

МЕХАНІЗМ ЗНОШЕННЯ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ НА ОСНОВІ cBN ПРИ ТОЧІННІ ЗНОСОСТІЙКИХ ВИСОКОХРОМИСТИХ ЧАВУНІВ

К. О. Дядюра, А. С. Юнак, А. Д. Погребняк, В. О. Охріменко

*Сумський державний університет,
Україна, м. Суми*

Надійшла до редакції 24.05.2015

Проведено дослідження механізму зношення різальних інструментів із cBN при механічній обробці зносостійкого чавуну марки ІЧ210Х30Г3 для визначення раціональних умов формування фізико-механічних властивостей поверхневого шару цього матеріалу. Результати отримані за допомогою оптичної, скануючої електронної мікроскопії, а також енергодисперсійної спектроскопії. Зношення по задній і передній поверхні були основними видами зношення в досліджуваному діапазоні швидкостей різання. Адгезія і стирання були основними механізмами зношення при швидкостях різання від 39 м/хв.

Ключові слова: зносостійкий чавун, механічна обробка різанням, інтенсивність зношування, cBN, ресурс інструменту.

МЕХАНИЗМ ИЗНОСА РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ НА ОСНОВЕ cBN ПРИ ТОЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ ЧУГУНОВ

К. А. Дядюра, А. С. Юнак, А. Д. Погребняк, В. А. Охрименко

Проведено исследование механизма износа режущих инструментов из cBN при механической обработке высокопрочного чугуна марки ИЧ210Х30Г3 для определения рациональных условий формирования физико-механических свойств поверхностного слоя этого материала. Результаты получены с помощью оптической, сканирующей электронной микроскопии, а также Энергодисперсионной спектроскопии. Износ по задней и передней поверхности были основными видами износа в исследуемом диапазоне скоростей резания. Адгезия и стирания были основными механизмами износа при скоростях резания от 39 м/мин.

Ключевые слова: износостойкий чугун, механическая обработка резанием, интенсивность изнашивания, cBN, срок службы инструмента.

WEAR MECHANISM CUTTING TOOLS BASED ON cBN TURNING OF DUCTILE IRON

К. А. Dyadyura, A. S. Yunak, A. D. Pogrebnyak, V. A. Okhrimenko

On the example machining cutting tools of cBN finish turning of ИЧ210Х30Г3 ductile iron with, the results of investigations of the mechanism of wear of the cutting inserts by optical, scanning electron microscopy as well as energy dispersive spectroscopy. Flank wear and crater wear were the main wear modes within in the studied of cutting speeds. Adhesion and adhesion induced abrasion were the main wear mechanisms at cutting speeds from 39 m/min.

Keywords: iron, machining, cBN, tool life, tool wear.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку промисловості постає питання вибору оптимальних технологій виробництва машин та продовження їх терміну служби, який би забезпечував необхідну техніко-економічну ефективність.

У науковому плані ця задача вимагає пошуку кореляції між властивостями матеріалу, умовами експлуатації і ресурсними характеристиками. Питання довговічності

поверхонь тертя, що знаходяться в умовах складного спектру руйнівних впливів, залишається найбільш актуальним об'єктом вивчення. Для його вирішення необхідні коректні, фізичні та розрахункові, моделі зношування, засновані на результатах теоретичних і експериментальних досліджень, кінетики пошкоджуваності і руйнування поверхневих шарів [1].

Відповідно до основних положень механіки технологічної спадковості, на

кожній стадії навантаження в поверхневому шарі виробу відбувається безперервне накопичення деформації і вичерпання ресурсу пластичності [2, 3]. Реалізація ідей технологічної спадковості дозволяє прогнозувати і контролювати експлуатаційні характеристики матеріалу на основі встановлення спадкових закономірностей формування параметрів структурного стану та фізичних властивостей деталей під дією навантажень. Оцінка кінетичних і енергетико-активаційних характеристик поверхневого шару матеріалу, модифікованого у процесі технологічної обробки, при різних видах і режимах, дозволяє обґрунтувати забезпечення ресурсних показників.

Зносостійкі високохромісті чавуну є одними з основних конструкційних матеріалів при виробництві деталей для особливих умов експлуатації, таких як інтенсивне абразивне і корозійне зношування. Дані матеріали володіють властивостями, аналогічними жаростійким сталям при більш низькій вартості. Зносостійкі високохромісті чавуну відносяться до важкооброблюваних матеріалів в машинобудуванні завдяки своїй високій твердості.

Проте їх широке використання обмежено через труднощі, пов'язані з механічною обробкою різанням. Варіювання вмісту хрому в чавунах призводить до утворення карбідів різних типів з металевою основою, що дозволяє використовувати ці чавуни для виготовлення деталей, що працюють у корозійних середовищах і при широкому діапазоні навантаження.

На даний час ведуться дослідження, щодо прогнозування надійності експлуатації деталей із зносостійкого чавуну залежно від режимів механічної обробки різанням [4, 5]. У більшості випадків складні деталі такі як робочі колеса, із зносостійкого високохромістого чавуну прагнуть виготовляти з мінімальним обсягом механічної обробки різанням, залишаючи невеликі припуски.

