

© Є.Ю. Щербина¹, В.А. Дербаба¹, В.А. Козечко¹

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

КРИТЕРІЇ СТІЙКОСТІ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНОЇ ОБРОБКИ

© Y. Shcherbyna¹, V. Derbaba¹, V. Kozechko¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

RESISTANCE CRITERIA OF A CUTTING TOOL FOR HIGH-SPEED PROCESSING

Мета. Проаналізувати та перевірити на адекватність відомі розрахункові формули при визначенні залежності періоду стійкості різучого інструменту із твердого сплаву з багатоелементними покриттями при високошвидкісній обробці заготовок. Провести порівняльні розрахунки для спрощення методології комплексних випробувань металоріжучих інструментів різних груп.

Методика. Дослідження базується на застосуванні аналітичних способів розрахунків визначення періоду стійкості інструменту, швидкості різання, швидкості подачі, глибини різання, показників ступеня режимів та коефіцієнта технологічної ефективності при різних умовах різання.

Результати. Одержані формули досліджень коефіцієнта технологічної ефективності, періоду стійкості інструменту та показників ступеня режимів при складанні наукових методик та рекомендацій щодо проведення комплексних випробувань різучого інструменту на верстатах з програмним керуванням.

Наукова новизна. Виконано дослідження і введений новий параметр коефіцієнта технологічної ефективності з визначенням періоду стійкості різучого інструменту при високошвидкісній обробці заготовок на верстатах з програмним керуванням. Отримані значення і функціональні залежності швидкості різання, швидкості подачі, глибини різання та їх показників ступеня на процес зносу різучого інструменту. Встановлено, що ресурс різучого інструменту значною мірою залежить від спеціальних сплавів і покриттів на поверхні леза, довжини шляху різання, використання мастильно-охолоджувальних рідин, зміни геометричних параметрів лез.

Практична значимість. Практичний здобуток отриманих результатів полягає в підтвердженні адекватності відомих розрахункових формул при визначенні режимних показників та їх ступеня, коефіцієнта технологічної ефективності, періоду стійкості різучого інструменту з твердого сплаву з багатоелементними покриттями при високошвидкісній обробці заготовок.

На основі отриманих аналітичних і розрахункових даних складена спрощена комплексна методика випробування металоріжучого інструменту при високошвидкісній обробці на верстатах з програмним керуванням:

- випробуванні інструменту з швидкоріжучої сталі;
- випробуванні інструменту з твердого сплаву;
- випробуванні інструменту з твердого сплаву з багатоелементними покриттями;
- випробуванні інструменту з твердого сплаву з на основі нітриду титану і кремнію.

Ключові слова: інструмент металорізальний, період стійкості, знос, спеціальні покриття, металооброблювальний верстат, випробування, програмне керування.

Вступ. Високий ступінь конкуренції серед підприємств, які виробляють авіаційну і космічну техніку, призводить до постійного вдосконалення конструкцій за рахунок ускладнення компонентів, а також завдяки впровадженню нових матеріалів, що володіють підвищеною надійністю, термостійкістю і т.п. Останнім часом в аерокосмічній промисловості все ширше почали використовувати нові матеріали. До 2007 року нержавіюча сталь і тугоплавкі метали становили 65% від використовуваних матеріалів. Зараз їх місце зайняли композити. Це дуже серйозні зміни. Навіть чистий титан, застосовуваний для виготовлення автомобільних шасі, порівняно легко піддавався обробці. Тепер все частіше використовують особливі високоміцні сплави титану, вироблені VSMPO-AVISMA Corporation, які вкрай важкі в обробці [1, 2].

Такі зміни тягнуть за собою абсолютно нові вимоги до ріжучого інструменту, за допомогою якого повинні оброблятися нові матеріали і проводитися складні технологічні вироби з не меншою продуктивністю, ніж раніше.

Компанія TaeguTec має в своєму арсеналі набір інструментальних матеріалів для найскладніших в обробці матеріалів. Сплави TaeguTec показують відмінні експлуатаційні характеристики і забезпечують хорошу якість поверхні завдяки унікальному хіміко-фізичному складу і сучасним технологіям спікання і покриття. У даній статті будуть зроблені рекомендації щодо застосування ріжучих пластин з кераміки і зі вставками з Cubic Boron Nitride (далі по тексту CBN) для операцій високошвидкісного точіння важкооброблюваних матеріалів.

Обробка сталей інструментом, оснащеним вставками з CBN. Новий сплав ТВ610 має високу корозійну стійкість і хімічну стабільність. Рекомендується як перший вибір технологу при безперервному напівчорновому точінні загартованих сталей зі значною твердістю. Сплав ТВ650 володіє ще більш високою твердістю разом з достатньою «тріщиностійкістю», що дозволяє застосовувати його при високошвидкісній напівчистої обробці легованої, інструментальної та загартованої сталей.

Обробка чавунів інструментом, оснащеним вставками з CBN (табл. 1). Сплав ТВ730 (раніше відомий, як KB90) відрізняється високою твердістю і тріщиностійкістю при чорновому точінні сірих чавунів і чавунів з кулястим графітом [3]. А сплав KB90A рекомендується для обробки твердосплавних прокатних валків.

Таблиця 1

Сплав CBN (TaeguTec)

Сплав	ТВ610	ТВ650	В670	ТВ730(KB90)	KB90A
CBN (%)	40-50	50-60	60-0	90-95	90-95
Твердість	2,800-3,000	3,100-3,300	3,200-3,400	4,000-4,200	3,800-4,000
Особливість	← Безперервне різання			Уривчасте різання →	
Примітки	Загартована сталь			Чавун	

Високошвидкісне точіння керамічними пластинами. Керамічні сплави (табл. 2), в свою чергу, також мають досить високу твердість і гарний опір до

окислення в порівнянні з іншими інструментальними матеріалами. Крім того, інструмент TaeguTec з кераміки має поліпшену стійкість до утворення тріщин і ударостійкість при температурі понад 1000 градусів незважаючи на те, що при кімнатній температурі це абсолютно тендітні матеріали.

Таблиця 2

Механічні і температурні властивості різних металорізальних матеріалів

	Al ₂ O ₃	Si ₃ N ₄	PCBN	PCD	PCD Hardmetal
Густина г/см ³	4.0	3.2	3.4	3.5	14.9
Твердість (Hv)	1,900	1,700	3,700	7,000	1,400
Ударна в'язкість (МПа/м ²)	3	6	5	5	12
Теплопровід- ність (Wm ⁻¹ /K ⁻¹)	30	40	100	120	100
Температура окиснення (°C)	>2.000	1.300	1.200	650	500

Алюмооксидна кераміка (Al₂O₃) має чудове опір до окислення і високу стійкість при високошвидкісному безперервному точінні матеріалів на основі заліза.

Нітрид кремнію (Si₃N₄) має високу стійкість до утворення тріщин і гарний опір до окислення. Це найкраще рішення в чорновій обробці матеріалів на основі заліза. При безперервному точінні чавуну і розпеченим матеріалів однозначно рекомендується використовувати кераміку на основі оксиду алюмінію. А пластини на основі нітриду кремнію краще стоять при чорновій обробці чавуну і високошвидкісній обробці жароміцних матеріалів на основі нікелю.

Обробка розжарених матеріалів, вуглецевих і легованих сталей інструментом з кераміки.

