

## ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ВИСОКОМІЦНИХ І КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

*У статті розглянуті шляхи підвищення ефективності механічної обробки різанням високоміцних матеріалів за рахунок застосування інструментів із прогресивною кінематикою з надтвердих матеріалів на основі КНБ і впровадження процедур сертифікації в процеси виготовлення та випробовування інструментів.*

Широке застосування в сучасній техніці знаходять матеріали з високими фізико-механічними та іншими спеціальними властивостями, які повною мірою дозволяють реалізувати потенціал швидкісних і динамічних машин і механізмів з продуктивності та якості, знижуючи в той же час їхню металоємність і вагу. Застосування таких матеріалів обумовлене як режимами роботи машин і механізмів, так і умовами навколишнього середовища і зростаючою хімічною агресивністю робочих і технологічних середовищ. Для роботи в таких умовах застосовуються високоміцні сталі та сплави, а також матеріали, що належать до класу композиційних. З композиційних матеріалів поряд з полімерними все ширше застосовуються композити на металевій матриці, частіше на основі алюмінію.

Обробка різанням таких матеріалів супроводжується технологічними проблемами, пов'язаними з необхідністю зниження режимів обробки, значним зменшенням стійкості інструмента, збільшенням динамічного і термічного навантаження на елементи технологічної системи. У сукупності це призводить до різкого зниження продуктивності для досягнення високого рівня якості обробки. У технологічній науці й практиці рішення зазначених проблем досягається декількома шляхами, наприклад:

- за рахунок розробки нових методів обробки з більш ефективною кінематикою робочих рухів при різанні;
- застосуванням інструментальних матеріалів з високим рівнем різальних властивостей і міцності;
- застосуванням технологічних середовищ, що інтенсифікують процес різання за рахунок хімічного впливу і зміни умов фізико-механічної взаємодії робочих поверхонь інструмента й оброблюваного матеріалу;
- застосуванням високоенергетичних методів впливу на оброблюваний матеріал, які призводять до зниження міцності зрізаного шару;
- оптимізацією режимів різання і вибором оптимального сполучення властивостей інструментального матеріалу для конкретних умов обробки;
- удосконалюванням конструкцій і геометрії інструмента для різних областей застосування і створення інструментів для високопродуктивної і високошвидкісної обробки.

У даній роботі розглянуті результати виконаних автором досліджень деяких методів підвищення ефективності процесів різання.

Традиційна кінематика процесів лезової обробки, наприклад точіння, заснована на поєднанні обертального руху заготовки з повздовжнім рухом різця, встановленого на задану глибину різання. При цьому величина швидкості головного руху різання збігається з відносною швидкістю тертя задньої поверхні леза і оброблюваною поверхнею заготовки. Таким чином, підвищення швидкості різання завжди супроводжується зростанням динамічного і теплового навантаження на різальний інструмент і веде до зниження його стійкості. Відомі способи підвищення стійкості інструмента засновані на зниженні швидкості відносного ковзання інструмента і заготовки або періодизації роботи леза у процесі різання. Наприклад, примусове дотичне переміщення леза в процесі різання, або поворот його навколо осі реалізовані в інструментах для «бриуючого» різання. Установка на передній поверхні різця ролика полегшує сходження стружки, знижує силу різання і підвищує стійкість різця. Однак зазначені способи характеризуються тим, що в різанні кожна точка ріжучого леза, бере участь лише один раз і для поновлення процесу різання необхідно його переривання і повернення у вихідний стан. У Фізико-технічному інституті НАН Білорусі розроблено спосіб ротаційного різання, що одночасно

дозволяє знизити швидкість відносного ковзання в контактній зоні і надає процесу переривчастого характеру різання елементарною ділянкою леза, зберігаючи безперервність процесу стружкоутворення і не знижуючи продуктивності. Ідея англійського винахідника J.Napier, запатентована ще в 1868 р., до промислового застосування доведена лише в 60-ті – 70-ті роки минулого сторіччя вченими ФТІ під керівництвом Є.Г. Коновалова. Ряд теоретичних робіт і розробок ротаційного інструмента, виконаний ученими Москви, Харкова та інших наукових центрів.

