом карбідної фази, які широко застосовують у металургійній та гірничорудній промисловостях. Структуру чавунів досліджували на металографічних шліфах, які піддавали травленню в 5% розчині азотної кислоти й етиловому спирті.

1. Білий зносостійкий високохромистий хромомарганцевий чавун марки ІЧ230Х28Г3С, хімічний склад наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад чавуну ІЧ230Х28Г3С

Вміст елементів, %							
C	Si	Mn	Cr	P	S	Ni	Cu
2,68	0,97	2,95	24,62	0,023	0,013	0,36	0,04

У хромомарганцевих чавунах з високим вмістом хрому поєднуються висока корозійна стійкість і зносостійкість в абразивно-корозійних середовищах з відносно високою стійкістю в нейтральних середовищах унаслідок розширення  $\gamma$  – області під час легування марганцем, і появи бейніто-мартенситної структури основи після гарту.

Основним легувальним елементом у чавуні ІЧ230Х28Г3С є хром, кількість якого визначає тип карбідів, що утворюються.

Під час кристалізації цього чавуну утворюються тригональні карбіди типу  $(Cr, Fe)_7C_3$ , що мають виражену анізотропію, пов'язану з існуванням різного типу зв'язків між атомами - ковалентних уздовж осі С і металічних по осях а і b.

Швидкість зростання кристала за віссю С набагато вища, ніж в інших напрямках, тому первинний кристал  $(Cr, Fe)_7C_3$ , що росте в чавуні, набуває форми довжиною шестигранної призми (рис. 1). Мікротвердість таких карбідів становить 1220-1500 HV.

Евтектика, що кристалізується, являє собою аустеніт і карбід  $(Cr, Fe)_7C_3$ , причому провідною фазою є карбід. Цим визначається будова евтектичної колонії – вона є усіченим конусом з базовою пластиною карбіду по осі та відгалуженими під невеликим кутом карбідними стрижнями шестигранного перерізу, в проміжках між якими кристалізується аустеніт. Така евтектика має скелетну будову; матричною фазою є аустеніт, розгалуженою – карбід, і її можна розглядати як природний композиційний матеріал.

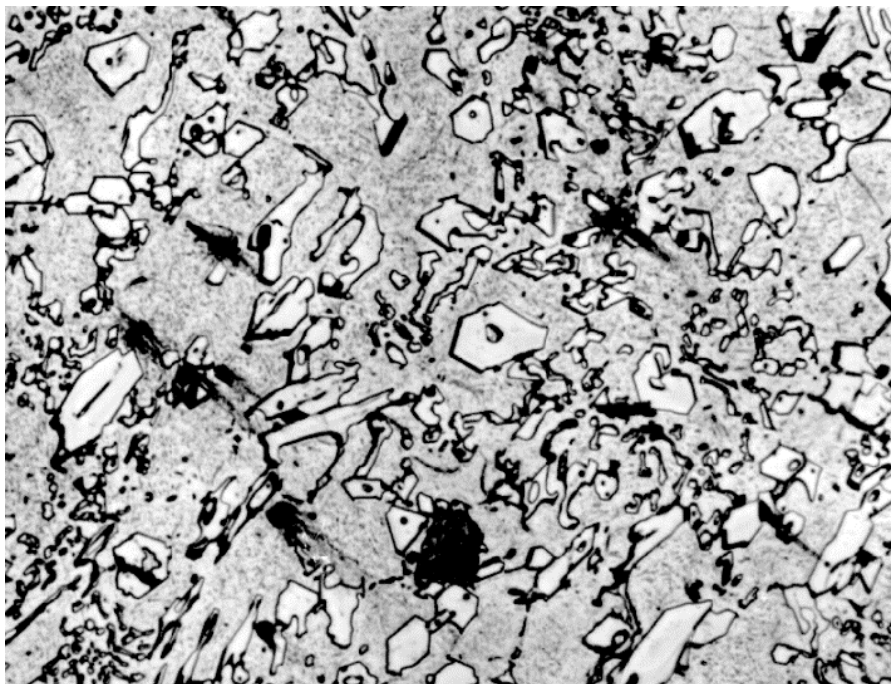


Рис. 1. Мікроструктура зносостійкого чавуну ІЧ230Х28ГЗС із карбідами,  $(Cr, Fe)_7C_3$ ,  $\times 250$

Виливки мали розміри  $l = \text{мм}$  і  $\text{Ø}120$  і були відлиті в піщано-глинисті форми.

Після кристалізації структура чавуну представлена аустенітом, мартенситом і карбідами (рис. 2), твердість становила 52-55 HRC. Частина заготовок було піддано нагріванню за температури  $t = 560^\circ\text{C}$ , з витримкою 3 години та охолодженням на повітрі, в результаті чого твердість чавуну підвищилася до 60 HRC за рахунок розпаду аустеніту з утворенням мартенсито-бейнітної структури.