Кераміка на основі оксиду алюмінію застосовується для високошвидкісної обробки загартованої сталі завдяки чудовому опору до окислення і температурної стабільності. TaeguTec має кілька видів таких керамічних сплавів. Наприклад, сплав АВ30 застосовується, як правило, для продуктивного точіння сталей, таких як вуглецеві і низьколеговані.

Сплав АВ20 рекомендується для точіння високолегованих матеріалів і сталей з високою твердістю. Сплав АВ2010 рекомендується виключно для чистової обробки розжареної сталі. На діаграмі (рис. 1) схематично показана область застосування розглянутих керамічних пластин в залежності від оброблюваного матеріалу і його твердості. Завдяки високій твердості і стійкості до окислення, сплав АВ20 ідеально підходить для механічної обробки надтвердих матеріалів типу CrMoNi і інструментальних сталей.

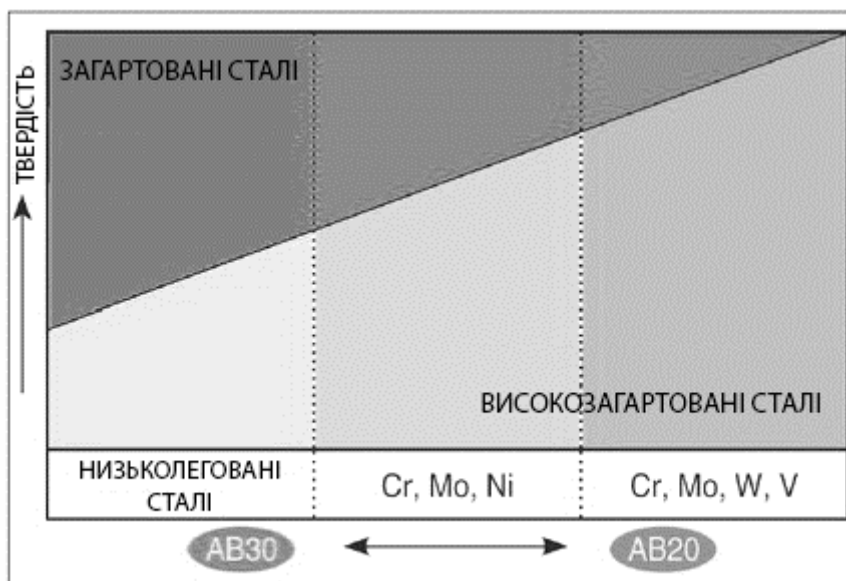


Рис. 1. Область застосування розглянутих керамічних пластин в залежності від оброблюваного матеріалу і його твердості

Основна частина. Як правило, найкращим рішенням у високошвидкісній обробці чавуну є керамічні пластини за рахунок високої твердості і помірною в'язкості. Керамічний сплав з чистого оксиду алюмінію AW20 (рис. 2а, 2в) найкраще застосовувати в високошвидкісній обробці чавунних деталей типу циліндр.

Володіючи чудовою стійкістю до окислення і температурної стабільності, цей матеріал значно перевершує за цими параметрами аналогічні сплави конкурентів. Кераміка ж на основі нітриду кремнію (AS500 (рис. 2б, 2г) і AS10) має шикарне опір до викошування і помірну твердість. Тому дані сплави рекомендуються використовувати для чорнових операцій в токарній обробці всіх видів чавуну. Наприклад, для виробництва таких деталей, як чавунний автомобільний диск і фрезерування блоку циліндрів. Сплави ж AB30 і SC10 є кращим вибором для обробки сірих чавунів і чавунів з кулястим графітом.

Високопродуктивну обробку жароміцних сталей, а також матеріалів на основі нікелю найкраще здійснювати саме керамічними пластинами. Даний тип важкооброблюваних матеріалів зазвичай застосовується для виробництва виробів в аерокосмічній галузі або в енергетиці. Кераміку на основі нітриду кремнію (AS20) рекомендують для високошвидкісної обробки точінням і навіть фрезерування матеріалу інконель 718. Даний сплав має високу стійкість до викришування і помірну температурну стабільність. Структура подібних сплавів та галузь застосування зображена відповідно на рисунках 2а і 2б, 2в і 2г.

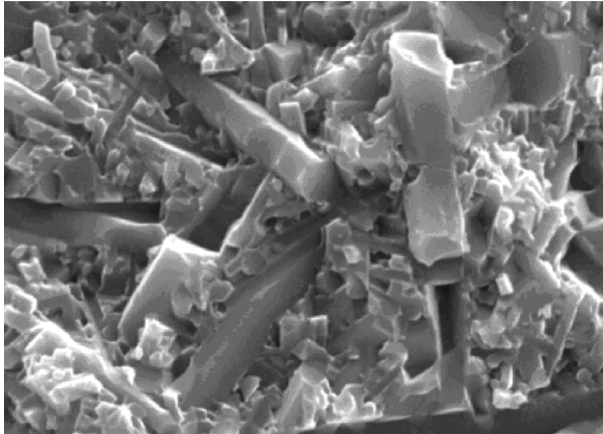


Рис. 2а Сплав AS500

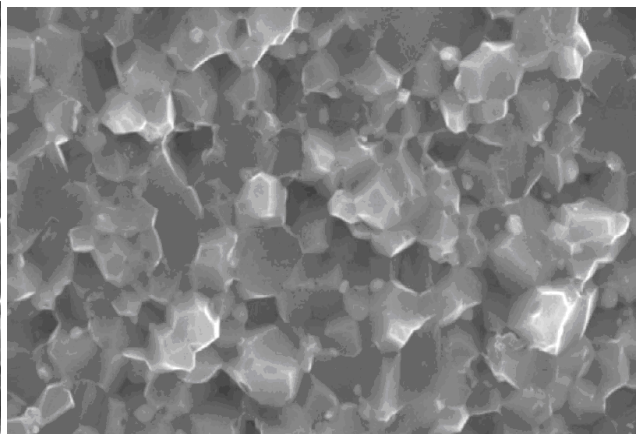


Рис. 2б Сплав AW20

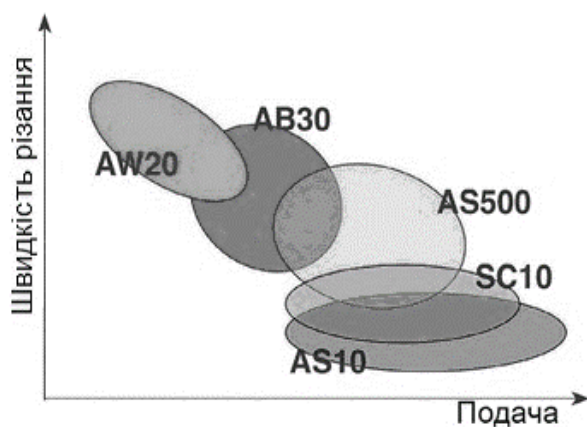


Рис. 2в Область застосування керамічних сплавів при обробці чавуну.