У цьому контексті, проводяться дослідження з метою розширити застосування різальних інструментів з кубічного нітриду бору (cBN) для чистових операцій при обробці зносостійких чавунів.

Зношення різальних інструментів, як правило, відбувається у результаті хімічного перетворення областей робочих поверхонь, що труться, пластичного змінення форми під впливом високих температур, втоми навантажених поверхонь, абразивних і адгезійних дій, крихкого руйнування. Наведені види зношування можна попередити за рахунок оптимізації параметрів режиму різання і правильного вибору інструментального матеріалу.

Промисловість зацікавлена у фундаментальному розумінні виникнення процесів зношення різальних інструментів на основі cBN при обробці зносостійких високоміцних чавунів. Хоча ці взаємодії є надзвичайно складними, їх розуміння дуже проблематичне, але воно може ефективно допомогти у підвищенні ефективності обробки різанням зносостійких високоміцних чавунів.

Метою даного є дослідження механізму зношення різальних інструментів з cBN на прикладі «борсиніту» [18] при обробці зносостійкого високо хромістого чавуну марки ИЧ210Х30Г3.

2. ТЕОРЕТИЧНИЙ ОПИС ДОСЛІДЖЕННЯ

Довговічність рухомих сполучень лімітує термін служби машин, а їх безвідмовність визначає техніко-економічну ефективність, а іноді і безпеку експлуатації. Тому методам оцінки фактичного стану деталей рухомих з'єднань і прогнозування їх ресурсних характеристик з метою запобігання аварійних відмов відповідальних вузлів та механізмів приділяється підвищена увага.

Відомо [6, 7], що основні явища при терті концентруються в тонкому приповерхневому шарі матеріалу. Науковий і практичний інтерес мають термодинамічні аспекти стану цього шару і зв'язок зношування з цим станом. У роботах [8, 9] показано, що будь-яку трибосистему слід розглядати як відкриту нерівноважну термодинамічну систему. У роботах [10, 11, 12] сформульований принцип вторинної дисипативної гетерогенності, згідно з яким у процесі тертя відбуваються явища структурної пристосованості (адаптації) контактуючих

матеріалів, при яких всі види взаємодії тіл локалізуються в тонкоплівковому об'єкті — вторинних структурах (ВС). У відповідності з цим принципом вторинні структури необхідні для розсіювання енергії при її переході із зони тертя у поверхні тіл, причому, розсіювання енергії повинно відбуватися з найменшою швидкістю приросту ентропії. Вторинні структури виконують захисні функції, обмежуючи поширення взаємодії всередині тіл тертя і знижуючи інтенсивність цієї взаємодії. Їх поява відповідає принципу Ле Шательє [8, 10].

При розробці рекомендацій щодо принципів раціонального вибору режимів механічної обробки різанням та застосування зносостійких інструментальних матеріалів розглянемо трибосистему «інструмент-оброблюваний матеріал». У вторинних структурах трибосистеми проходять наступні основні термодинамічні потоки: потік тепла, потік речовини, потік фізико-хімічних перетворень і потік додаткових впливів (застосування ЗОР, нестационарність режимів різання тощо).

У роботі [13] показано, що якщо механічна енергія тертя є єдиним джерелом зміни виробництва ентропії, термодинамічна система не втрачає стійкості. Для можливості проходження самоорганізації необхідно більше одного незалежних джерела дисипації енергії. Ними можуть бути хімічні реакції, що протікають не самовільно і ініційовані тертям [14, 15]. При температурах різання $T_{\text{хар}}$ (оптимальна температура для кожного стану трибосистеми «інструмент – оброблюваний матеріал», при якій інтенсивність зношування різального інструменту мінімальна) і вище на фрикційному контакті з'являються нові джерела дисипації енергії — хімічні реакції, що ініційовані тертям, з надлишковим виробництвом ентропії, частина якої може стати негативною величиною залежно від виду хімічних реакцій, які відбуваються. Розглянемо зміну виробництва ентропії одного з контактуючих тіл — різального інструменту.

У роботі [16] наведена наступна формула лінійної інтенсивності зношування, яка отримана з умови втрати термодинамічної

стійкості при терті і утворення дисипативних структур

$$J_h = \Gamma \frac{2 \cdot X \cdot k}{Y} \cdot \frac{\tau_m \cdot D_{cp}}{\lambda_{cp} \cdot T \cdot \rho}, \quad (1)$$

де X і Y — деякі частини механічної енергії тертя, які розсіюються у вигляді тепла і на формування потоку речовини (у процесі зношування); k — коефіцієнт пропорційності між масою зношених частинок і потоком ентропії; r — щільність речовини зношених частинок; λ_{cp} і D_{cp} — відповідно середні значення теплопровідності і коефіцієнта дифузії у вторинних структурах (припущення їх незалежності від швидкості різання); τ_m — міцність адгезійних зв'язків на зріз в умовах ковзного контакту; T — температура контакту.