Аналіз виконаних досліджень і розробок в галузі ротаційного різання (РР) [1, 2] показав, що даний спосіб успішно застосовується, в основному при точінні напрохід великогабаритних деталей з конструкційних матеріалів середньої твердості й міцності. Найбільш широке застосування спосіб РР знаходить в електротехніці при обробці магнітопроводів (роторів і статорів) електричних машин на верстатах-автоматах. Однак проблематичною і актуальною залишається обробка високоміцних сталей і сплавів, і особливо в умовах переривчастого різання, коли переривчастість процесу викликана несучільністю оброблюваної поверхні деталей. Номенклатура таких деталей і обсяги їхнього випуску досить значні. Прикладами деталей з переривчастими поверхнями є шліцеві вали, вали чесальних машин, гарнітура конічних і дискових млинів, замки лопаток ГТД, ротори індукторних генераторів, різного призначення плити і фланці з отворами і пазами, ротори і корпуси ділильних пристроїв тощо. Найбільш часто переривчасті поверхні таких деталей є опорними або посадочними в складальних одиницях, або ж відновідальними за працездатність кромки і граней, ними утворених.

Точність геометричної форми деталей і якість робочих граней, сформованих при переривчастому точінні, значною мірою визначається динамічними навантаженнями при різанні. Величина ударної складової сили різання  $P_{уд}$  для 2-ї одноповоротної геометричної схеми РР згідно з [3] визначається співвідношенням:

$$P_{уд} = \sqrt{\frac{(P_z \sin \omega - P_x \cos \omega \sin \varphi)^2}{1 - \cos^2 \omega \cos^2 \varphi} + P_y^2}, \quad (1)$$

де  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  – складові сили різання,

$\varphi$ ,  $\omega$  – кути установки ротаційного різання в інструментальній системі координат.

Таким чином, задача дослідження зводиться до знаходження умов, які забезпечують мінімум функції (1). З метою одержання додаткової інформації про можливості керування параметрами процесу РР також знаходимо умови мінімуму, складові сили різання  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ .

Розв'язок поставленої задачі здійснюється в два етапи. На першому – за допомогою багатомірного регресійного аналізу знаходимо статистично достовірне нелінійне регресійне рівняння, що виражає залежність мінімізованого параметра  $P_{уд}$  від вхідних параметрів  $v$ ,  $s$ ,  $t$  і оптимізованих параметрів  $\varphi$  і  $\omega$ . На другому етапі знаходимо мінімум  $P_{уд}$ , використовуючи регресійне рівняння, отримане на першому етапі.

Аналіз досліджень з динаміки РР, а також отриманих експериментальних залежностей сили різання від технологічних параметрів при переривчастій обробці показав, що вони мають складний нелінійний характер. Тому доцільно припустити, що регресійна модель включає лінійні, квадратичні і обернені залежності, тобто для кожного параметра має вигляд:

$$y = ax + \frac{b}{x} + cx^2, \quad (2)$$

де  $x = t, v, S, \varphi, \omega$ .

Таким чином, рівняння регресії для  $P_{уд}$ , а також  $P_x$ ,  $P_y$  і  $P_z$  задавалося у вигляді:

$$P = b_0 + b_1 t + \frac{b_2}{t} + b_3 t^2 + b_4 v + \frac{b_5}{v} + b_6 v^2 + b_7 S + \frac{b_8}{S} + b_9 S^2 + b_{10} \varphi + \frac{b_{11}}{\varphi} + b_{12} \varphi^2 + b_{13} \omega + \frac{b_{14}}{\omega} + b_{15} \omega^2. \quad (3)$$

Виконано розрахунок рівнянь регресії. Вихідними даними для обчислення оцінок коефіцієнтів регресії є набір спостережень над значеннями факторів  $X$  і відгуків  $Y$ , представлений у матричній формі. Вхідний масив даних представляв матрицю  $8 \times 141$ , а область зміни вхідних параметрів ( $v, s, t, \varphi, \omega$ ), для якої він отриманий під час технологічного експерименту, подана в табл. 1.