Рис. 2. Лита структура чавуну ІЧ230Х28ГЗС,  $\times 100$

2. Вибілений валковий чавун, легований хромом і нікелем, виконання СШХН-50, СПХН-60 і СПХН-65. Хімічний склад і механічні властивості прокатних валків, виготовлених з такого чавуну, наведені в табл. 2 і 3 (плавка ДЧВЗ). Відливання проводили в кокіль.

Таблиця 2

Хімічний склад чавунних прокатних валків за ТУ-2-799-88

Виконання	Хімічний склад, % по вазі						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
СПХН-65	3,2-2,9	0,3-0,6	0,3-0,8	0,30	0,16	0,2-1,0	0,7-2,5
СПХН-60	3,2-3,9	0,4-0,8	0,3-0,8	0,30	0,16	0,6-1,2	1,7-2,5
СПХН-50	2,9-3,9	1,5-2,6	0,5-0,8	0,30	0,02	0,2-1,0	0,8-1,6

Таблиця 3

Механічні властивості валків

Виконання	Твердість <i>HSD</i>	Тимчасовий опір під час згинання, $\sigma_u$ , МПа	Ударна в'язкість, <i>KCU</i> , МДж/м <sup>2</sup>
СШХН-50	50-60	540-600	0,029-0,044
СПХН-60	60-70	440-600	0,019-0,027
СПХН-65	65-74		

Структура зовнішнього шару таких валків представлена перлітом з великою кількістю цементиту (рис. 3), що визначає високу твердість і зносостійкість цієї зони. Серцевина валків представлена структурою перліту і графітними включеннями пластинчастої або кулястої форми, що зумовлює в'язкість і міцність внутрішньої частини валків (рис. 4, 5).

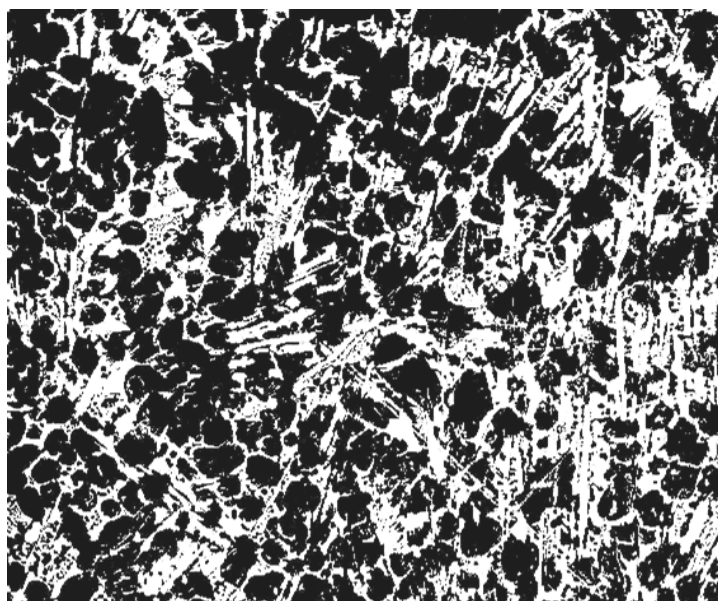


Рис. 3. Валковий чавун, вибілений шар, x250

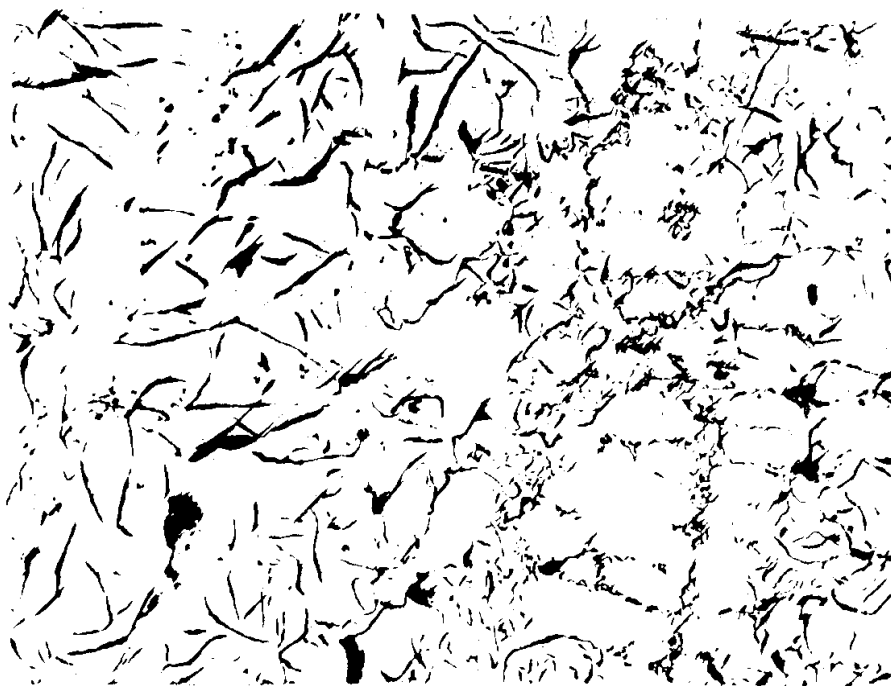


Рис. 4. Валковий вибілений чавун виконання СІХН.  
Форма графітних включень у середині виливки, x100