Якщо у вторинних структурах трибосистеми «інструмент — оброблюваний матеріал» проходять у загальному випадку термодинамічні потоки тепла, речовини, фізико-хімічних перетворень і додаткових впливів, то зміна виробництва НД з часом буде дорівнює

$$\begin{aligned} \frac{d_i S}{dt} = & \frac{(f_m \cdot \rho_r \cdot V \cdot X)^2}{\lambda \cdot T^2} - \\ & - \left| f_m \cdot \rho_r \cdot V \cdot Y \cdot \frac{m_e}{D \cdot T} \right| \pm \\ & \pm \left| f_m \cdot \rho_r \cdot V \cdot Z \cdot \frac{V_x}{L_{11} \cdot T} \right| + J_B \cdot X_B, \quad (2) \end{aligned}$$

де, J_B — потік додаткових впливів; X_B — термодинамічна сила, що викликає потік додаткових впливів; L_{11} — коефіцієнт взаємодії сполучень; V — швидкість різання (ковзання); f_m — коефіцієнт тертя; ρ_r — питома нормальне навантаження; λ — теплопровідність; Y — деяка частина загального виробництва ентропії при терті, що витрачається на формування потоку речовини; Z — деяка частина механічної енергії тертя, що витрачається на фізико-хімічні перетворення в ВС.

Конкретизація величин J_B і X_B залежить від виду застосовуваних додаткових впливів. Ця складова виробництва ентропії у загальному випадку не залежить від характеристик тертя при фрикційному контакті.

Для прогнозованої адаптації поверхонь тертя і зниження інтенсивності зношування необхідно застосовувати інструментальні матеріали та зносостійкі покриття, що містять хімічні елементи і сполуки, здатні в певних умовах вступати у хімічну взаємодію з оброблюваним матеріалом та з навколишнім середовищем, створювати нерівноважні вторинні структури з від'ємним виробництвом ентропії. Додаткові дії на зону різання (застосування ЗОР, не стаціонарність елементів режиму різання тощо) повинні сприяти цьому.

У даній роботі наведені результати дослідження прогнозованої адаптації поверхонь тертя і зниження зношування інструментів за рахунок застосування інструментальних матеріалів, що містять хімічні елементи і сполуки, здатні у певних умовах тертя вступати у взаємодію з оброблюваним матеріалом та з навколишнім середовищем, створювати нерівноважні вторинні структури з від'ємним виробництвом ентропії і знижувати зношування.

3. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Для експериментальних досліджень використовувалися заготовки із зносостійкого високоміцного чавуну марки ИЧ210Х30ГЗ, хімічний склад яких наведений у табл. 1. Експеримент проводився на токарному верстаті з ЧПК моделі 16К20Т1 без ЗОР. Обробка заготовки здійснювалась з глибиною різання $t = 0,5$ мм, подачею $S = 0,25$ мм/об, швидкість різання варіювалась в діапазоні $V = 40-100$ м/хв. [19]. Для досліджень використовувався ріжучий інструмент на основі cBN марки «борсиніт», а саме пластини типу RNMN070300. Ріжучі пластини були розміщені під кутом $\gamma = -7^\circ$; $\alpha_0 = 7^\circ$ [18]. Обробка ріжучою пластиною проводилася до величини фаски зношення $h_z = 0,5$ мм по задній поверхні пластини.

У процесі досліджень було проаналізовано мікроструктуру та визначено твердість заготовки.

Для отримання мікроструктури досліджуваної заготовки (після шліфування) проводилося травлення 3 % розчином азотної кислоти в спирті, і тривало від 1–3 хвилин, до потемніння основи. Дослідження проводилося на металографічному мікроскопі НЕОРНОТ зі збільшенням у 500 разів.

Твердість заготовки ИЧ210Х30ГЗ визначалась за допомогою мікротвердоміра ПМТ-3 із навантаженням 980 Н і часом витримки 15 с.

Також було визначено топографію поверхні та хімічний аналіз заготовки, з використанням растрової електронної мікроскопії РЕМ-100УМ, який оснащений системою енергодисперсійного аналізу (EDS), що дало змогу провести локальний хімічний аналіз складу заготовки.

З метою визначення хімічних і фізичних взаємодій, що впливають на процес зношення та утворення фаски зношення в процесі обробки, було проведено хімічний аналіз та отримано знімки мікроструктури різальних пластини. Аналіз проводився з використанням растрової електронної мікроскопії РЕМ-100УМ, який оснащений системою енергодисперсійного аналізу (EDS).

Також визначено параметри фаски зношення на задній поверхні і отримано оптичні мікрофотографії за допомогою інструментального мікроскопу МБС 9.

Рентгендифракційні (XRD) дослідження структури матеріалу ріжучої пластинки дали змогу визначити природу фаз сполучення на границях між зернами cBN і Si_3N_4 . Дослідження проводилися на автоматизованому дифрактометрі ДРОН-4-07. Система автоматизації ДРОН-4 заснована на мікропроцесорному контролері, який забезпечує управління гоніометром ГУР-9 і передачу даних у цифровому вигляді на ПК.

