

А.С. Манохін, к.т.н., с.д.
С.Ан. Клименко, к.т.н., с.д.
С.А. Клименко, д.т.н., проф.
М.Ю. Копейкіна, к.т.н., с.н.с.
Ю.О. Мельнійчук, к.т.н., с.н.с.
А.О. Чумак, к.т.н.
А.Г. Найдено, к.т.н.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля Національної академії наук України

Визначення стабільності процесу різання в умовах динамічного навантаження

Продемонстровано підхід до кількісного визначення стабільності процесу різання в умовах динамічного навантаження. З цією метою пропонується оцінювати часові ряди величин сили різання та визначати показник стабільності як функцію від точності прогнозу, що визначається величиною середньоквадратичної похибки відхилення (RSME) величин прогнозованих та експериментальних значень сигналу сили різання. Прогнозування залежності здійснюється з використанням машинного навчання на основі методу екстремального градієнтного прискорення (XGB). Практична значущість розробленої методики полягає у можливості надати кількісну оцінку стабільності процесу різання незалежно від стану різальної кромки інструменту, що може характеризуватися як рівномірним зношуванням, так і наявністю дефектів (мікротріщин, сколів) та макроруйнуванням.

Експериментальні значення сили сигналів різання отримано при обробці заготовки з загартованої сталі з повздожними пазами для імітації імпульсного динамічного навантаження на різальний інструмент з полікристалічним надтвердим композитом (PcBN) «Борсиніт». Фіксація значень сили різання здійснювалася з використанням динамометра УДМ-600 та АЦП ADA-1406. Встановлено, що значення RSME в діапазоні застосованих умов обробки ($v = 120\text{--}210$ м/хв; $S = 0,10\text{--}0,19$ мм/об; $t = 0,1\text{--}0,2$ мм) знаходилися в межах 40–60 Н. Оптимальні параметри режимів різання, що забезпечують стабільне різання в умовах динамічних навантажень відповідають умовам: повздожня подача інструменту $S = 0,10\text{--}0,12$ мм/об; глибина різання $t = 0,125\text{--}0,175$ мм; швидкість різання $v = 180\text{--}200$ м/хв при $RSME < 56$. Також показано, що використання інструменту з кутом нахилу різальної кромки $\lambda = 40\text{--}50^\circ$ практично виключає руйнування різця та підвищує стабільність процесу різання.

Ключові слова: різальний інструмент; сила різання; обробка з ударним навантаженням; стабільність процесу; машинне навчання; прогнозування; руйнування інструменту; зношування.

Актуальність теми. Визначення стабільності процесу різання в умовах динамічного навантаження є ключовим для забезпечення якості обробки, підвищення точності та збільшення довговічності інструментів. Динамічне навантаження під час різання обумовлюється коливаннями, що виникають через контакт інструменту і заготовки, що може призвести до зниження стабільності процесу, погіршення поверхні виробу та підвищення зношеності інструмента.

Методи визначення стабільності процесу різання зазвичай базуються на: аналізі спектра коливань (спектральний аналіз дозволяє виявити частотні компоненти коливань у процесі різання, що можуть впливати на стабільність процесу; якщо певні частоти наближаються до резонансних, це може означати небезпеку дестабілізації процесу); розрахунках частотного коефіцієнта стабільності (цей коефіцієнт визначає межу стабільності процесу різання залежно від частоти власних коливань системи «інструмент – заготовка»); використанні математичних моделей і симуляції (моделі, що описують процес динамічного різання, які дозволяють враховувати фізичні властивості матеріалів, швидкість подачі, глибину різання, жорсткість системи та інші параметри; такі симуляції можуть допомогти передбачити поведінку системи при різних умовах навантаження); використанні датчиків для моніторингу процесу в реальному часі (датчики віброприскорення та сили різання дозволяють отримувати дані про зміну навантаження та коливань; дані аналізуються для визначення моменту переходу в нестабільний режим різання, що дозволяє вжити заходів для стабілізації процесу).