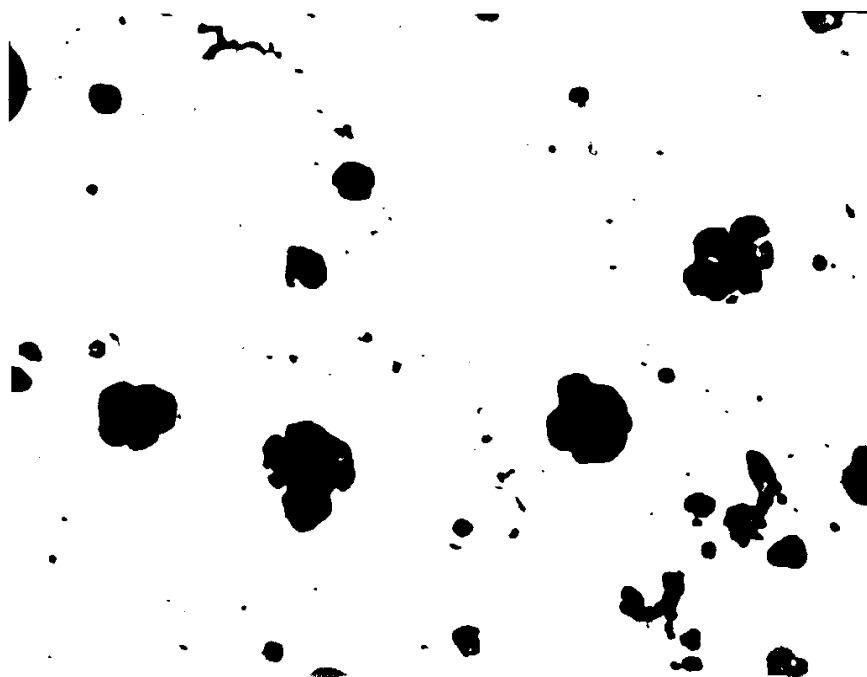


Рис. 5. Валковий вибілений чавун виконання СІХН.  
Форма графітних включень у середині виливки, x100

Структура чавуну представлена перлітною металевою матрицею з графітними включеннями пластинчастої форми (рис. 6). Такі чавуни застосовують для відповідальних виливків – станин потужних верстатів і механізмів, поршнів, циліндрів, деталей, що працюють на знос в умовах високих тисків, компресорів,

арматури, дизельних циліндрів, блоків двигунів, деталей металургійного устаткування тощо з товщиною стінки до 60-100 мм.

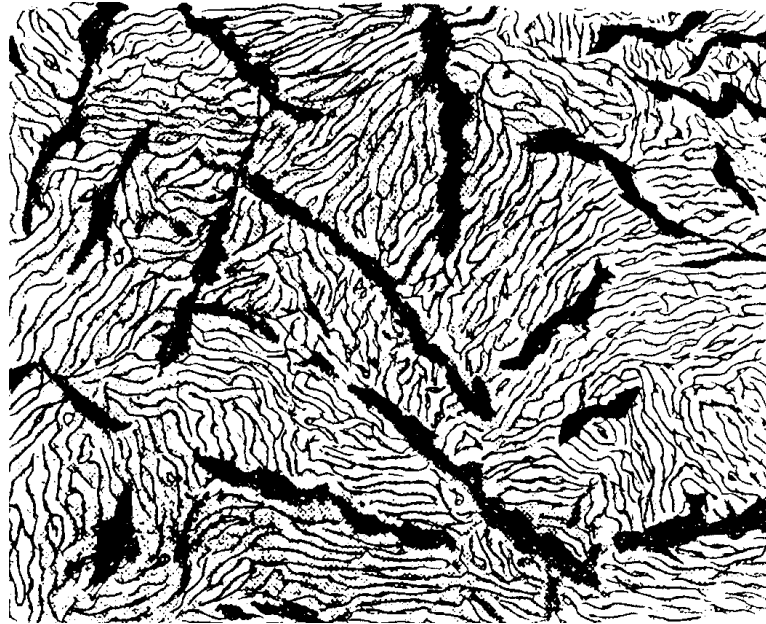


Рис. 6. Перліт і графітні включення, x100

**Аналіз і реалізація.** За оброблюваністю чавуни можуть поділятися на основні три групи [3]:

- конструкційні загального машинобудівного призначення (сірі, ковкі, високоміцні);
- вибілені низьколеговані з кулястою і пластинчастою формою графіту, одержувані в результаті швидкого охолодження зовнішньої поверхні виливки;
- зносостійкі високохромисті (білі) з повністю зв'язаним графітом.