Таблиця 1

Область зміни вхідних параметрів при дослідженні динаміки процесу РР

№ з/п	Найменування вхідного параметра	Позначення параметра і розмірність	Мінімальне значення параметра в досліджах	Максимальне значення параметра в досліджах	Середнє значення параметра
1	Глибина різання	t, мм	0,025	0,375	0,2
2	Швидкість різання	V, м/с	3,65	8,65	6,2
3	Подача	S, мм/про	0,14	1,0	0,507
4	Кут установки в горизонтальній площині	φ, град	8	28	18
5	Кут установки вершини РІ	ω, град	16	28	22

Межі змін технологічних параметрів V і S обумовлені технічними можливостями застосовуваного устаткування (токарно-гвинторізний верстат мод. 1К62), параметра t – досліджуваною областю застосування інструмента і можливостями вимірювального комплексу УДМ-100 за умови безвібраційної роботи інструмента. Діапазон кутів установки обраний, виходячи з досвіду експлуатації РІ. Кути заточення обрані на підставі попередніх експериментів: задній – 18°, передній – 32°. Наведені дані належать до обробки сталі 45 36...40 HRC<sub>c</sub>. Вимірювальний комплекс містить: тензометричний динамометр УДМ-100, тензоніслювач ТА-5, виборці меж Р009 у комплекті К121 зі світлопроменевим осцилографом Н117.

Розглянемо результати обробки даних. Розраховано значення коефіцієнтів рівняння регресії для  $P_{уд}$ ,  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ . Отримана матриця коефіцієнтів кореляції свідчить про те, що лінійна кореляція існує тільки для  $P_{уд}$  і  $P_y$  (коефіцієнти кореляції для них дорівнюють 0,982). Для інших параметрів усі перехресні коефіцієнти кореляції значно відрізняються від одиниці, що свідчить про відсутність лінійної залежності або про переважно суто нелінійну залежність цих параметрів один від одного. Виконано статистичний аналіз отриманих результатів. Оцінки залишкової дисперсії 90,45; 94,73; 91,17; 90,2 Н відповідно для  $P_{уд}$ ,  $P_z$ ,  $P_y$ , і  $P_x$ . Значимість оцінок коефіцієнтів регресії визначали за допомогою статистики t-розподілу Ст'юдента. Для  $P_{уд}$ , а також для  $P_z$ ,  $P_y$  і  $P_x$  коефіцієнти при всіх степенях V і S, за винятком лінійних, незначущі. Для інших параметрів усі коефіцієнти рівняння регресії значущі з 95 %-ною довірчою ймовірністю. Аналіз апріорної інформації з динаміки ротаційної обробки та отриманих даних при розрахунку регресійної моделі дозволив представити залежність  $P_{уд}$  від технологічних режимів і кутів установки у вигляді:

$$P_{уд} = -21841,67 + 2799,64t - \frac{0,871}{t} - 5156,25t^2 + 333,5S + 99,82 - \frac{7,35}{\varphi} + 2,22\varphi^2 + 993,84\omega + \frac{163232}{\omega} - 14,48\omega^2. \quad (4)$$

Отримані регресійні моделі адекватні функції відгуку при 5 %-ому рівні значущості (за F-критерієм Фішера), а працездатність її підтверджена шляхом дослідження залишків. Аналогічні залежності отримані і для складових  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ . Графічне представлення отриманих результатів наведено на рис. 1.