При обробці в умовах динамічного навантаження, під яким розуміється насамперед різання з ударними імпульсами, обумовленими періодичними змінами товщини шару, що зрізується, досить часто спостерігається руйнування різального інструменту, що має вигляд як мікротріщини різальної кромки, так і сколів макрооб'ємів робочої ділянки інструменту. В таких випадках встановити розмір зносу інструменту, що найбільш часто використовується як критерій його працездатності, неможливо, адже характеристика досліджуваного параметра в цьому разі стає не кількісною (величина фаски зносу по задні

поверхні інструменту h_z), а якісною з точки зору поламки різця (так / ні). Але для вирішення завдань підвищення стійкості інструменту і оптимізації умов обробки із застосуванням математичних методів все ж необхідно мати для контрольованого параметра певні чисельні величини. Такою величиною може слугувати параметр, який характеризує стабільність процесу обробки, ознакою чого є сталість деякого параметра, що безпосередньо характеризує миттєвий стан системи інструмент – оброблюваний виріб – верстат та контактну взаємодію інструменту з виробом в зоні різання. До таких характеристик, значення яких можна фіксувати від приладів в кожен момент часу за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП), належать акустична емісія, віброприскорення, сила різання та ін. [1, 2].

А ось, наприклад, температура різання для цієї мети не підходить у зв'язку зі значною інерційністю даних при вимірах її величини термopарам, встановленими в інструменті.

У [3] при обробці тонкостінних конструкцій запропоновано використовувати зміну динамічної сили різання як параметр контролю стабільності процесу обробки. Сила різання відіграє важливу роль в аналізі динаміки обробки. При обрізанні тонкостінних конструкцій довжина виступу заготовки є дуже великою порівняно із традиційним процесом фрезерування, що може призвести до великої швидкості вібрації вздовж осі інструменту. Оскільки амплітуда швидкості вібрації заготовки порівнюється з амплітудою швидкості вібрації інструмента, викликаной обертовим рухом шпинделя, це впливає на відносну швидкість між інструментом і заготовкою, роблячи процес різання процесом косого різання.

Сила різання – це основна фізична величина, яка описує інформацію, пов'язану з обробкою, таку як знос інструменту, точність розмірів і якість поверхні деталей. Його точне передбачення має важливе значення для вивчення динаміки обробки. Основні моделі прогнозування сили різання включають емпіричну модель, числову модель, аналітичну модель, модель механічної сили та модель на основі штучного інтелекту [4]. Серед них модель сили найбільш широко використовується в аналізі процесу фрезерування. Основна увага моделі механічних сил була зосереджена на визначенні миттєвої товщини нерозрізаної стружки за різних умов різання. Простий та ідеальний випадок полягає в тому, щоб розглядати сліди точок на різальній кромці як кругові траєкторії зубів [5].

У [6] для аналізу сил різання було створено модель, що враховувала вплив руху подачі під час процесу різання на основі трохідаальної траєкторії зубів. Мацумура та ін. [7] створив аналітичну модель оцінки сили різання із врахуванням биття різця та оцінив вплив биття на силу різання шляхом моделювання. Автори роботи [8] проаналізували вплив радіального биття інструменту на силу фрезерування за трьох типів радіальної глибини різання.

Зазвичай моніторинг сили різання може бути складним процесом, оскільки для вимірювання сили зазвичай потрібне інвазійне обладнання. В [9] розроблено два нові методи оцінки сил різання в режимі реального часу на основі вимірювань вбудованим акселерометром. Один метод використовує машинне навчання, а інший використовує підхід на основі показників, заснований на фізичних даних, щоб створити модель, яка оцінює сили різання від прискорень. Оцінені сили з обох підходів порівнювали з даними про силу різання, зібраними під час різних операцій фрезерування на кількох верстатах.

Загалом модель PI фіксує рівні сили між трьома різальними зубами. Відповідно, модель можна використовувати в режимі реального часу для виявлення поломки зуба, а рівні сили між зубами можна використовувати для моніторингу биття кінцевої фрези. Навпаки, модель ML не фіксує варіації рівня сили для кожного зуба. Крім того, оскільки загальний рівень сили збільшується разом із подачею на зуб, модель PI фіксує це збільшення сили, тоді як модель ML не може цього зробити.

Діапазони сил, змодельовані PI та ML, можуть значно відрізнятися від вимірних діапазонів. Проте дані, змодельовані PI, дотримуються номінально лінійних трендів зі збільшенням подачі на зуб, що є перспективним для моніторингу та оптимізації процесу, тоді як тренди діапазонів сил, змодельованих ML, номінально не є лінійними.