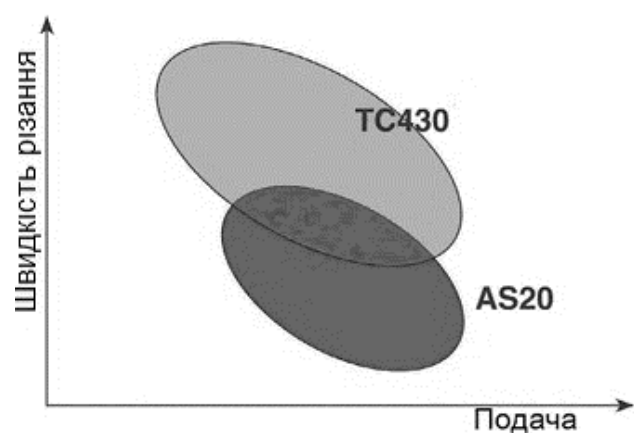


Рис. 2г Область застосування керамічних сплавів по жароміцним матеріалами.

Компанія TaeguTec, оновивши лінійку інструментів з кераміки пластинами, виготовленими за технологією Wisker, пропонує для високошвидкісної обробки високоміцних і жароміцних матеріалів сплав TC430. Володіючи «підкладкою» з оксиду алюмінію (Al_2O_3) і нанесеними кристалами з карбиду кремнію (SiC) з підвищеною стійкістю до окислення, новий сплав забезпечує унікальні показники стійкості і до викришування, і до стирання.

Сплав TC430 демонструє кращий результат при високих температурах, пов'язаних з високими швидкостями різання, завдяки комбінації унікальної фізичної мікроструктури і хімічних властивостей.

Ця особливість сплаву TC430 дозволяє обробляти жароміцні матеріали на основі нікелю, такі як сплав інконель, сплави на основі титану, кобальту, а також загартовані сталі і чавуни на високих швидкостях різання.

Керамічні сплави, в разі їх виправданого застосування, забезпечують вкрай високу продуктивність і значно скорочують машинний час і витрати на інструмент в порівнянні з твердосплавними пластинами.

Характеристики керамічних пластин TaeguTec представлені в таблиці 3. З неї видно, що сплави на основі нітриду кремнію (AS10 і AS500) мають високу стійкість до викришування в порівнянні з матеріалами на основі оксиду алюмінію, що володіють більш високою твердістю. Детальне порівняння сплавів на основі нітриду кремнію і оксиду алюмінію можна подивитися в таблиці 4. З огляду на, довгасту мікроструктуру зерен можна зробити висновок, що нітрид кремнію досить в'язкий, а значить, більш механічно міцний, ніж оксид алюмінію. У той же час оксид алюмінію є більш твердим матеріалом через жорсткої дрібнозернистої структури. Стає очевидною рекомендація сплавів AS10 (або AS500) для чорнової обробки чавунів, тоді як сплави AW20, AB20 і AB30 слід застосовувати для безперервного чистового точіння на високих швидкостях.

Таблиця 3

Характеристики керамічних пластин TaeguTec

Сплав	AW20	AB20	AB30	TC430	AS500	SC10	AS10	AS20
Склад	Al ₂ O ₃ ZrO ₂	Al ₂ O ₃ T(C,N)	Al ₂ O ₃ TiC	SiC Whisker	SiAlON	CVD Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄	Si ₃ N ₄ TiN
Густина	4.05	4.3	4.25	3.74	3.21	3.22	3.22	3.5
Твердість H _{Ra}	93.8	94.5	94.5	95.1	93.9	93.6	93.7	93.0
Кс (МПа/м ^{1/2})	3.0	3.2	3.5	3.5	4.3	4.5	6.0	5.0
Особливість	← Хімічна стабільність			Фізична стабільність →				
Примітка	Чавун	Загартована сталь	Чавун	Жароміцні сплави	Чавун		Жароміцні сплави	

Таблиця 4

Порівняння сплавів на основі нітриду кремнію і оксиду алюмінію

Сплав		AS500 (Нітрид кремнію)	AB20 (Оксид алюмінію)
Основа	Si ₃ N ₄	3.4	
Додавання	Al ₂ O ₃ або окис	TiC, TiN і т.п.	
Стійкість до викрошування		5-7	3-4
Твердість (H _v)		1600-1900	1800-2100

У процесі різання в результаті тертя стружки по передній поверхні інструменту і задньої поверхні про заготовлю ріжучі поверхні інструменту зношуються. Незалежно від виду і призначення інструменти зношуються: по задній поверхні;

по передній поверхні; одночасно по передній і задній поверхнях. Залежно від умов обробки може переважати той чи інший вид зносу. У процесі різання збільшується майданчик тертя, нагрівання, швидше протікає процес зносу. Швидке зростання зносу є небезпечним, так як може призвести до руйнування ріжучої кромки інструменту. Зношування інструменту допускається в певних межах (допустимий знос), після якого інструмент потрібно переточити, відновити його ріжучі здатності. Знос передньої поверхні інструменту утворюється від тертя сходять з неї стружки. Знос утворюється у вигляді лунки. Краї лунки розташовуються приблизно паралельно головному лезу інструмента, а довжина лунки дорівнює його робочій довжині [3].

Основними видами зносу є абразивний, молекулярний і дифузійний зношування і приробочний знос.

При контакті однойменних матеріалів схоплювання починається при температурах, рівних $(0,3 - 0,4) T_{пл}$, а при контакті різнойменних матеріалів $(0,35 - 0,5) T_{пл}$, при дуже високих температурах контактування процес схоплювання призводить до спікання. Молекулярний знос можна зменшити застосуванням МОР, котре створює на контактних поверхнях захисні плівки, які зменшують сили прилипання.

Різець за часом зношується нерівномірно, рис. 3. На початку роботи швидко стираються нерівності, шорсткості ріжучої кромки і знеуглецьована шар інструменту, що з'явився при його термічній обробці. Цей знос називається приробочним.

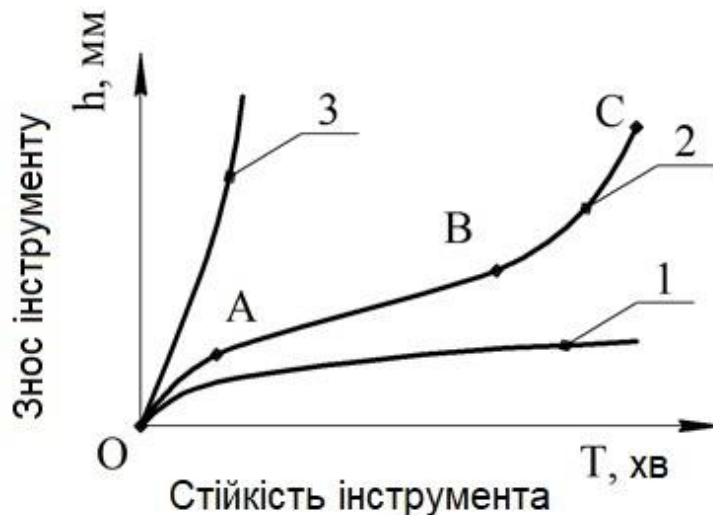


Рис. 3. Процес зносу ріжучого інструменту при швидкостях: 1 – низьких; 2 – нормальних; 3 – високих. Від 0 до А – початковий знос; від А до В – нормальний знос; від В до С – катастрофічний знос

На знос і стійкість інструменту впливають швидкість різання, фізико-механічні властивості оброблюваного та інструментального матеріалу, стан поверхні різальних крайок інструменту, жорсткість технологічної системи верстата [4], властивості застосовуваної МОР, елементи режиму різання, кути різця і ін.