Аналіз отриманих результатів показав, що оптимальні значення кутів установки ротаційного різця для  $P_{уд}$  ( $\varphi = 22^\circ 30'$ ,  $\omega = 19^\circ 30'$ ) близькі за значеннями до оптимального для  $P_z$  і  $P_y$ . Мінімум  $P_{уд}$  для V і S відсутній. Розрахункові та експериментальні дані свідчать про практичну незалежність  $P_{уд}$  від V і S у досліджуваній області. Також встановлено, що отримані оптимальні значення кутів установки ротаційного різця, що мінімізують ударне навантаження на інструмент, забезпечують і більш високі показники точності оброблених деталей і параметрів якості сформованого поверхневого шару.

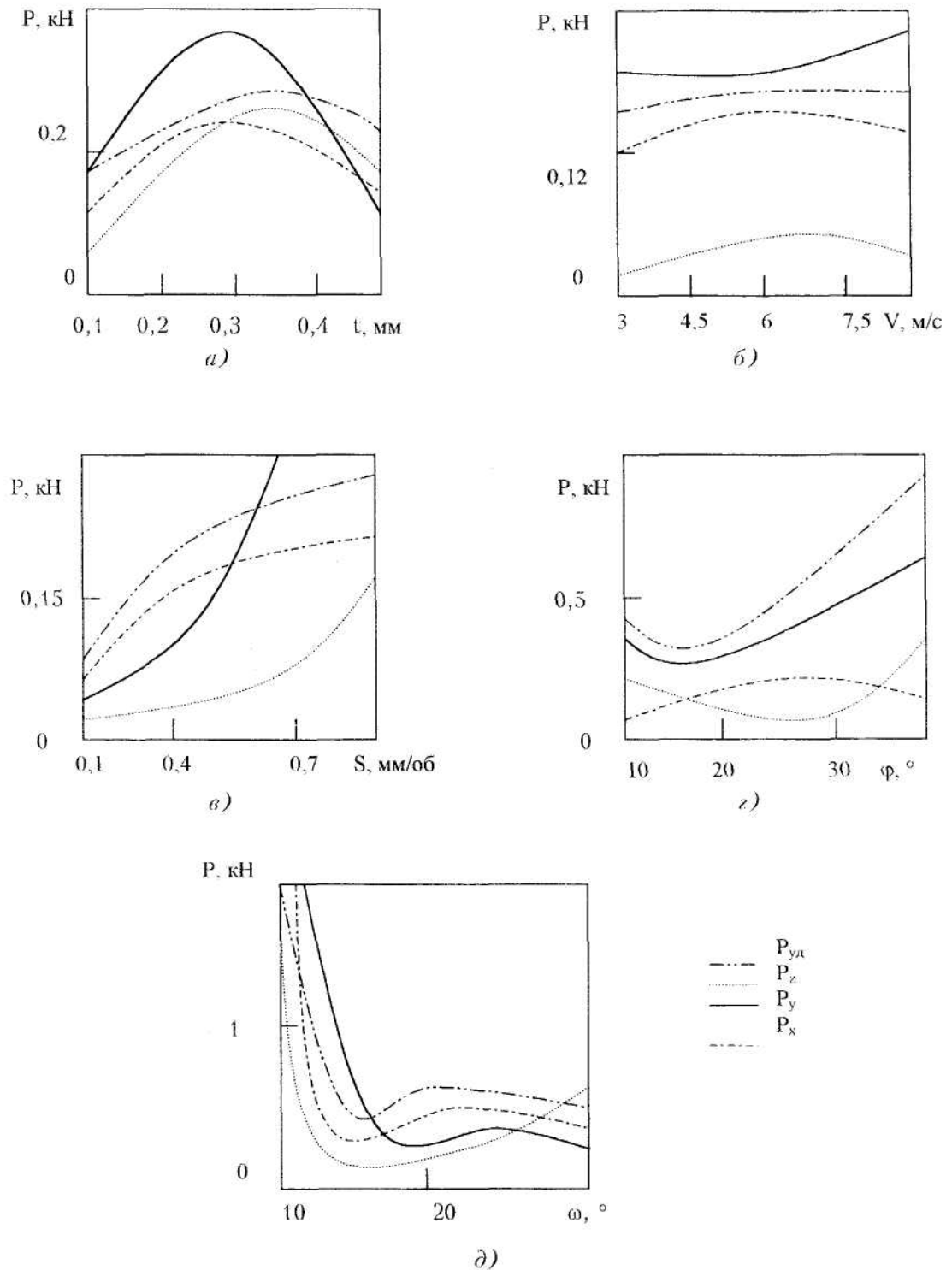


Рис. 1. Залежність ударного навантаження на ротаційний різець і складові сили різання від режимів різання (а – від  $t$ , б – від  $V$ , в – від  $S$ ) і кутів установки (г – від  $\varphi$ , д – від  $\omega$ )

Важливе значення у вирішенні завдань підвищення ефективності обробки високоміцних і композиційних матеріалів має вдосконалення інструментальних матеріалів, спрямоване на забезпечення поєднання максимальної зносостійкості і теплостійкості при високій в'язкості і міцності. Ранжування інструментальних матеріалів за їхніми експлуатаційними характеристиками наведено на рис. 2.