Таблиця 1

Хімічний аналіз чавуну марки ИЧ210Х30ГЗ, у %

Хімічний елемент	C	Cr	Fe	Mn	Інші
%	≈2,1	≈33,5	≈60,04	≈3,45	≈0,55

При зйомці використовувалося випромінювання $\text{CuK}\alpha$ (довжина хвилі 0,154 нм), фокусування по Бреггу-Брентано $\theta-2\theta$ (2θ — брегговський кут). Значення сили струму і напруги на рентгенівській трубці становили 20 мА і 40 кВ. Зйомка зразків проводилася в режимі безперервної реєстрації (швидкість — 1 м/хв), діапазон кутів 2θ від 10° до 60° . Експериментальні результати передавалися безпосередньо в програмний пакет підтримки експерименту DifWin-1 для попередньої обробки. Ідентифікація кристалічних фаз проводилася за допомогою картотеки JCPDS (Joint Committee on Powder Diffraction Standards).

Середній розмір кристалітів за Шерером розраховується за наступною формулою [17]:

$$L = \frac{K \cdot \lambda}{\beta_m \cdot \cos \theta},$$

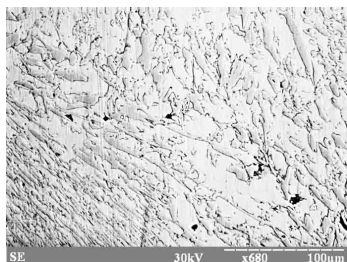
де K — безрозмірна константа, залежна від форми кристалітів (приймаємо $K = 1$), λ — довжина хвилі рентгенівського випромінювання, β_m — інтегральна ширина дифракційного профілю, фізичне розширення в якому відбувається лише через малі розміри ОКР, θ — кут дифракції.

Ідентифікація кристалічних фаз проводилася за допомогою програмного забезпечення Match! та використання бази даних Crystallography Open Database (COD).

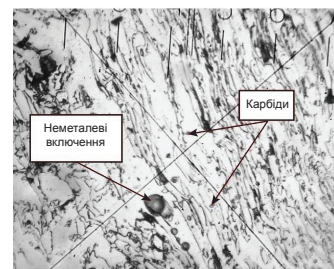
4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Характеристика заготовки

Матеріал ИЧ210Х30Г3, належить до евтектичних білих чавунів, являє собою сплав, у якому надлишковий вуглець, що не знаходиться в твердому розчині заліза, присутній у зв'язаному стані у вигляді карбідів заліза цементит-ледібуритного типу Fe_7C_3 .



а



б

Рис. 1. Фотографії чавуну марки ИЧ210Х30Г3: а) топографія поверхні на РЕМ-100УМ $\times 680$; б) фотографії на металографічному мікроскопі із збільшенням 500 раз

Аналізуючи мікроструктуру (рис. 1), можемо зробити висновок, що кристалізація білих чавунів відбувається за метастабільною системою з утворенням ледібуриту первинного та перліту. Структура матеріалу визначалася за відомим хімічним складом, проводилися розрахунки еквіваленту по хрому та нікелю, за діаграмою Шеффлера.

Аналіз зображень оптичних мікрофотографій показав наявність оксидів твердих карбідів, не металевих включень та наявність пор та раковин на поверхні зразка (рис. 1).

Твердість заготовки становить 634 HV (57 HRC).

4.2. Характеристика ріжучого інструменту на основі cBN

Ріжучі пластини з «борсиніту» мають розмір зерен приблизно 4–12 мкм, із вмістом cBN- Si_3N_4 приблизно 3 % від масової частки [18, 20].

Мікроструктура різальних інструментів із cBN марки «борсиніт» показали в основному наявність двох взаємопроникаючих безперервних фаз Si_3N_4 і cBN (рис. 2) XRD аналіз підтвердив наявність Si_3N_4 і BN (Boron Nitride) в якості основних фаз (рис. 3).

На рис. 3 наведена дифрактограма ріжучої пластини з «борсиніту». На дифрактограмах спостерігається ряд піків, які були ідентифіковані нами як відбиття від кристалографічних площин (101), (120) для гексагональної та (111), (020), (202), (311) кубічної фаз. Положення цих піків добре узгоджується з даними COD для BN та Si_3N_4 (картка № 96-900-8835, 96-901-3141 відповідно).

Як і очікувалося, основною фазою є BN. Крім BN, виявляється невелике кількість Si_3N_4 , про що сигналізує поява лінії (006) на

Розрахунок середніх розмірів кристалітів за Шерером

Індекс Міллера	Розмір кристалітів по Шеррер, нм
(111)	34,4
(200)	26,4
(220)	24,5
(311)	22,9

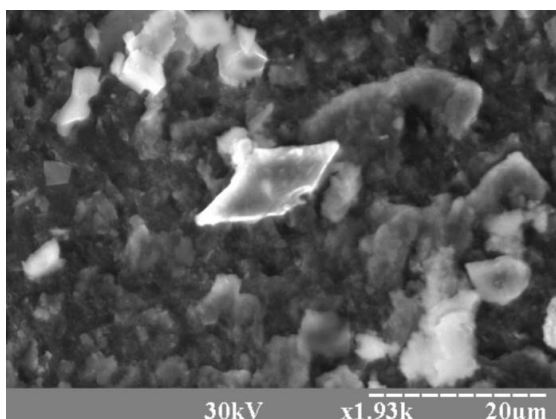


Рис. 2. Мікроструктура «борсиніта» різальних інструментів. Сіра фаза: сполучення Si_3N_4 . Темна фаза: cBN, PFM-100UM