Найбільший вплив на стійкість інструменту надає швидкість різання. Чим вище швидкість, тим більше енергії витрачається на процес різання, тим більше виділяється тепла, тим інтенсивніше відбувається знос поверхонь що поверхонь ріжучої частини інструменту і тим менше період стійкості. Дослідженнями і практикою встановлено, що невелике збільшення швидкості різання викликає значну зміну стійкості різця. Наприклад, якщо швидкість різання при роботі твердосплавним різцем збільшується в два рази, то стійкість різця зменшиться в 32 рази.

Критерій оптимального зносу має на увазі знос, при якому загальний термін служби інструмента виходить найбільшим.

Проведено триботехнічне дослідження на адгезіометрі при використанні сферичних інденторів з швидкорізальної сталі Р6М5 без покриття, з покриттями (TiCr) N і (TiCr) N + епілама - матеріал зразків зі сталі 40Х (20 HRC), а також серії натурних випробувань при фрезеруванні і точінні [5, 6].

Фрезерування здійснювалося на вертикально-фрезерному верстаті НЕСКЕРТ сталі 40Х кінцевими фрезами ($d = 12$ мм, $z = 4$) марки "Carbide" (США) – твердий сплав на основі карбідів вольфраму; "Carbide" + покриття (TiAl) N; "HSS" + покриття (TiCr) N – швидкоріжуча карбідосталь; М42 (Японія) – швидкоріжуча сталь з вмістом 8% З; М42 + покриття (TiAl) N і різцьовим фрезами ($d = 90$ мм, $z = 1$) зі змінними чотиригранними твердосплавними пластинами ТТ8К6 і ТТ8К6 + покриття TiN, (TiCr) N, (TiAl) N, (AlTi) N, (TiAlCr) N, (AlTiCr) N з різним процентним вмістом кожного з елементів покриття, при різних режимах різання ($n = 500 - 900$ об / хв; $S = 60 - 100$ мм \ хв, $t = 1 - 3$ мм, b 40Х, EI - 654, рис. 4. ЖС6УВІ твердосплавними пластинами ТТ8К6 з усіма перерахованими вище покриттями. Точіння відбувалося на токарному верстаті 16К20 сталей і сплавів.

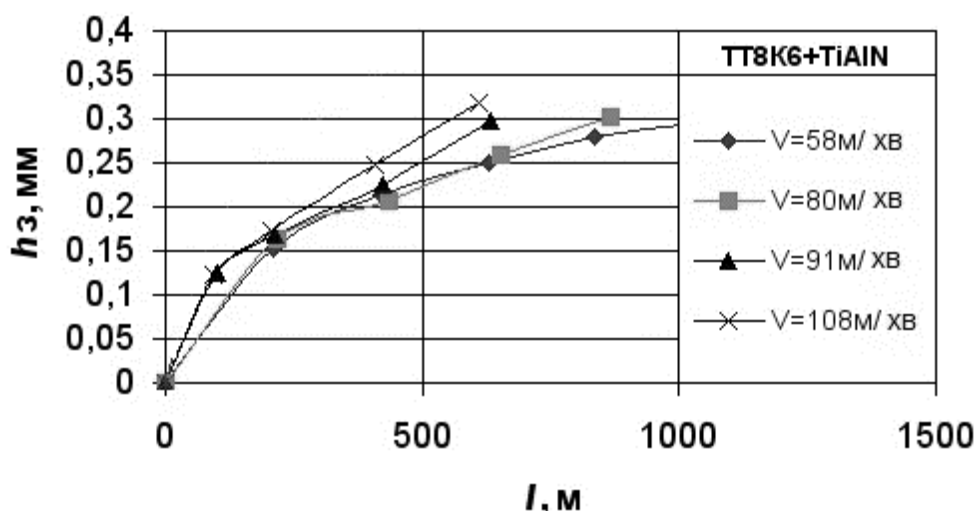


Рис. 4. Вплив довжини шляху різання на знос інструменту по задній поверхні при точінні з різними швидкостями різання

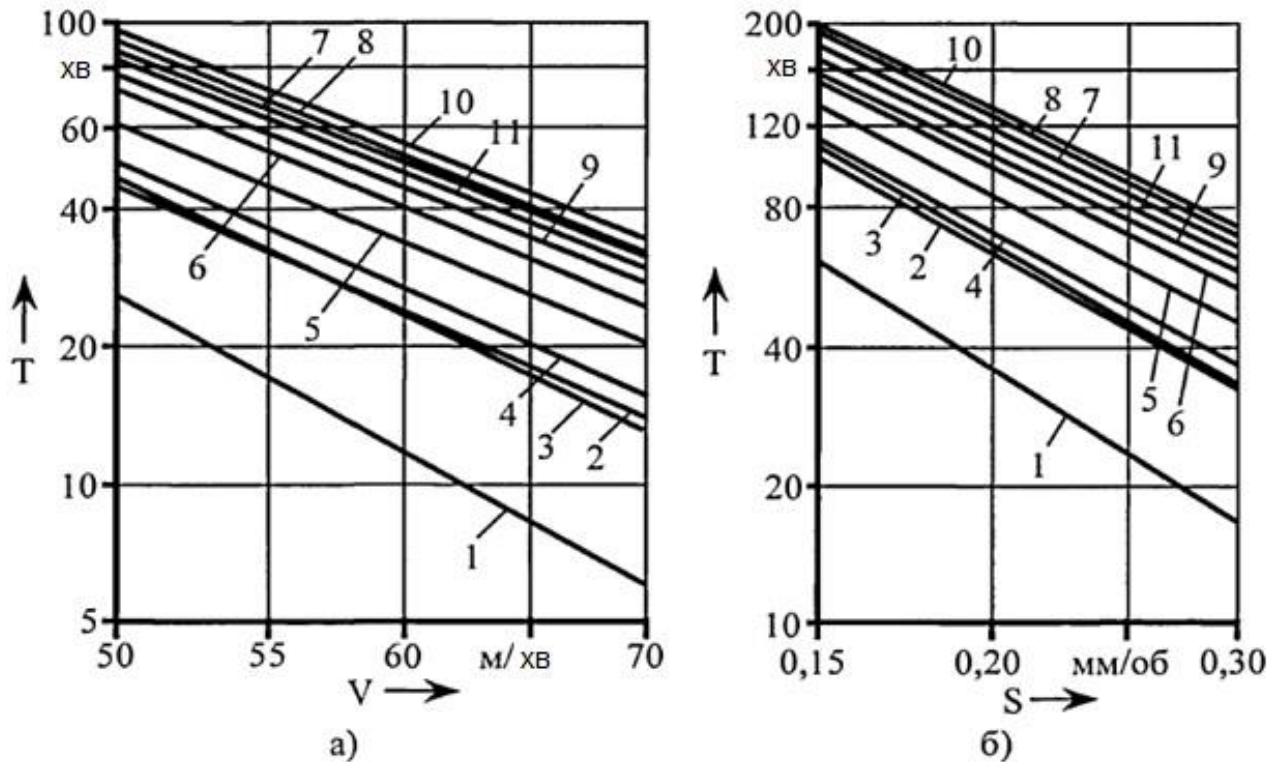


Рис. 5. Залежність періоду стійкості T ріжучого інструменту зі швидкорізальної сталі Р6М5К5 з багатоелементними покриттями при обробці заготовок зі сталі 30ХГСА від швидкості різання V (а) і подачі S (б): 1 – TiN; 2 – TiSiN; 3 – TiZrN; 4 – TiAlN; 5 – TiSiCrN; 6 – TiSiZrN; 7 – TiSiAlN; 8 – TiZrSiN; 9 – TiZrAlN; 10 – TiAlSiN; 11 – TiAlZrN; а - $S = 0,3$ мм/об, $t = 0,75$ мм; б - $V = 55$ м / хв, $t = 0,75$ мм.