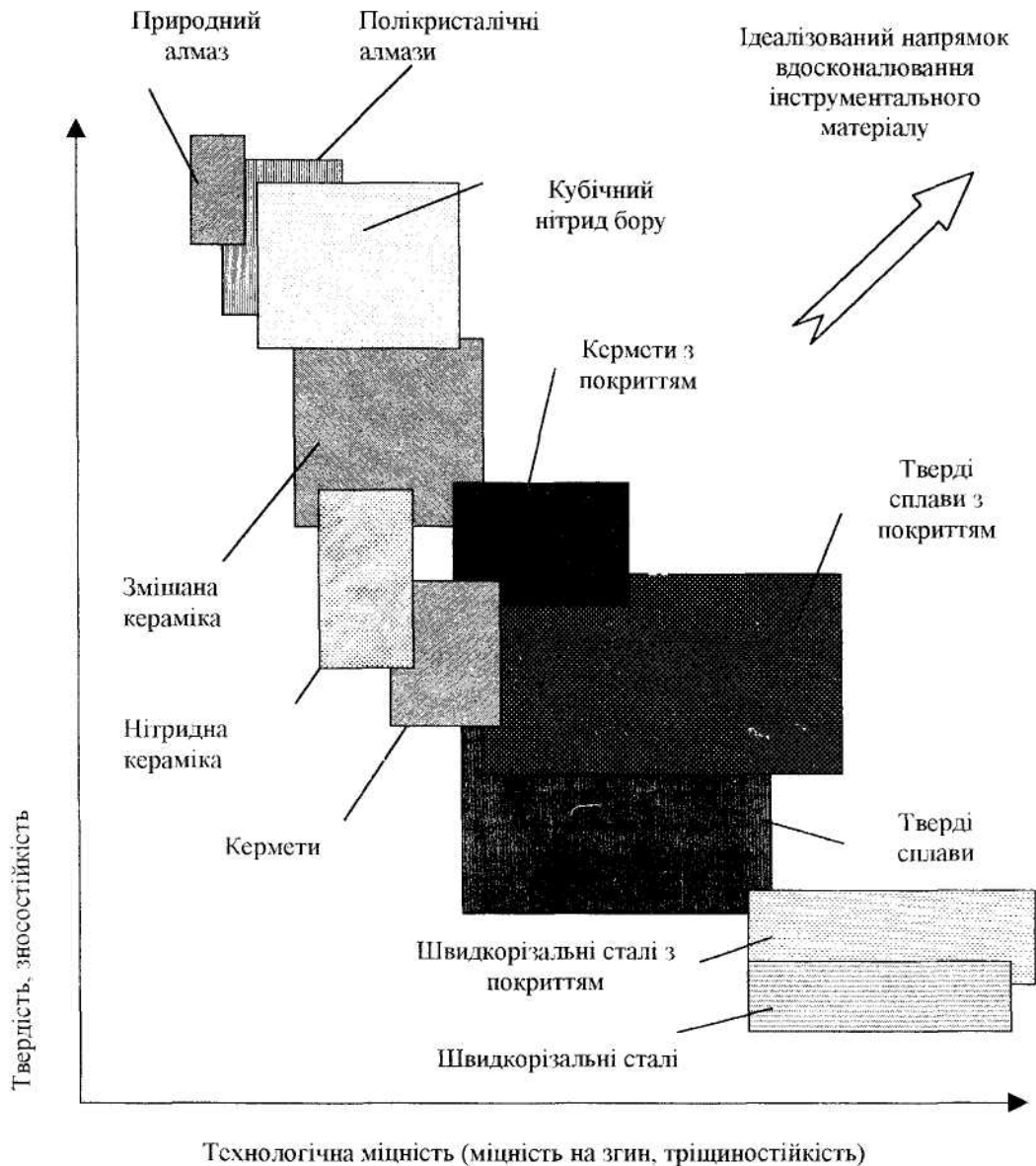


Рис. 2. Ранжування експлуатаційних властивостей інструментальних матеріалів

Нині основу інструментальних матеріалів становлять швидкорізальні сталі й тверді сплави. Частка їх у загальному споживанні інструментальних матеріалів у металообробних галузях промисловості Білорусі, Росії, інших пострадянських країн, а також лідерів світової економіки складає 88–92 %. У Німеччині в 2000 р. частка твердосплавного інструмента складала близько 65 % в обсягах продажу [4]. Але у світовій практиці за останнє десятиліття намітилось стійке зростання використання інструментів з кераміки і полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) на основі алмаза і кубічного нітриду бору (КНБ). Це обумовлено збільшеними обсягами застосування в авіації, тракторо-, автомобіле- і двигунобудуванні кольорових сплавів, композитів й інших високоміцних матеріалів, а отже, і необхідністю підвищення ефективності їхньої обробки. Аналіз показав, що важливою перевагою інструментальних матеріалів на основі ПНТМ є широкий діапазон варіювання експлуатаційних властивостей за рахунок зміни хімічного і гранулометричного складів, модифікування та регулювання режимів пресування і спікання.

Оцінку ефективності ПНТМ за різних умов контактної взаємодії, що моделюють процеси при різанні, виконували на програмно-апаратному комплексі ПД1, що дозволяє досліджувати кінетику зміни коефіцієнта і сили тертя в реальному масштабі часу.