Своєю чергою період стійкості інструменту для кожної з цих груп чавунів залежатиме від хімічного складу, виконання, виду термообробки.

Для обробки чавунів зазвичай використовують вольфрамкобальтові (група *K*) тверді сплави, найбільша зносостійкість яких забезпечується за мінімального вмісту зв'язки (до 3%) і дрібнозернистої структури. Геометрія ріжучої частини різців для оброблення високотвердих чавунів із низькими швидкостями різання (наприклад, для точіння бочки прокатних валків) практично відпрацьована: передній кут  $\gamma = 0 - (10)^\circ$ ; задній кут  $\alpha = 6 - 8^\circ$ ; кути в плані  $\varphi$  і  $\varphi_1 < 30^\circ$  і радіус при вершині  $r > 3$  мм роботи з підвищеними подачами [4, 5].

Узагальнена залежність періоду стійкості різців від режиму різання визначена на підставі результатів проведених досліджень.

Період стійкості твердосплавних різців взаємопов'язаний з режимними параметрами та умовами процесу точіння чавунів загальноприйнятою в теорії різання залежністю виду

$$V = \frac{C_v}{T^m \cdot t^{xv} \cdot S^{yv}} \cdot K_{\varphi v} \cdot K_{\varphi_1 v} \cdot K_{rv} \cdot K_{hv} \cdot K_{mv} \cdot K_{uv} \quad (1)$$

з поправочними коефіцієнтами на величину кутів у плані ( $K_{\varphi v}$  і  $K_{\varphi 1v}$ ), радіуса при вершині ( $K_{rv}$ ), зносу по задній поверхні ( $K_{hv}$ ), на марку і твердість оброблюваного чавуну ( $K_{mv}$ ) і на марку твердого сплаву ( $K_{uv}$ ). Прийнято, що для сірих чавунів  $K_{mv} = (190/HB)^{nv}$ , ковких –  $K_{mv} = (150/HB)^{nv}$ , високотвердих –  $K_{mv} = (200/HB)^{nv}$ .

Після перетворення (1) формула періоду стійкості різців під час точіння високотвердих чавунів виразиться в зручному для розрахунку вигляді

$$T = C_T \cdot t^{-X_T} \cdot S^{-Y_T} \cdot V^{-Z_T} \cdot \left(\frac{HB}{200}\right)^{-q_T} \cdot K_{\varphi T} \cdot K_{\varphi 1T} \cdot K_{rT} \cdot K_{hT} \cdot K_{uT}, \quad (2)$$

де  $X_T = \frac{xv}{m}$ ;  $Y_T = \frac{yv}{m}$ ;  $Z_T = \frac{1}{m}$ ;  $q_T = \frac{nv}{m}$ ;  $K_{\varphi T} = K_{\varphi v}^{\frac{1}{m}}$ ;  $K_{\varphi 1T} = K_{\varphi 1v}^{\frac{1}{m}}$ ;  $K_{rT} = K_{rv}^{\frac{1}{m}}$ ;  
 $K_{hT} = K_{hv}^{\frac{1}{m}}$ ;  $K_{uT} = K_{uv}^{\frac{1}{m}}$ .

Для сірих чавунів значення коефіцієнта пропорційності, показників ступеня і поправочних коефіцієнтів наведено в табл. 5 [3].

Таблиця 5

Значення коефіцієнтів і показників ступеня у формулі швидкості різання (1)

Умови обробки сірого чавуну		Коефіцієнт і показники ступеня				
		$C_v$	$X_v$	$Y_v$	$m$	$n_v$
Прохідні різці з радіусом при вершині	$S \leq 0,4$ мм/об	4,87	0,15	0,2	0,2	1,25
	$S \geq 0,4$ мм/об	4,05		0,4		
Головний кут у плані $\varphi$	град	30		45	60	90
	$K_{\varphi v}$	1,2		1,0	0,88	0,73
Допоміжний кут $\varphi 1$	град	10		20	30	45
	$K_{\varphi 1v}$	1,0		0,94	0,91	0,87
Радіус при вершині $r$	мм	1		2	3	5
	$K_{rv}$	0,94		1,0	1,03	1,13
Зношення по задній поверхні $h$	мм	0,5		1	1,5	2
	$K_{hv}$	0,9		1,0	1,1	1,2
Твердий сплав	марка	ВК 8		ВК 6	ВК 4	ВК 3
	$K_{uv}$	0,83		1,0	1,1	1,15

У результаті при  $S \geq 0,4$  мм/об і  $S < t$  маємо:

$$T = 1089 \cdot t^{-0,75} \cdot S^{-2} \cdot v^{-5} \cdot \left(\frac{HB}{200}\right)^{-0,25} \cdot (K_{\varphi v} \cdot K_{\varphi 1v} \cdot K_{rv} \cdot K_{hv} \cdot K_{uv})^{\frac{1}{m}}. \quad (3)$$



У роботі [2] показник ступеня під час точіння високоміцних чавунів зі сфероїдним графітом дорівнює 1,5 і з пластинчастим графітом – 2,2.