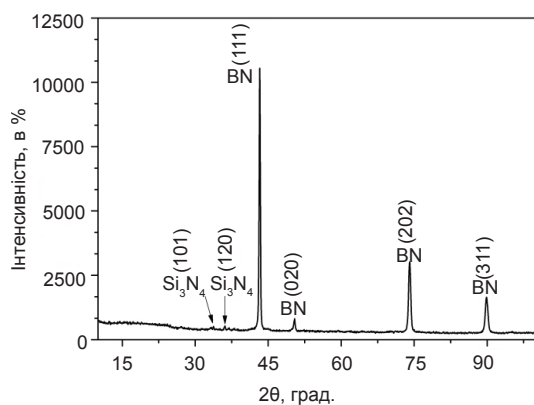


Рис. 3. Рентгенівська дифрактограма ріжучого інструменту на основі cBN «борсиніт», з використанням $\text{CuK}\alpha$ випромінюванням

куті $2\theta \approx 35^\circ$. По розширенню дифракційних ліній на малих кутах за формулою (1) було оцінено розміри областей когерентного розсіювання (ОКР).

4.3 Вплив швидкості різання на стійкість інструменту

Вплив швидкості різання на період стійкості інструменту і довжину різання різальних інструментів на основі cBN марки «борсиніт» при сухому чистовому точінні чавуна марки ИЧ210Х30ГЗ наведено в табл. 3 та на рис. 4.

У процесі дослідження було виявлено, що термін служби інструменту на основі cBN марки «борсиніт» збільшується із збільшенням швидкості різання, поки не досягне максимального значення, а потім термін служби інструменту починає зменшуватися. Причина цього може бути те, що кількість налиплого шару (на основі спостереження) зростає із збільшенням швидкості різання, що діє в якості захисної плівки для зменшення зношення інструменту, що призводить до збільшення терміну служби інструменту із збільшенням швидкості різання. Тим не менше, коли температура різання дуже висока через високу швидкість різання, шар на поверхні інструменту стає м'якшим. У таких умовах,

Стійкість і довжина різання різальних пластин з «борсиніту»

Швидкість різання, м/хв	Період стійкості, хв	Довжина різання, м
39	13,66	532,91
55	9,69	532,91
69	7,72	355,28
78	22,77	1776,38
97	21,98	2131,66

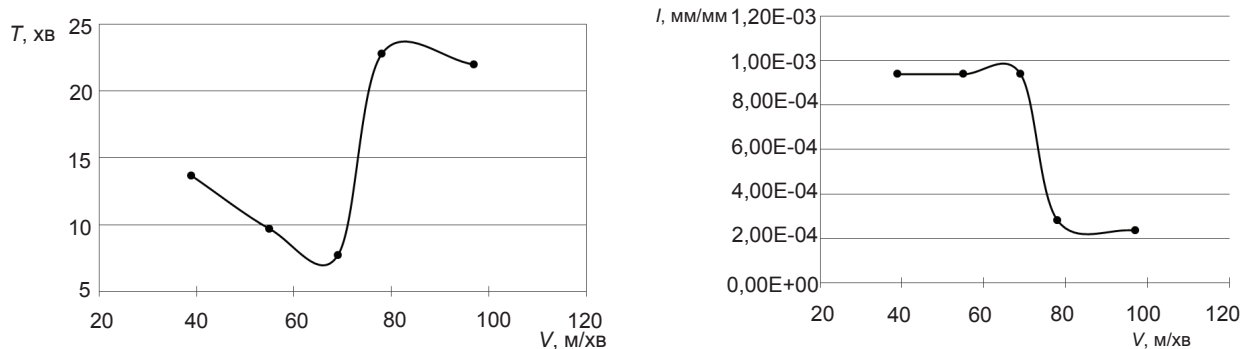


Рис. 4. Графік залежності між швидкістю різання V та періодом стійкості T ріжучої пластини (при обробці чавуну ІЧ210Х30ГЗ, $t = 0,5$ мм, $S = 0,25$ мм/об)

він може легко стирається від твердих частинок з оброблюваного матеріалу, а також зношення інструменту прискорюється. Після цього, термін служби інструментів на основі кубічного нітриду бору швидко буде скорочуватися.

4.4. Відмова різальних інструментів на основі cBN «борсиніт»

Хімічний аналіз передньої поверхні ріжучої пластини, що використовувалася при обробці зі швидкістю 69 м/хв (рис. 5), показує наявність шару Mn і яскраво виражену концентрацію Fe, Cr (табл. 4).

З метою вивчення механізмів зношення різальних пластини, що використовувалися в експериментальних дослідженнях, розглянуто фотографії (рис. 5, 6) на яких показано зношення по задній і передній поверхнях ріжучої кромки, при обробці зі швидкістю різання 69 м/хв.