Інструмент і оброблювану деталь можна розглядати як пару тертя [6], на роботу якої впливають швидкість відносного ковзання, сили, що виникають у зоні різання, фізико-механічні властивості як оброблюваного, так й інструментального матеріалів, фізико-хімічні процеси в зоні різання, а також ряд інших факторів. Хоча процеси тертя при металообробці й трибодослідженнях мають різний характер через неадекватність силових і температурних умов, результати трибодосліджень можуть бути застосовані для оптимізації процесів різання [7].

Для запобігання інтенсивного мікрорізання в зоні контакту в процесі трибологічних досліджень була застосована схема контактування «нерухома сфера–обертювий диск». Індентор виготовлявся з ПНТМ марок композита 01, композита 02 і киборит з радіусом сфери R20 мм. Диски діаметром 80...100 мм виготовлялися із загартованих сталей 40X (HRC<sub>e</sub> 38–40), сталі 45 (HRC<sub>e</sub> 48–50), ХВГ (HRC<sub>e</sub> 58–60), ШХ15 (HRC<sub>e</sub> 60–62), Р6М5 (HRC<sub>e</sub> 62–64), високоміцного чавуну (HB 280–310) і алмазомісткого композита АС15–50 % на зв'язці М2–01. Швидкість відносного ковзання в інтервалі 20–180 м/хв змінювалася безступінчасто, що дозволяло проводити серію дослідів без переполірування і переустановки зразків. Навантаження на зразок варіювалися в межах 1–10 Н. Трибологічні дослідження проводилися на режимах сухого тертя і з введенням у зону контакту ЗОТС (Аквол, олеїнова кислота тощо). У процесі дослідження у реальному масштабі часу фіксувалися значення коефіцієнта тертя і температури індентора поблизу зони контакту.