Вираз (3) справедливий для вузького діапазону швидкостей різання ( $v = 2\text{--}3$  м/с) і низьких значень твердості ( $HB = 180\text{--}280$ ), коли  $T = 60\text{--}120$  хв.

Обробка вибілених і білих чавунів має свої особливості. Специфіка полягає в застосуванні низьких швидкостей різання ( $v \approx 0,1\text{--}0,3$  м/с). Кожна операція потребує відпрацювання раціональних умов точіння. Цій проблемі присвячено низку робіт.

Так, за даними досліджень [6, 7] під час обробки високоміцного чавуну з графітом кулястої форми показники ступеня у формулі  $v = C_v / (T^{0,33} \cdot t^{0,15} \cdot S^y \cdot HB^q)$  відповідно дорівнюють  $y = 0,18$  і  $0,37$  за  $S \leq 0,4$  і  $S \geq 0,4$  мм/об,  $q = 2\text{--}4$  за  $HB = 200\text{--}400$  і  $HB = 400\text{--}500$ . У чавунах твердістю  $HB = 200\text{--}400$  переважала перлітна структура. Чавуни твердістю  $HB = 200\text{--}400$  мали в структурі незначну кількість перліту, решта – ледебурит і цемент. Під час точіння твердим сплавом ВК8 ( $\varphi = 45^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $\gamma = -10^\circ$ ,  $r = 1$  мм,  $h = 1$  мм) з  $t = 3$  мм і  $S = 0,6$  мм/об, стійкість  $T = 30$  хв. відповідала швидкості різання  $v = 0,3$  м/с, за  $HB = 400$ ,  $v = 0,12$  м/с. Обробка експериментальних даних дала змогу отримати емпіричну формулу для періоду стійкості за значень  $y = 0,37$  і  $q = 4$ .

$$T = 2345 \cdot t^{-0,45} \cdot S^{-1,11} \cdot v^{-3} \cdot \left(\frac{HB}{200}\right)^{-12} \quad (4)$$

Швидкість силового точіння для твердого сплаву ВК3 ( $\varphi < 15^\circ$ ,  $S \approx 3$  мм/об) для періоду стійкості  $T = 60$  хв., що працює без охолодження за другими проходками ("після кірки"), залежно від твердості чавуну прокатних валків становить:

$$v_{60} = 1,05 \left(\frac{HB}{200}\right)^{-2,9} \quad (5)$$

Тоді за середнього значення швидкості різання для високоміцних чавунів  $m = 0,32$  впливає, що:

$$T = 74,7 \cdot v^{-3,1} \cdot \left(\frac{HB}{200}\right)^{-9,0} \quad (6)$$

Для аналогічних умов поздовжнього точіння бочки валків "після кірки" отримано багатofакторну залежність при  $\varphi = \varphi_1 = 30^\circ$ ,  $r = 2$  мм і  $h = 0,75$  мм

$$v = \frac{C_v \cdot 10^7}{T^{0,4} \cdot t^{0,25} \cdot S^{0,33} \cdot HB^{2,9}}, \quad (7)$$

де значення коефіцієнта  $C_v$  під час обробки валків виконання СПХН залежно від марки твердого сплаву ВК8, ВК6, ВК6-ОМ, ВК3-ОМ відповідно дорівнюють – 3,7; 4,3; 4,9; 5,5.

Після перетворення маємо:

$$T = 349,9 \cdot t^{-0,62} \cdot S^{-0,83} \cdot v^{-2,5} \cdot \left( \frac{HB}{200} \right)^{-7,25} \cdot K_u \quad (8)$$

Значення поправочного коефіцієнта становлять ряд ВК8: ВК6: ВК6-ОМ: ВК3-ОМ = 0,5: 0,72:1:1.33.

Стійкість різців із твердого сплаву ВК6М ( $\varphi = 25^\circ$ ,  $f\gamma \times \gamma = 1 \text{ мм} \times 0^\circ$ ,  $r = 1 \text{ мм}$  і  $h = 1 \text{ мм}$ ) під час точіння прокатних валків із високохромистого чавуну твердістю  $HB = 380 \dots 390$  (2,8–3,2%, 14–18% і 60–70% перліту, 30–40% карбідів, <1% графіту) відповідала  $T = 45 \text{ хв.}$  при  $t = 4 \text{ мм}$ ,  $S = 0,7 \text{ мм/об}$ ,  $v = 0,2 \text{ м/с}$ . Випробувані марки твердого сплаву за стійкістю мають таке співвідношення:

$$\text{ВК8} : \text{ВК10-ОМ} : \text{ВК4} : \text{ВК6М} : \text{ВК6-ОМ} = 0,55 : 0,55 : 0,85 : 1 : 1.40.$$

Під час роботи "по кірці" період стійкості різців у 1,45-1,65 рази нижчий, ніж під час роботи "після кірки". Застосування твердих сплавів ВК6-ОМ замість ВК2 (точіння бочки) і ВК10-ОМ замість ВК8 (прорізання бочки) дає змогу підвищити продуктивність оброблення на 30% завдяки збільшенню подачі.