Дослідженнями встановлено, що найбільшу ефективність забезпечують покриття TiAlSiN, TiZrAlN, TiZrSiN і TiAlZrN, в той час як покриття на основі нітриду титану і кремнію (TiSiAlN, TiSiZrN, TiSiCrN) - трохи меншу. При цьому найбільше підвищення періоду стійкості забезпечують покриття, що володіють великою в'язкістю руйнування, високою міцністю зчеплення з інструментальною основою. Аналіз отриманих математичних моделей дозволяє відзначити, що нанесення зносостійких трьохелементної покриттів на основі модифікованого нітриду титану не змінює характеру залежностей періоду стійкості різального інструменту від режимів різання (швидкості різання і подачі). Однак ступінь впливу швидкості різання і подачі на величину періоду стійкості змінюється в залежності від інструментального та оброблюваного матеріалів і складу покриттів. В цілому можна відзначити, що використання трьохелементної нітридних покриттів призводить до зниження впливу швидкості різання і подачі (зменшення показників ступеня x і y) на період стійкості різального інструменту в порівнянні з базовими покриттями TiAlN, TiZrN і TiSiN.

Відсутність рекомендацій і технологічних досліджень з високошвидкісного різання стримує розвиток цього прогресивного напрямку. У зв'язку з цим виконаємо аналіз взаємозв'язку між двома технологічними резервами: збільшенням

періоду стійкості PI і приростами режимних параметрів різання (швидкості різання, подачі, глибини різання). При цьому зростання, наприклад, швидкості різання, призводить до відповідного зменшення періоду стійкості, наприклад, до його базового значення, по відношенню до якого мало місце збільшення періоду стійкості. Причини, що призвели до зростання періоду стійкості, тут не розглядаються. Такими причинами можуть бути застосування більш ефективних мастильно-охолоджуючих рідин (МОР) або твердої технологічної мастила, нового інструментального матеріалу, зміна геометричних параметрів ріжучих лез, поліпшення оброблюваності матеріалу заготовки тощо.

Відповідно до "розширених" рівнянь Ф.У. Тейлора стійкість PI пов'язана з режимами різання [6, 7] як:

$$T = \frac{C}{v^{1/n} \cdot s^{1/n_1} \cdot t^{1/n_2}}, \quad (1)$$

де: v – швидкість різання, $m/xв$; s – подача, $mm/об$; t – глибина різання, mm ; C – постійна величина, відповідна конкретній комбінації "інструмент-заготовка" і конкретної геометрії PI ; $1/n$ – показники ступеня при швидкості різання, подачі і глибині різання, відповідно, причому $1/n > 1/n_1 > 1/n_2$.

При точінні стали твердістю HB190 прохідними різцями з пластинками твердого сплаву T15K6 (в інтервалі $0,75 \geq 0,3mm/об$) [6, 7].

$$v = \frac{371}{T^{0,2} \cdot s^{0,35} \cdot t^{0,15}} \cdot K_v, \quad (2)$$

де: K_v – коефіцієнт, що враховує вплив на швидкість різання змінених умов різання (по відношенню до базових умов), $K_v = 1$.

Зведемо обидві частини цього рівняння в ступінь 5 (величина, зворотна числу $0,2 = 1/5$), тоді:

$$T = \frac{7,0286 \cdot 10^{12} \cdot K_v^5}{v^5 \cdot s^{1,75} \cdot t^{0,75}} \quad (3)$$

Видно, що показники ступеня при швидкості, подачі і глибині різання співвідносяться між собою як 5: 1,75: 0,75 або 1: 0,35: 0,15, тобто швидкість різання надає найбільший вплив на стійкість PI , за нею йдуть подача і глибина різання.

Порівнюючи вирази (2) і (3), бачимо, що. Якщо умови базові, тобто .

Перетворимо вираз (3) до вигляду:

$$T = \frac{C}{v^\alpha \cdot s^\beta \cdot t^\gamma}, \quad (4)$$

де коефіцієнти; $\alpha = 5$; $\beta = 1,75$ і $\gamma = 0,75$. Далі шукаємо повний диференціал виразу (4), яке представляє собою функцію $T=T(v,s,t)$.

Маємо:

$$\partial T = \frac{\partial T}{\partial v} \cdot \partial v + \frac{\partial T}{\partial s} \cdot \partial s + \frac{\partial T}{\partial t} \cdot \partial t \quad (5)$$

Знайдемо вираз (5) стосовно залежності (4). Замінімо знак нескінченно малого збільшення d на кінцеве мале збільшення Δ . Отримаємо величину приросту стійкості ріжучого інструменту ΔT в залежності від величин збільшень режимних параметрів, Δv , Δs і Δt :

$$\Delta T = -C \left(\frac{\alpha \Delta v}{v^{\alpha+1} \cdot s^{\beta} \cdot t^{\gamma}} + \frac{\beta \Delta s}{v^{\alpha} \cdot s^{\beta+1} \cdot t^{\gamma}} + \frac{\gamma \Delta t}{v^{\alpha} \cdot s^{\beta} \cdot t^{\gamma+1}} \right) \quad (6)$$

або

$$\Delta T = -\frac{C}{v^{\alpha} \cdot s^{\beta} \cdot t^{\gamma}} \left(\alpha \frac{\Delta v}{v} + \beta \frac{\Delta s}{s} + \gamma \frac{\Delta t}{t} \right) \quad (7)$$

З формули (7) видно, що приріст стійкості ΔT зумовлюється сумою масштабованих відносних змін режимних параметрів v , s і t з ваговими коефіцієнтами α , β і γ , відповідно. Знак мінус перед цим виразом показує, що позитивні збільшення параметрів v , s і t призводять до зменшення стійкості ΔT .

Якщо режимні параметри різання збільшити на 10% (відносні зміни параметрів дорівнюватимуть 0,1), то вираз (7) набуває вигляду:

$$\Delta T = -\frac{C}{v^{\alpha} \cdot s^{\beta} \cdot t^{\gamma}} (0,1\alpha + 0,1\beta + 0,1\gamma)$$

Підставляючи чисельні значення базових величин $v_0 = 200$ м/мин, $s_0 = 0,2$ мм/об і $t_0 = 6$ мм, отримаємо:

$$\Delta T = \frac{7,0286 \cdot 10^{12}}{200^5 \cdot 0,2^{1,75} \cdot 6^{0,75}} (0,1)(5 + 1,75 + 0,75) = -95,5 \cdot 0,1 \cdot 7,7 = -71,6 \text{ хв.}$$

У цьому виразі величина 95,5 хв являє собою базове значення стійкості T_0 ріжучого інструменту, а коефіцієнт 0,75 – частку стійкості, зменшує за рахунок збільшення всіх режимних параметрів на 10%, тобто:

$$\Delta T = -0,1T_0 (\alpha + \beta + \gamma) \quad (8)$$

З урахуванням формули (4) вираз (7) можна привести до виду:

$$\frac{\Delta T}{T} = -\left(\alpha \frac{\Delta v}{v} + \beta \frac{\Delta s}{s} + \gamma \frac{\Delta t}{t} \right) \quad (9)$$

У вираженні (9) $T = T_0 = T(v_0, s_0, t_0)$, $v = v_0$, $s = s_0$, $t = t_0$. З урахуванням виразу (8) для 10% -го збільшення всіх режимних параметрів отримуємо:

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{-71,6}{95,5} = -0,1(5 + 1,75 + 0,75) = -0,75$$

Таким чином, при одночасному збільшенні всіх режимних параметрів на 10% стійкість різального інструменту зменшується на 75%, причому внесок в ці 75% окремих режимних параметрів v , s і відповідно становить 50, 17,5 і 7,5%.