У процесі дослідження установлена немонотонна зміна коефіцієнта тертя в часі. При цьому виділяються три характерні зони: 1 – зона припрацювання, 2 – зона різкого збільшення коефіцієнта тертя, 3 – зона стабілізації. Зміна коефіцієнта тертя в часі супроводжується зафіксованими змінами механофізики процесу. Також змінюються і хімічні явища в зоні тертя. На поверхнях доріжки тертя фіксується утворення оксидів заліза Fe, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Оксиди, що утворилися, активно видаляються із зони контакту на бічні поверхні доріжки тертя, однак процес у часі супроводжується флуктуацією значень коефіцієнта тертя в межах 3–15 % від середнього значення.

У дослідях зазначається, що процес тертя інденторів з ПНТМ по сталях ХВГ і ШХ15 супроводжується інтенсивним високочастотним звуком на всьому діапазоні швидкостей ковзання. Дане явище може бути викликане особливостями структури цих сталей у загартованому стані. На доріжках тертя також очевидні значні центри схоплювання.

Залежність коефіцієнта тертя від швидкості  $\mu = f(V)$  має екстремальний характер для всіх пар тертя. Максимум залежності для досліджуваних пар тертя спостерігається в діапазоні швидкостей тертя 75–100 м/хв. Виконані дослідження показали, що ефективно керувати процесами різання дозволяють отримані під час трибологічних досліджень залежності сил і коефіцієнта тертя від умов навантаження і швидкості відносного ковзання.

Показано, що трибологічні дослідження дозволяють визначити оптимальну суміш інструментального та оброблюваного матеріалів, що забезпечує підвищення продуктивності обробки і якості сформованого поверхневого шару.

Дедалі більш широке застосування в промисловості нових високоміцних і композиційних матеріалів, супроводжуване вдосконаленням верстатного парку, зростаючими вимогами до підвищення продуктивності процесів механічної обробки висуває високі вимоги і до найменшого за габаритами і в той же час до самого навантаженого і швидкозношуваного елемента технологічної системи – інструмента. Особливо зростає роль інструмента, його надійності в автоматизованому виробництві й при обробці складних і дорогих деталей. Важливу роль у цьому питанні відіграє також оцінка показників стійкості і надійності інструмента на стадії проектування технологічного процесу. Зазначений результат може бути досягнутий шляхом проведення традиційних стійкісних досліджень, а також впровадженням в системи автоматизованого проектування техпроцесів з вивіреними алгоритмами і базами даних з розрахунків режимів різання і геометрії інструмента. Значний резерв у підвищенні надійності інструмента, закладений у процедурах сертифікації як самого інструмента, так і процесу його виробництва. Виконані дослідження, розроблені нормативно-методичні документи і проведені технічне оснащення дозволили організувати у ФТІ НАНБ випробовувальний центр, атестований у Національній системі акредитації на компетентність і технічну незалежність