У роботі [2] під час точіння високохромистого чавуну ІЧХХ28Н28ГЗС  $HB \approx 550$  твердим сплавом ВК6М ( $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$ , перехідна  $l\varphi \times \varphi = (1-2) \text{ мм} \times 20^\circ$  і додаткова  $l\varphi_1 \times \varphi_1 = (2-3) \text{ мм} \times 0^\circ$  ріжучі кромки, захисна фаска  $f\gamma \times \gamma = (0,5-1) \text{ мм} \times (-5)^\circ$ ) отримано емпіричні залежності:

$$\left. \begin{aligned} v &= 0,394 / (T^{0,26} \cdot t^{0,26} \cdot S^{0,3}) \text{ для } S < 0,6 \text{ мм/об} \\ v &= 0,360 / (T^{0,26} \cdot t^{0,26} \cdot S^{0,8}) \text{ для } S > 0,6 \text{ мм/об} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $t = 1-3 \text{ мм}$  і  $v = 0,15-0,3 \text{ м/с}$ .

Відповідно період стійкості за середнього показника ступеня  $S^{0,55}$  дорівнюватиме:

$$T = 0,024 \cdot t^{-1,0} \cdot S^{-2,12} \cdot v^{-3,85} \quad (10)$$

Рівень оброблюваності зносостійких чавунів під час точіння визначається в першому наближенні їхньою твердістю і мікроструктурою карбідної фази. Швидкість різання при стійкості пластин із твердого сплаву ВК6М ( $\varphi = 45^\circ$ ,  $\gamma = 10^\circ$ ,  $a = 10^\circ$ ,  $r = 1,5 \text{ мм}$ ,  $h = 0,5 \text{ мм}$ )  $T = 20 \text{ хв.}$ , глибини  $t = 1,5 \text{ мм}$  і подачі  $S = 0,15 \text{ мм/об}$  може бути розрахована залежно від твердості чавуну  $HRC = 30-60$  і коефіцієнта  $K_c$  для різновидів мікроструктури карбідної фази (1,0 – у формі суцільної сітки; 1,4 – розірваної сітки; 2,4 – довгих голок; 3,1 – дрібних голок) за формулою:

$$v_{20} = \frac{2,01 \cdot 10^3 \cdot K_c}{HRC^{2,3}} \quad (11)$$

В інтервалі  $v = 0,2 - 2,5 \text{ м/с}$  має місце залежність  $T = f(v^{-3,5})$ . Спільно  $T$ ,  $v$  і  $HB$  пов'язані співвідношенням:

$$T = 96,6 \cdot v^{-3,5} \cdot \left( \frac{HB}{200} \right)^{-6,65} \quad (12)$$

На підставі статистичних даних, виробничого досвіду заводів прокатних валків з точіння бочки чавунних валків твердістю  $HS = 50-70$  "після кірки" період стійкості напайних великогабаритних пластин з твердого сплаву ВКЗМ ( $\varphi < 30^\circ$ ,  $\varphi_1 = 15^\circ$ ,  $\gamma = -10^\circ$ ,  $r = 3$  мм) за  $v = 0,1-0,3$  м/с і  $h = 1,0$  мм рекомендується визначати з виразу:

$$T = 11,4 \cdot 10^{13} \cdot t^{-0,5} \cdot S^{-1,0} \cdot v^{-2,9} \cdot HS^{-8} \text{ або } T = 33,2 \cdot t^{-0,5} \cdot S^{-1,0} \cdot v^{-2,9} \cdot \left(\frac{HB}{200}\right)^{-5,3} \quad (13)$$

**Аналіз і обробка дослідних даних проводили в такому порядку.** Для розрахунку періоду стійкості  $T_n$ , з урахуванням умов проведення випробувань, попередньо були визначені поправочні коефіцієнти в рівнянні (2), значення яких наведено в табл. 6.