Вирішуючи рівняння (1) щодо швидкості різання v , допустимої інструментом, отримуємо відому залежність [7]:

$$v = \frac{C_v}{T^m t^x s^y} K_v \quad (10)$$

З аналізу (10) випливає, що будь-яке збільшення стійкості T від деякого вихідного (базового) значення T_a до нового значення T_i може бути перетворено в збільшення швидкості різання v . У свою чергу, вказане збільшення швидкості різання v призведе до зменшення стійкості від нового значення до базового значення T_i до базового значення T_a .

Введемо позначення: аналізу (10) випливає, що будь-яке збільшення стійкості T від деякого вихідного (базового) значення T_a до нового значення T_i може бути перетворено в збільшення швидкості різання v . У свою чергу, вказане збільшення швидкості різання v призведе до зменшення стійкості від нового значення до базового значення T_i до базового значення T_a .

Введемо позначення:
$$\left(\frac{T_i}{T_a}\right)^m = K_T, \quad (11)$$

тобто:

$$\frac{T_i}{T_a} = K_T^{1/m}, \quad (12)$$

де: K_T – коефіцієнт технологічної ефективності, що враховує взаємозв'язок між збільшенням періоду стійкості різального інструменту і збільшенням швидкості різання, причому, якщо $K_T > 1$, якщо $T_i > T_a$, і $K_T < 1$, якщо $T_i < T_a$.

$$v = \frac{C_v K_T}{T_i^m t^x s^y} K_v \quad (13)$$

Якщо $m \leq 1$ (наприклад, $m = 0,2$) і $1/m$ – ціле число, $1/m = 5$), то формулу (11) можна записати у вигляді:

$$K_T = \left(\frac{T_i}{T_a}\right)^m = \sqrt[m]{\frac{T_i}{T_a}} \quad (14)$$

або

$$K_T = \sqrt[5]{\frac{T_i}{T_a}} \quad (15)$$

Вираз (13) з урахуванням залежності (11) може бути представлено у вигляді:

$$v_T = \frac{C_v}{\left(\frac{T_i}{K_T^{1/m}}\right)^m t^x s^y} K_v = \frac{C_v}{T_a^m t^x s^y} K_v \quad (16)$$

Вираз (16) показує, що при одночасному збільшенні стійкості РІ від базового значення до нового значення і швидкості різання (в K_T раз) залежність швидкості різання від стійкості РІ і від режимних параметрів t і s залишається колишньою, тобто такою, якою вона була до використання технологічної новації. Іншими словами, збільшення стійкості РІ рівносильно збільшенню коефіцієнта K_v у формулі для швидкості різання в раз K_T .

Вплив ресурсу стійкості РІ на ресурс швидкості різання можна показати графічно (рис. 6). Видно, що збільшення періоду стійкості РІ (X), наприклад, в 32 рази ($T_i / T_a = 32$) дозволить збільшити швидкість різання Y в два рази ($K_T = 2$). Зменшення періоду стійкості РІ в 32 рази ($T_i / T_a = 1/32$), призводить до необхідності зменшення швидкості різання в два рази ($K_T = 1/2$). Це обумовлено тим, що $32^{0,2} = 2$, а $(1/32)^{0,2} = 1/2$. Коефіцієнт K_T можна визначити, наприклад, з порівняння двох кривих зносу ріжучого інструменту, одна з яких визначена в умовах застосування будь-якої технологічної новації, а інша - в початкових умовах.

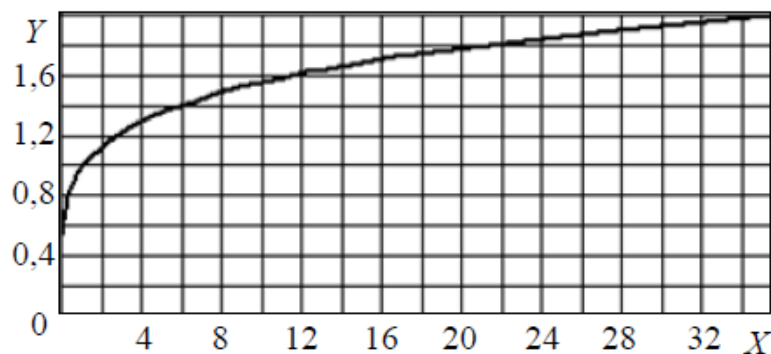


Рис. 6. Вплив збільшення періоду стійкості РІ на збільшення швидкості різання

На рис.6 видно, що при використанні більш ефективної МОР (технологічна новація) швидкість різання можна збільшити, зберігаючи те ж саме значення стійкості різального інструменту, яке було при використанні традиційної МОР.

Аналогічно введеному поправочного коефіцієнту $K_T = K_T(v)$ на швидкість різання можна ввести поправочні коефіцієнти на подачу $K_T(s)$ і глибину різання $K_T(t)$, які показують, у скільки разів можна збільшити подачу і глибину різання, щоб використовувати ресурс підвищення стійкості РІ при тій же самій швидкості різання. Для цього перетворимо вираз (4) в наступні дві залежності:

$$s = \frac{(CK_v^\alpha)^{1/\beta} K_{T(s)}}{T_i^{1/\beta} v^{\alpha/\beta} t^{\gamma/\beta}} \quad (17)$$

$$t = \frac{(CK_v^\alpha)^{1/\gamma} K_{T(t)}}{T_i^{1/\gamma} v^{\alpha/\gamma} t^{\beta/\gamma}} \quad (18)$$

Порівнюючи залежності (17 і 18) з формулами (13) ... (15), бачимо, що замість показника ступеня $m = 1 / \alpha = 0,2$ в виразах (17) і (18) використовуються показники ступеня $1 / \beta = 1 / 1,175 = 0,57143$ і $1 / \gamma = 1 / 0,75 = 1,333$. Отже, якщо:

$$K_{T(v)} = \left(\frac{T_i}{O_a} \right)^m = \left(\frac{T_i}{O_a} \right)^{1/\alpha} \quad (19)$$

$$K_{T(s)} = \left(\frac{T_i}{O_a} \right)^{1/\beta} \quad (20)$$

$$K_{T(t)} = \left(\frac{T_i}{O_a} \right)^{1/\gamma} \quad (21)$$

На рисунку 6 показана залежність (19). Аналогічні залежності показані для виразів (19) ... (21) (рисунок 7).

Видно, що набагато ефективніше без збільшення швидкості різання збільшувати подачу (крива 2) або глибину різання (крива 3). При збільшенні стійкості інструменту в 8 разів швидкість різання, подачу і глибину різання можна збільшити відповідно в 1,5, в 3,4 і в 16 разів.