Аналізуючи робочу частину інструменту, можна виділити дві зони інтенсивного зростання зношення задніх поверхонь: перша прилягає до вершини різця, а друга, приблизно, до середини задньої поверхні пластини.

Вивчення фотографій показали, що саме в другій зоні найбільш інтенсивно відбувається зношення. В той час як на передній поверхні відбувається налипання чавуна (рис. 5). Оброблюваний метал

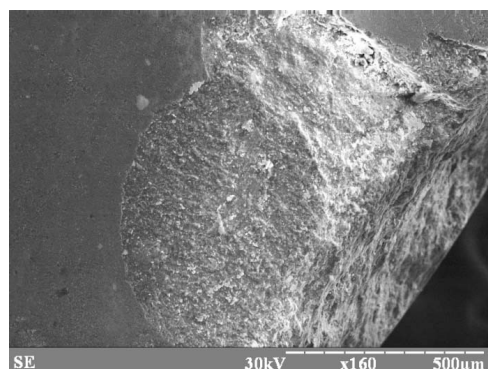
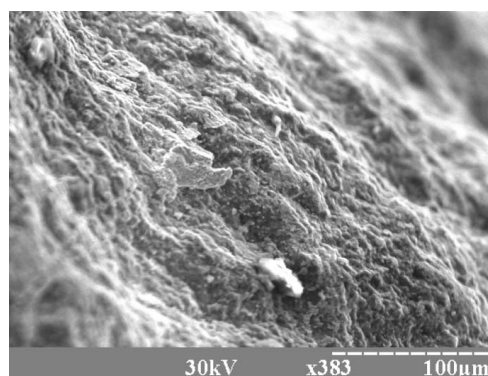


Рис. 5. Передня поверхня ріжучої пластинки при обробці зі швидкістю 69 м/хв

на зношеній поверхні різця знаходиться у вигляді відносно невеликих часток. Частинки оброблюваного металу виявлені на передній поверхні ріжучих пластин при роботі зі швидкостями різання 69–78 м/хв.

У процесі досліджень було виявлено, пошкодження різальних пластин у всьому діапазоні швидкостей різання, в основному

Таблиця 4

Хімічний аналіз поверхні різальної пластинки після обробки

Хім. ел.	Al	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	W	
%	30,411	3,003	1,787	0,433	0,173	0,995	22,324	38,364	2,509	100

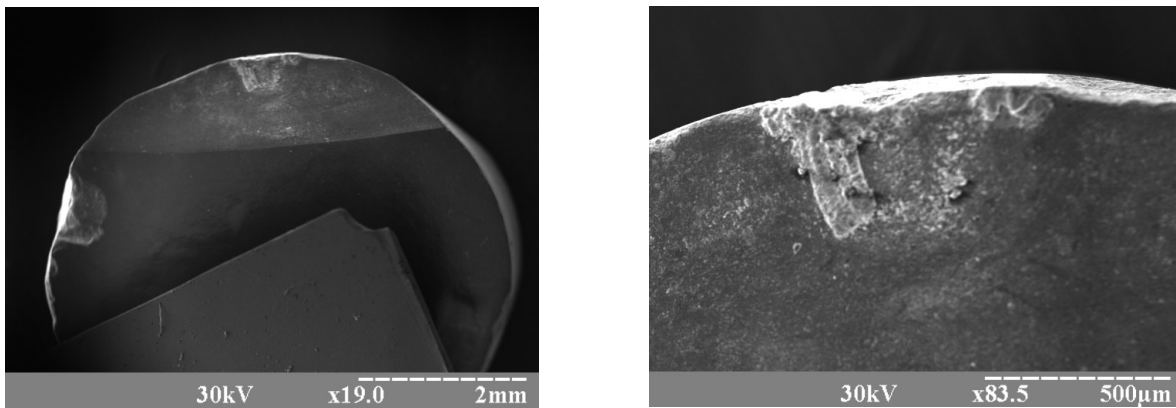


Рис. 5. Лист 2. Передня поверхня ріжучої пластинки при обробці зі швидкістю 69 м/хв

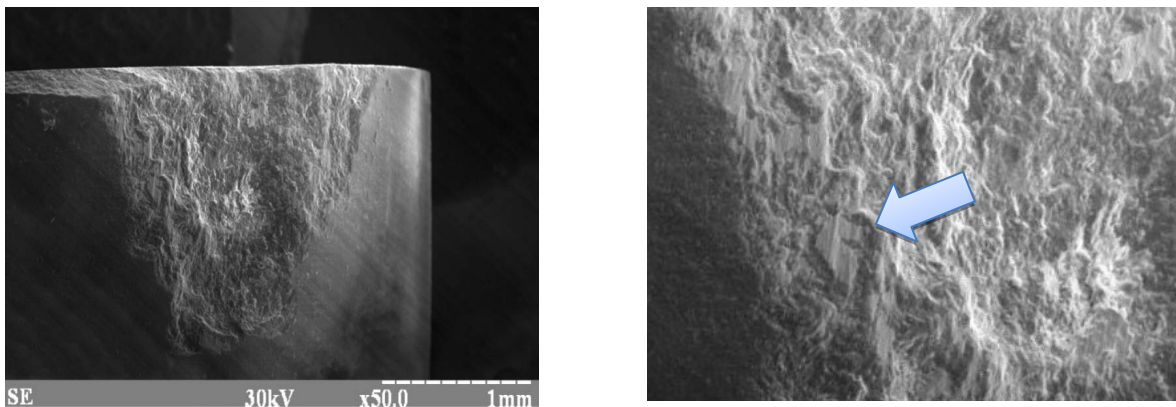


Рис. 6. Зношення ріжучої пластини по задній поверхні

у вигляді зношення по задній поверхні, початок руйнування поверхні пластини помітний вже на швидкості різання 39 м/хв.