(атестат ВУ/112.02.1.0.0368). В даний час випробувальний центр оснащений розробленими і виготовленими в лабораторії ФНІЯ стендами для випробувань на безпеку алмазних і абразивних кругів діаметром від 125 до 1200 мм й іншим устаткуванням. Процедури випробувань і сертифікації інструментів за показниками безпеки, експлуатаційними показниками якості та працездатності регламентовані атестованими в системі Держстандарту РБ методиками. Технічне і нормативно-методичне оснащення центру, висока кваліфікація його співробітників у галузі створення й випробувань різальних інструментів дозволяють уже на нинішньому етапі проводити сертифікацію більшої частини алмазного і значної номенклатури лезового інструмента, застосовуваного підприємствами республіки. Проведені організаційні та методичні заходи щодо впровадження в процеси випробувань СТБ ДСТ Р51140 і СТБ ІСО/МЕК 17025-2001 дозволяють виконувати дослідження на світовому рівні, гармонізувавши процедури відповідно до вимог ІСО 9001. ФТІ також здійснює виготовлення і пряме постачання стендів для кругів діаметром 125–1200 мм. Стенди відрізняються надійністю конструкції, низькою метало- й енергоємністю, простотою керування. За умовами замовника проводиться модернізація та адаптація стендів.

Аналіз стану справ у даній галузі показав, що сертифікація, зокрема інструмента, забезпечує підвищення безпеки, технічного рівня і конкурентоздатності продукції, дозволяє захистити ринок від несумлінних виробників і продавців. Рух по шляху «один стандарт – одне випробування, визнане всюди» дозволяє виробникам більш ефективно просувати на міжнародні ринки свою продукцію. Оцінка відповідності, виконувана на етапі сертифікації, допомагає забезпечити довіру між виробниками і споживачами, будучи надійним засобом підтвердження вимог до якості, експлуатаційних характеристик та інших параметрів товарів і послуг.

Таким чином, намічено шляхи підвищення ефективності обробки висококомірних і композиційних матеріалів за рахунок застосування нових кінематичних схем різання та оптимізації режимів різання. Показано, що оптимальною галуззю застосування ротаційного інструмента є обробка висококомірних матеріалів із твердістю до 50–52 HRC<sub>e</sub> із забезпеченням значень шорсткості оброблених поверхонь R<sub>a</sub> < 2,5 мкм на подачах 0,15–0,25 мм/об. Оптимальна область застосування інструментів із КНБ – високошвидкісна обробка загартованих сталей твердістю 40–65 HRC<sub>e</sub> і чавунів у різному стані. Підвищення ефективності застосування ПНТМ може бути досягнуто за рахунок оптимізації умов їхньої роботи на стадії трибологічних досліджень.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Коновалов Е.Г., Сидоренко В.А., Соусь А.В. Перспективные схемы ротационного резания металлов. – Мн.: Наука и техника, 1972. – 272 с.
2. Ящерицын П.И., Борисенко А.В., Дривотин И.Г., Лебедев В.Я. Ротационное резание материалов. – Мн.: Наука и техника, 1987. – 229 с.
3. Лебедев В.Я. Разработка и внедрение технологических процессов ротационной обработки деталей с прерывистыми поверхностями: Автореф. дис...к.т.н. – Минск. – 1989. – 18 с.
4. Branche Provisionswerkzeuge fast komplett auf der EMO vertreten.-VDI-Z: Integr. Prod. 2001. – 143.Spec. № 3. – S. 6–8.
5. Бельский С.Е., Тофпенев Р.Л. Структурные факторы эксплуатационной стойкости режущего инструмента. – Минск.: Наука и техника, 1984. – 224 с.
6. Коломиец В.В., Тимофеев П.В. Изучение трения поликристаллических сверхтвердых материалов с закаленными сталями // Синтетические алмазы. – Вып.3. – 1977. – С. 27–31.

ЛЕБЕДЕВ Володимир Якович – кандидат технічних наук, завідувач лабораторії ДНЗ «Фізико-технічний інститут НАН Білорусі».

Наукові інтереси:

- технологічне забезпечення якості деталей машин механічною обробкою різання;
- алмазно-абразивні і лезові інструменти з надтвердих матеріалів: виготовлення, дослідження і сертифікація.

Подано 11.08.2003