Складові сили різання, наприклад, при точінні знаходять за формулою [7]:

$$P_{z,y,x} = 10C_p t^x s^y v^n K_p \quad (22)$$

де: постійна величина C_p і показники ступеня x , y і n для кожної зі складових сили різання взяті з табличних даних [8].

У формулі (22) показник ступеня n 0, наприклад, $n = -0,15$, $n = -0,3$ і $n = -0,4$ для складових сил різання P_z , P_y , і P_x відповідно при зовнішньому поздовжньому точінні і розточуванні [9]. Отже, зі збільшенням швидкості різання при інших рівних умовах складові сили різання при точінні зменшуються.

Таким чином, підвищення швидкості різання за рахунок використання більш ефективної МОР буде пов'язано зі зменшенням сил різання при точінні і розточуванні. Це, в свою чергу, призведе до зменшення пружних віджатий в технологічній системі при фіксованій її жорсткості. Тобто перетворення ресурсу стійкості РІ в ресурс збільшення швидкості різання одночасно призведе до збільшення точності обробки по виконуваного розміру (за рахунок зменшення пружних віджатий).

Таким чином, підвищення швидкості різання за рахунок використання більш ефективної МОР буде пов'язано зі зменшенням сил різання при точінні і розточуванні. Це, в свою чергу, призведе до зменшення пружних віджатий в технологічній системі при фіксованій її жорсткості. Тобто перетворення ресурсу

стійкості PI в ресурс збільшення швидкості різання одночасно призведе до збільшення точності обробки по виконуваного розміру (за рахунок зменшення пружних віджатий).

Збільшення періоду стійкості PI (внаслідок впровадження будь-якої технологічної новації) в рамках пропонованої математичної моделі процесу різання можна використовувати за кількома напрямками вдосконалення технології механічної обробки, зобразимо це на рис.7:

1. Збільшити швидкість різання v при збереженні колишнього значення стійкості інструменту, що дозволить зменшити тангенціальну P_z і радіальну P_y складові сили різання. Це призведе, з одного боку, до зменшення температури в зоні різання (при зменшенні P_z), з іншого, до збільшення точності одержуваного розміру (зовнішнього або внутрішнього діаметра оброблюваної заготовки).

2. Залишити швидкість різання v без зміни і при тій же глибині різання, що дорівнює припуску на обробку, збільшити подачу s або глибину різання t таким чином, щоб зберегти необхідну стійкість T ріжучого інструменту без зміни.

3. Частково збільшити швидкість різання v і при колишньому значенні стійкості інструменту збільшити подачу s .

Визначимо можливе збільшення подачі для другого випадку, тобто коли ресурс стійкості інструменту повністю перетворюється в ресурс збільшення подачі, а швидкість різання залишається колишньою.

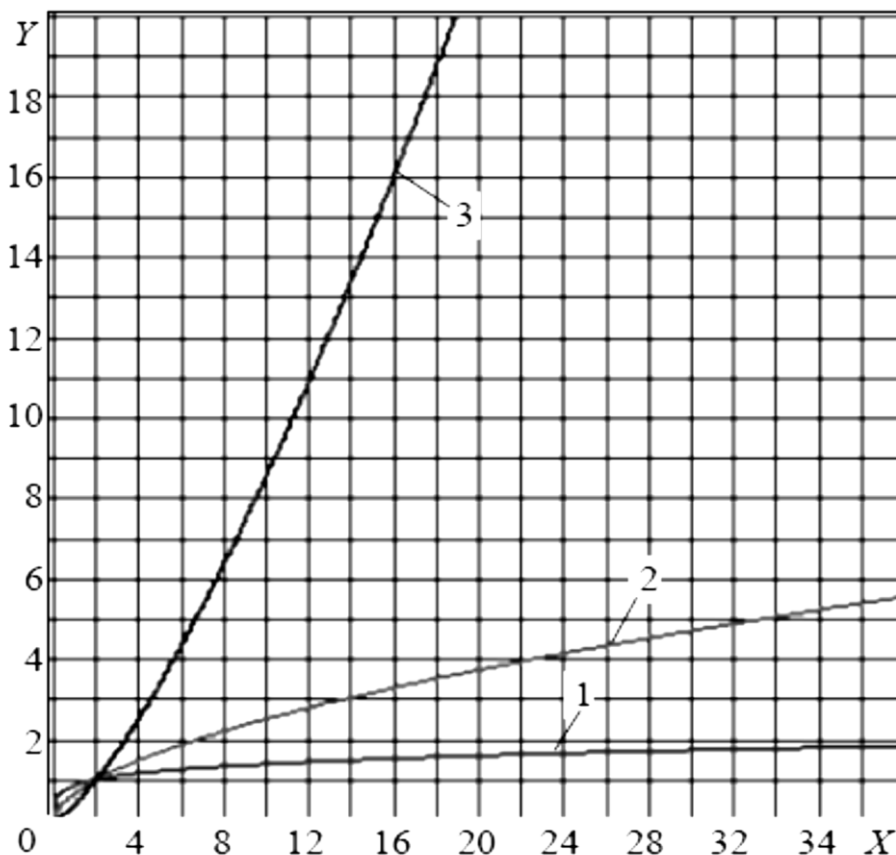


Рис. 7. Співвідношення між ресурсом підвищення стійкості PI $X = T_n / T_0$ і ресурсами збільшення режимних параметрів різання: коефіцієнт ефективності $Y = K_T(v)$ (1), $Y = K_T(s)$ (2) і $Y = K_T(t)$ (3)

Відомо, що зв'язок між швидкістю різання v і частотою обертання шпинделя n виражається залежністю:

$$v = \frac{\pi dn}{1000}, \quad (23)$$

де: d – діаметр оброблюваної заготовки, мм.

Прирівнюючи вирази (13) і (23), отримуємо умову для мінімізації машинного часу обробки:

$$ns^y \leq \frac{1000C_v K_v K_T}{\pi d T^m t^x}. \quad (24)$$

Видно, що при незмінній частоті обертання шпинделя виробнича величина s зростає в K_T раз. Отже, подача s може бути збільшена в $K_{1/yT}$ раз, причому величина може приймати значення від 0,2 до 0,45. Таким чином, подачу можна збільшити в, тобто майже в стільки ж разів, у скільки реально зросла стійкість інструменту. Значення точно дорівнює відношенню нового і колишнього значень періоду стійкості PI , якщо в формулах (2) і (3) коефіцієнт $m = 0,2$.

Відомо загальне уявлення про статистичної природі ресурсу стійкості PI . Внаслідок неминучих флуктуацій в процесі зносу одні і ті ж PI мають різний період стійкості. Статистична крива розподілу терміну служби PI часто має вигляд кривої Гауса. При цьому ширина поля розсіювання стійкості PI може перевищувати мінімально можливу їх стійкість. Сучасна практика зміни різців враховує коливання терміну служби шляхом зміни всіх різців на початку лівій частині кривої розподілу з тим, щоб запобігти випадкам їх поломки. У цьому випадку більшість різців буде замінюватися раніше, ніж вони зносяться. При наявності датчика стану PI по зносу все вони змінювалися б при певному рівні зносу, так що кожен з них замінюється в потрібний момент часу, який відповідає цьому PI . При використанні датчика зносу кожен PI працює більший час. Це означає, що облік фактичної стійкості, наприклад, методом діагностики стану технологічної системи різання, дозволить в два і більше разів збільшити машинний час обробки одним і тим же PI . Це один із суттєвих резервів підвищення ефективності обробки різанням на дорогих верстатах з ЧПУ. Як правило, на таких верстатах застосовується дорогий PI фірми SANDVIK Coromant (Швеція). У той же час з представлених теоретичних досліджень впливає другий не менш важливий технологічний резерв. Для істотного збільшення стійкості PI в зв'язку з необхідністю закінчення обробки деталі, розпочатої цим PI , можна трохи зменшити швидкість різання, що істотно збільшить приріст стійкості різця (рис. 7).