Знімки зроблені за допомогою РЕМ (рис. 6) дають можливість визначити сліди абразивних пазів (рис. 6б), що є типове для абразивного зношення. Причиною цього явища може бути те, що зв'язка інструментального матеріалу стирається твердими частинками карбиду, що входять до складу заготовки, це в свою чергу призводить до відділення зерна cBN від матеріалу.

ВИСНОВКИ

На підставі проведених експериментальних досліджень можна зробити наступні висновки:

1. Основним механізмом зношення для різальних пластин на основі cBN «борсиніт» є стирання сполучного матеріалу твердими частинками карбиду заготовки з ИЧ210Х30ГЗ, також встановлено абразивний характер зношення.

2. Збільшення терміну служби інструменту зі збільшенням швидкості різання, для

різальних пластин на основі cBN «борсиніт», можливе за рахунок наявності захисного шару, сформованого на ріжучій кромці інструменту. Однак, зі збільшенням швидкості різання і, відповідно, температури різання, шар на поверхні інструменту починає плавитися, що призводить до абразивного стирання твердими частинками оброблюваного матеріалу, що в свою чергу призводить до прискореного зношення інструменту.

3. Встановлено, що при швидкості різання $V = 69-78$ м/хв стійкість різальної пластини максимальна при обробці зносостійкого високохромистого матеріалу ИЧ210Х30ГЗ.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ибатуллин И. Д. Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография — Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2008. — 387 с. — (ил.).
2. Кречетов А. А. Функциональная модель технологического наследования наноструктурированного состояния поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла деталей машин // Упрочняющие технологии и покрытия. —

2009. — № 12. — С. 10–15.
3. Витязь П. А. Технологические и эксплуатационные методы обеспечения качества машин — Минск: Беларус. навука, 2010. — 109 с.
 4. Katuku K., Koursaris A., Sigalas I.: Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 5, Mar 1, 2009, p. 2412–2420.
 5. Abele E., Sahm A., Schulz H. Wear Mechanism When Machining Compacted Graphite Iron, *Annals of the CIRP*, Vol 5, 51/1, 2002.
 6. Fox-Rabinovich G. Evolution of self-organization in nano-structured PVD coatings under extreme tribological conditions // *Applied Surface Science*, 2014, Vol. 297. — P. 22–32.
 7. German S. Fox-Rabinovich Tribofilm Formation As a Result of Complex Interaction at the Tool/Chip Interface during Cutting // *Lubricants* 2014, 2(3). — P. 113–123.
 8. Fox-Rabinovich, G. S. Adaptive hard coatings design based on the concept of self-organization during friction. In *Encyclopedia of Tribology*; Wang, Q. J., Chung, Y. -W., Eds.; Springer: London, UK, 2013. — P. 16–23.
 9. Бершадский Л. И. Структурная термодинамика трибосистем — Киев: Знание, 1990. — 253 с.
 10. Костецкий Б. И. Поверхностная прочность материалов при трении — Киев: Техника, 1976. — 26 с.
 11. Гершман И. С. Реализация диссипативной самоорганизации поверхностей трения в трибосистемах // *Трение и износ*. — 1995. — Т. 16, № 1. — С. 61–70.
 12. Иванова В. С. Структурная приспособляемость при трении как процесс самоорганизации // *Трение и износ*. — 1997. — Т. 18, № 1. — С. 74–79.
 13. Гершман И. С. Разработка износостойких материалов с помощью методов неравновесной термодинамики на примере скользящих контактов: дис. докт. техн. наук: 05.02.01, 05.02 / Гершман И. С. — Москва, 2006. — 234 с.
 14. Хайнике Г. Трибохимия — Москва: Мир, 1987. — 582 с.
 15. Булгаревич С. Б. Термодинамические характеристики несамопроизвольных химических реакций, инициируемых трением / Сб. трудов 3 Междунар. семинара «Контактное взаимодействие и сухое трение» / С. Б. Булгаревич М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. — С. 60–67.
 16. Мигранов М. Ш. Термодинамический анализ адаптации поверхностей трения при резании металлов // *Вестник УГАТУ*. — 2009. — № 4. — С. 20–23.
 17. Cullity B. D. *Elements of X-ray Diffraction*, 2-nd edn, pp. 284 and 366. Addison-Wesley, Reading, MA, 1978.
 18. Сверхтвердые материалы. Получение и применение: В 6 т. / Под общей ред. Н. В. Новикова. — Т. 5: Обработка материалов лезвийным инструментом / Под ред. С. А. Клименко. — Киев: ИСМ им. В. Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ, 2006. — 316 с.
 19. Клименко С. А., Копейкина М. Ю. Концепция повышения износостойкости и производительности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ // *Процеси механічної обробки в машинобудуванні*. — 2009. — № 6. — С. 119–129.
 20. Залежність твердості чистих полікристалічних матеріалів кубічного нітриду бору від структурних параметрів // *ИСМ им. В. Н. Бакуля*. — 2011. — № 14. — С. 299–304.