Таблиця 6

Значення поправочних коефіцієнтів

Характеристика інструментів		Поправочні коефіцієнти			
Головний кут в плані $\varphi$	$\frac{\text{град}}{K_{j\varphi}}$	$\frac{30}{1}$	$\frac{45}{0,85}$	$\frac{60}{0,65}$	$\frac{90}{0,40}$
Допоміжний кут $\varphi_1$	$\frac{\text{град}}{K_{\varphi_1}}$	$\frac{10}{1}$	$\frac{20}{0,82}$	$\frac{30}{0,75}$	$\frac{45}{0,65}$
Радіус при вершині $r$	$\frac{\text{мм}}{K_{r\tau}}$	$\frac{1}{0,7}$	$\frac{2}{0,9}$	$\frac{3}{1}$	$\frac{5}{1,3}$
Зношення по задній поверхні $h$	$\frac{\text{мм}}{K_{h\tau}}$	$\frac{0,5}{0,5}$	$\frac{1}{1}$	$\frac{1,5}{1,6}$	$\frac{2}{2,3}$
Твердий сплав	$\frac{\text{марка}}{K_{ит}}$	$\frac{BK8}{0,4}$	$\frac{BK6}{0,6}$	$\frac{BK6-OM}{0,8}$	$\frac{BK3M}{1}$

Розрахунковий період стійкості  $T_p$  визначали для режимів різання, які найчастіше застосовують у вальцювально-токарному виробництві під час обробки "після кірки": глибина  $t = 1,5$  мм, подача  $S = 1$  мм/об і швидкість  $v = 0,2$  м/с. Прийнята твердість відповідала 470 і 540 HB (65 і 72 HS). Наведений період стійкості  $T_n$  та усереднений коефіцієнт пропорційності  $C_T$  розраховані для твердого сплаву ВКЗМ за кутів у плані  $\varphi = 30^\circ$  і  $\varphi = 15^\circ$ , радіусу при вершині  $r = 3$  мм і зносу по задній поверхні  $h = 1$  мм.

Остаточню для напайних різців під час роботи без охолодження отримано рівняння для періоду стійкості різців зі сплаву ВК:

$$T = 93,2 \cdot t^{-0,5} \cdot S^{-1} \cdot v^{-3,1} \cdot \left(\frac{HB}{200}\right)^{-6,4} \cdot K_{ит} \quad (14)$$

$$t = 0,5 - 4 \text{ мм}, S = 0,2 - 2 \text{ мм/об}, v = 0,1 - 0,5 \text{ м/с}, HB = 400 - 610.$$

Отримані значення коефіцієнтів призначені для роботи різців із прямими зрізами ( $t > S$ ). Згідно з [6, 7] для умов точіння з обробленими зрізами ( $t > S$ ) показники ступеня  $X_T$  і  $Y_T$  при  $t$  і  $S$  міняються місцями. Годинна стійкість  $T = 60$  хв. на обдирних операціях досягається при зносі  $h = 2-3$  мм. Величина зносу  $h > 1,5$  мм виправдана під час роботи різцями великого перерізу на великогабаритних верстатах.

Як впливає з [8], визначальний вплив на період стійкості твердосплавних різців чинить твердість чавуну і швидкість різання. Тому раціонально працювати з найбільшою (відповідно до припуску на обробку) глибиною різання, максимально допустимою подачею (за жорсткістю і вібростійкістю технологічної системи) і мінімальною (залежно від рівня) продуктивності обробки і періоду стійкості інструменту швидкістю різання.

Таким чином обробка чавунів твердістю  $HB > 470$  прийнятна лише твердими сплавами ВК6-ОМ і ВК3М за швидкості різання, що дорівнює  $0,2-0,1$  м/с, з малими кутами в плані  $\varphi$  і  $\varphi_l < 30^\circ$ , захисною негативною фаскою на передній поверхні та великим радіусом заокруглення вершини  $r > 3$  мм.

Розширення обсягів використання в машинобудуванні важко оброблюваних матеріалів і проблема їхнього оброблення вимагають удосконалення інструментальних матеріалів. Одним із ефективних шляхів інтенсифікації процесу різання твердих матеріалів є застосування полікристалічних ПСТМ як лезового інструменту.

Технологічні особливості ефективного застосування лезових інструментів з надтвердих матеріалів зумовлені специфікою їхніх фізико-механічних властивостей і відносно високою вартістю. Тому при впровадженні такого інструменту доцільно проводити техніко-економічне обґрунтування області застосування та вибору режимів різання методом оптимізації з накладенням технічних обмежень на показники процесу. Основою такого підходу є встановлення залежності основних показників процесу різання, наприклад, складових сил різання  $P_z, P_x, P_y$ , температури різання, періоду стійкості інструменту, висоти мікронерівностей обробленої поверхні від режимів обробки: глибини, подачі та швидкості різання, твердості оброблюваного матеріалу, параметрів геометрії ріжучої частини інструменту.

Для роботи з великими глибинами і подачами різання на трудомістких операціях знімання значних припусків габаритних деталей перспективним напрямком є застосування ріжучих пластин діаметром понад 12 мм, зокрема й двошарових для підвищення міцності, які отримують методом спікання мікропорошків кубічного нітриду бору зі зв'язкою під високим тиском (композити марок кіборит, БПК, ніборит, томал та ін.).