Висновки. Підводячи підсумки проведеного аналізу можна сформулювати наступні висновки.

1. Введено коефіцієнт технологічної ефективності K_t показує, у скільки разів може бути збільшений будь-якої режимний параметр різання, якщо при інших рівних умовах стійкість інструменту зростає в $T_n / T_0 =$ раз.

2. Невелике зменшення швидкості різання, наприклад, на 8%, дозволяє в два рази збільшити стійкість інструмента. Цим ефектом можна користуватися в тих

випадках, коли необхідно збільшувати час роботи РІ в міру його затуплення (при необхідності збільшити стійкість РІ, щоб закінчити розпочату обробку деталі).

3. Без зміни швидкості різання подачу і глибину різання можна збільшити більш істотно, ніж швидкість різання. Збільшення швидкості різання в два рази можна замінити збільшенням подачі і глибини різання в 3,4 і в 16 разів, відповідно, при інших рівних умовах.

4. Виконаний аналіз математичної моделі процесу різання застосуємо для оцінки ефективності різних технологічних новацій, які знаходять застосування при лезовій обробці заготовок на верстатах з числовим програмним керуванням..

Перелік посилань

1. Кіпчарський, В.П. (2018). *Металорізальні верстати : навчальний посібник*. Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ».
2. Швець, С.В. (2007). *Металорізальні інструменти: Навчальний посібник*. Суми: Вид-во СумДУ.
3. Бивалькевич, Л.М. & Люлька, В.С. (2018). *Різання матеріалів верстати та інструменти : Навчально-методичний посібник з лабораторних робіт*. Чернігів: НУЧК імені Т.Г. Шевченка
4. 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>
5. Кравченко, Ю.Г., Дербаб, 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.*, (85), 137–148.
6. Derbaba V.A., Zil , V.V., & Patsera, S.T. (2014). Evaluation of the adequacy of the statistical simulation modeling method while investigating the components presorting processes. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (5), 45-50.
7. Кравченко, Ю.Г., Дербаб, 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, Y., & 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*, 63, 123–133.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/63.123>
9. Дербаб, В.А., Носачов, В.С., & Різо, З.М. (2021). Дослідження і удосконалення методики випробувань верстата на геометричну і кінематичну точність. *Збірник наукових праць НГУ*, 64, 198-212.
<https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.198>

АННОТАЦІЯ

Цель. Проанализировать и проверить на адекватность известные расчетные формулы при определении зависимости периода устойчивости режущего инструмента из твердого сплава с многоэлементными покрытиями при высокоскоростной обработке заготовок. Произвести сравнительные расчеты для упрощения методологии комплексных испытаний металлорежущих инструментов разных групп. Выбор и усовершенствование научных методик и рекомендаций при проведении комплексных испытаний режущего инструмента, используемого на станках с программным управлением.

Методика. Исследование базируется на применении аналитических способов расчета определения периода устойчивости инструмента, скорости резания, скорости подачи, глубины резания, показателей степени режимов и коэффициента технологической эффективности при различных условиях резания.

Результаты. Получены формулы исследований коэффициента технологической эффективности, периода устойчивости инструмента и показателей степени режимов при составлении научных методик и рекомендаций по проведению комплексных испытаний режущего инструмента на станках с программным управлением.

Научная новизна. Выполнены исследования и установлена параметрическая взаимосвязь коэффициента технологической эффективности с определением периода устойчивости режущего инструмента при высокоскоростной обработке заготовок на станках с программным управлением. Получены значения и функциональные зависимости скорости резки, скорости подачи, глубины резания и их показателей степени на процесс износа режущего инструмента. Установлено, что ресурс режущего инструмента в значительной степени зависит от специальных сплавов и покрытий на поверхности лезвия, длины пути резки, использования смазочно-охлаждающих жидкостей, изменения геометрических параметров лезвий и специализированных инженерных компьютерных систем при подготовке управляющих программ для станков с программным управлением.

Практическая значимость. Практическое достижение полученных результатов заключается в подтверждении адекватности известных расчетных формул при определении режимных показателей и их степени, коэффициента технологической эффективности, периода устойчивости режущего инструмента из твердого сплава с многоэлементными покрытиями при высокоскоростной обработке заготовок. На основе полученных аналитических и расчетных данных составлена упрощенная комплексная методика испытания металлорежущего инструмента при высокоскоростной обработке на станках с программным управлением:

- испытании инструмента из быстрорежущей стали;
- испытании инструмента из твердого сплава;
- испытании инструмента из твердого сплава с многоэлементными покрытиями;
- испытании инструмента из твердого сплава из на основе нитрида титана и кремния.

Ключевые слова: *инструмент металлорежущий, период стойкости, износ, специальные покрытия, металлообрабатывающий станок, испытание, программное управление.*

ABSTRACT

Purpose. Analyze and check for adequacy the known calculation formulas in determining the dependence of the period of stability of the cutting tool made of hard alloy with multi-element coatings in high-speed machining of workpieces. Carry out comparative calculations to simplify the methodology of complex tests of metal-cutting tools of different groups.

Methodology. The research is based on using the analytical methods for calculating the period of tool stability, cutting speed, feed rate, cutting depth, indicators of the degree of modes and the coefficient of technological efficiency under different cutting conditions.

Results. The formulas of technological efficiency coefficient research the period of stability of the tool and indicators of modes degree at drawing up of scientific methods and recommendations on carrying out of the cutting tool complex tests on CNC machine are received.

Scientific novelty. The research is carried out and the parametric relationship of the technological efficiency coefficient with the determination of the stability period of the cutting tool in high-speed machining of workpieces on CNC machine. The values and functional dependences of the cutting speed, feed rate, cutting depth and their indicators of the degree of wear of the cutting tool are obtained. It is established that the life of the cutting tool largely depends on special alloys and coatings

on the blade surface, the length of the cutting path, the use of coolants, changes in geometric parameters of the blades and specialized engineering computer systems in preparing control programs for CNC machines.

Practical significance. The practical achievement of the obtained results is to confirm the adequacy of known calculation formulas in determining the mode indicators and their degree, coefficient of technological efficiency, the period of stability of the carbide cutting tool with multi-element coatings in high-speed workpieces.

Based on the received analytical and settlement data the simplified complex technique of testing of the metal-cutting tool at high-speed processing on CNC machine is made:

- testing of high-speed steel tools;
- testing of carbide tools;
- testing of hard alloy tools with multi-element coatings;
- testing of a tool made of hard alloy based on titanium nitride and silicon.

Keywords: *metal-cutting tool, period of stability, wear, special coatings, metalworking machine, testing, software control (CNC).*