LITERATURA

1. Ibatullin I. D. *Kinetika ustalostnoj povrezhdaemosti i razrusheniya poverhnostnyh sloev: monografiya* — Samara: Samarskij gos. tehn. un-t, 2008. — 387 p. — (il.).
2. Krechetov A. A. *Funkcional'naya model' tehnologicheskogo nasledovaniya nanostrukturirovanogo sostoyaniya poverhnostnogo sloya na stadiyah zhiznennogo cikla detalej mashin* // *Uprochnyayuschie tehnologii i pokrytiya*. — 2009. — No. 12. — P. 10–15.
3. Vityaz' P. A. *Tehnologicheskie i ekspluatatsionnye metody obespecheniya kachestva mashin* — Minsk: Belarus. navuka, 2010. — 109 p.
4. Katuku K., Koursaris A., Sigalas I.: Wear, cutting forces and chip characteristics when dry turning ASTM Grade 2 austempered ductile iron with PcBN cutting tools under finishing conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 5, Mar 1, 2009, p. 2412–2420.

5. Abele E., Sahm A., Schulz H. Wear Mechanism When Machining Compacted Graphite Iron, *Annals of the CIRP*, Vol 5, 51/1, 2002.
6. Fox-Rabinovich G. Evolution of self-organization in nano-structured PVD coatings under extreme tribological conditions // *Applied Surface Science*, 2014, Vol. 297. — P. 22–32.
7. German S. Fox-Rabinovich Tribofilm Formation As a Result of Complex Interaction at the Tool/Chip Interface during Cutting // *Lubricants* 2014, 2(3). — P. 113–123.
8. Fox-Rabinovich, G. S. Adaptive hard coatings design based on the concept of self-organization during friction. In *Encyclopedia of Tribology*; Wang, Q. J., Chung, Y. -W., Eds.; Springer: London, UK, 2013. — P. 16–23.
9. Bershadjskij L. I. *Strukturnaya termodinamika tribosistem* — Kiev: Znanie, 1990. — 253 p.
10. Kosteckij B. I. *Poverhnostnaya prochnost' materialov pri trenii* — Kiev: Tehnika, 1976. — 26 p.
11. Gershman I. S. *Realizaciya dissipativnoj samoorganizacii poverhnostej treniya v tribosistemah* // *Trenie i iznos*. — 1995. — Vol. 16, No. 1. — P. 61–70.
12. Ivanova V. S. *Strukturnaya prisposablivaemost' pri trenii kak process samoorganizacii* // *Trenie i iznos*. — 1997. — Vol. 18, No. 1. — P. 74–79.
13. Gershman I. S. *Razrabotka iznosostojkikh materialov s pomosch'yu metodov neravnovesnoj termodinamiki na primere skol'zjaschih kontaktov: dis. dokt. tehn. nauk: 05.02.01, 05.02* / Gershman I. S. — Moskva, 2006. — 234 p.
14. Hajnike G. *Tribohimiya* — Moskva: Mir, 1987. — 582 p.
15. Bulgarevich S. B. *Termodinamicheskie harakteristiki nesamoproizvol'nyh himicheskikh reakcij, iniciiruemyh treniem* / *Sb. trudov 3 Mezhdunar. seminara «Kontaktное взаимодействие и сухое трение»* / S. B. Bulgarevich M.: MGTU im. N. E. Bauman, 2005. — P. 60–67.
16. Migranov M. Sh. *Termodinamicheskij analiz adaptacii poverhnostej treniya pri rezanii metallov* // *Vestnik UGATU*. — 2009. — No. 4. — P. 20–23.
17. Cullity B. D. *Elements of X-ray Diffraction*, 2 edn, pp. 284 and 366. Addison-Wesley, Reading, MA, 1978.
18. *Sverhtverdye materialy. Poluchenie i primeneniye: V6 t.* / Pod obschej red. N. V. Novikova. — Vol. 5: *Obrabotka materialov lezviynym instrumentom* / Pod red. S. A. Klimenko. — Kiev: ISM im. V. N. Bakulya, IPC «ALKON» NANU, 2006. — 316 p.
19. Klimenko S. A., Kopejkina M. Yu. *Koncepciya povysheniya iznosostojkosti i proizvoditel'nosti instrumenta, osnaschennogo PSTM na osnove KNB* // *Procesi mehanichnoi obrobki v mashinobuduvanni*. — 2009. — No. 6. — P. 119–129.
20. *Zalezhnist' tverdosti chistih polikristalichnih materialiv kubichnogo nitridu boru vid strukturnih parametrov* // *ISM im. V. N. Bakulya*. — 2011. — No. 14. — P. 299–304.