ПСТМ на основі кубічного нітриду бору практично інертні до чорних металів, тому вони знайшли більш широке застосування в металообробці, ніж полікристалічні алмази.

Поступаючись твердим сплавам за міцністю, ПСТМ мають значну перевагу за твердістю та термостійкістю, які й зумовлюють їхню високу зносостійкість на високих швидкостях різання за безударного навантаження.

**Висновки.** 1. Унікальні властивості зносостійких чавунів зумовлені їхньою будовою, а саме – металевою матрицею та карбідною фазою, тип і морфологія яких залежать від хімічного складу, швидкості затвердіння виливків, виду термічної обробки та низки інших чинників.

2. Максимальну зносостійкість мають чавуни з мартенситною або мартенситно-бейнітною основою (матрицею) і дрібними карбідами високої твердості, які міцно утримуються матрицею.

3. Застосування зносостійких чавунів значною мірою стримується через труднощі, що виникають під час токарної механічної обробки внаслідок особливостей їхньої структури.

4. Визначальний вплив на стійкість твердосплавних різців чинить твердість чавуну і швидкість різання.

5. Обробка чавунів твердістю HB 470 обмежена твердими сплавами ВК6-ОМ і ВКЗМ за відносно низької швидкості різання, що дорівнює 0,1-0,2 м/с.

6. Розроблені технічні обмеження для розрахунку основних показників оброблюваності та оптимізації технологічних операцій обробки зносостійких чавунів різальним інструментом із надтвердих композиційних матеріалів.

#### Перелік посилань

1. Дядюра, К. О., Юнак, А. С., Погребняк, О. Д., & Охріменко, В. О. (2015). Механізм зношення різальних інструментів на основі cBN при точінні зносостійких високохромистих чавунів. *Журнал фізики та інженерії поверхні*, 13(2), 225-234.
2. Нікішина, М. В., Білявіна, Н. М., Барсукова, Т. П., Бритун, В. Ф., & Петруша, І. А. (2011). Залежність твердості чистих полікристалічних матеріалів кубічного нітриду бору від структурних параметрів. *Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент–техника и технология его изготовления и применения*, 14, 299–304.
3. Крамар, Г. М., & Бодрова, Л.Г. (2016). *Навчально методичний посібник з курсу «Матеріалознавство і конструкційні матеріали» для студентів напряму 6.051003 «Приладобудування»*. ТНТУ.
4. 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>
5. Zhuravel, O . Yu , Derbaba, V.A., Protsiv, V.V., & Patsera, S.T. (2019). Interrelation between Shearing Angles of External and Internal Friction During Chip Formation. *Solid State Phenomena. Materials Properties and Technologies of Processing*, (291), 193–203.  
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.291.193>
6. 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: Междунар. науч.-техн. сб. Харьков: НТУ «ХПИ»*, (85), 137–148.
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. Kravchenko, Yu., & Derbaba, V. (2021). 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>

### ABSTRACT

**Purpose.** The solution of the scientific and technical problem related to the technological support of high-performance mechanical processing of wear-resistant cast irons by optimizing and managing their machinability with a tool made of polycrystalline superhard materials.

**The methods.** The methodological basis of the work is a systematic approach and analysis of the object of research, which is based on the use of: a graph-analytical research method with the aim of establishing a systematic relationship between turning parameters and the properties of the processed material, the geometry of the tool and its stability, wear of the cutting part and the method of standard measurements.

**Findings.** Received research formulas for a scientifically based approach to solving the technical problem of high-performance processing of parts from wear-resistant grades of cast iron, containing a set of mathematical models and algorithms for predicting their machinability while ensuring the reliability of cutting tools from superhard materials. The obtained results were compared with well-known works related to the research of the processes of mechanical processing of hardened grades of steel, cast iron, the assessment of the reliability of cutting tools, the accuracy and roughness of the machined surface, the results of measurements of the power parameters of cutting. The maximum relative measurement error did not exceed 10-12%.

**The originality.** Establishing a complete and systematic connection of processing parameters with the properties of the processed material, the geometry of the tool and the reliability of its operation. In the mathematical and statistical processing of experimental data, which made it possible for the first time to obtain complex dependencies in a form convenient for calculation and analysis, which give a clear idea of the influence of each parameter of the turning process on its energy indicators. Determining the stability of a tool made of super-strong materials with a variable amount of wear.

**Practical implementation.** It consists in the selection and substantiation of the material, the optimal geometric parameters of cutting tools, the establishment of the nature of the influence of the processing conditions of wear-resistant cast iron on the main indicators of the process - the stability of the cutting tool and cutting modes depending on the hardness of the material. Development of technical limitations for the calculation of the main machinability indicators and optimization of technological operations of processing wear-resistant cast iron with a cutting tool made of superhard composite materials.

**Keywords:** *turning, machine tool, cast iron, tool material, wear, stability, cutting tool, cutting modes.*