У [10] представлено модель сили різання, що має три динамічні коефіцієнти сили різання, пов'язані з товщиною видаленої стружки, швидкістю та прискоренням відповідно. Коефіцієнти динамічної сили різання визначаються за допомогою контрольованих випробувань ортогонального різання за допомогою швидкого сервоприводу інструменту, що коливається на бажаній частоті для зміни фази між внутрішньою та зовнішньою модуляціями. Показано, що протягом зношування інструменту коефіцієнт демпфування процесу збільшується, що підвищує межу стійкості до розтріскування під час різання. Стійкість динамічного процесу різання до появи тріщин визначається за допомогою закону Найквіста і порівнюється з експериментальними результатами при низьких швидкостях різання.

У деяких роботах для визначення стабільності процесу обробки застосовують математичні підходи, наприклад [11]. Це дозволяє визначити найбільш впливовий фактор, від якого залежить стабільність процесу.

У той же час кількісні показники, які можуть характеризувати стабільності процесу різання, наведено у технічній літературі дуже обмежено.

Мета роботи – розробка методики кількісного визначення стабільності процесу різання в умовах динамічного навантаження та оптимізація режимів різання на основі встановлених показників.

Методика досліджень. Пропонується зазначений далі підхід для визначення критерію стабільності. Оскільки стабільний сигнал, що характеризує процес різання, наприклад, величина сили різання, має бути повторюваним у часі як за амплітудою, так і за періодом, то певно, що така залежність може бути достатньо точно прогнозована. Водночас, якщо після початку різання і початкової стабілізації контактних характеристик будуть відбуватися будь-які зміни геометричних параметрів різальної кромки інструменту, пов'язані з появою на ній дефектів або її руйнуванням, величина сили різання буде достатньо швидко змінюватися. Як наслідок, прогнозовані на основі вивчення попередньої (початкової) ділянки показники та реальні величини досліджуваного сигналу будуть різнитися. Ступінь їх відхилення приймемо за числову характеристику нестабільності процесу різання за даних умов.

Важливу роль відіграє спосіб прогнозування, оскільки його точність та здатність апроксимувати складну часову залежність, що має як детерміновану, так і стохастичну складові, фактично визначає можливість використання пропонованого підходу. Серед відомих алгоритмів ефективного прогнозування часових рядів можна вказати ARMA, ARIMA, Exponential Smoothing, XGB (Extreme Gradient Boost).

Gradient Boosting – це метод машинного навчання у вигляді лінійної адитивної моделі, що складається з ансамблю слабких моделей прогнозування. Для отримання повної моделі F потрібно здійснити M кроків. Модель F_m не буде оптимізована безпосередньо на кроці $m + 1$. В іншому випадку базова модель $h_{m+1}(x)$ буде навчена та обчислюватиме залишкову похибку $y - f(x_m)$ для прогнозовної моделі на кроці $m + 1$, наближаючись до значення y .

$$F_{m+1} = F_m + h_{m+1}(x).$$

Тому обчислення цільової функції перетворюється на те, як знайти $h_{m+1}(x) = F_{m+1} - F_m$. При цьому, як правило, від'ємний градієнт цільової функції використовується як нев'язка для вивчення базової моделі.

XGBoost – це реалізація Gradient Boosting, що поєднає кілька слабких класифікаторів у сильний класифікатор лінійним способом. XGBoost підтримує, як базові класифікатори CART, так і лінійні класифікатори, а також виконує розширення Тейлора другого порядку для функцій вартості, виражаючи більше інформації. З точки зору швидкості роботи, XGBoost підтримує паралельний вибір точок розділення, а навчання моделі займає набагато менше часу.

Основна ідея XGBoost полягає в тому, щоб постійно додавати слабкі дерева з різною вагою до набору. Дерева в наборі повинні якомога більше наближатися до залишків попереднього прогнозу, що виражається:

$$\hat{y}_i = \sum_{k=1}^K f_k(x_i), f_k \in F,$$

де $\hat{y}_i$ – прогнозоване значення, F – набір, що включає всі дерева регресії, f_k – одне з дерев регресії, і K – кількість дерев регресії.

Відповідно до з [12] кінцева цільова функція має вигляд:

$$Obj^{(t)} = \sum_{i=1}^n \left[g_i f_i(x_i) + \frac{1}{2} h_i f_i^2(x_i) \right] + \Omega(f_i),$$

де g_i та h_i є похідними першого та другого порядку кожної точки даних у функції помилки.

I_j є набором індексів вибірок на кожному листовому вузлі:

$$I_j = \{i | q(x_i) = j\}.$$

Експериментальні дослідження виконано під час точіння з ударом загартованої сталі ШХ15 (60–62 HRC). На заготовці діаметром 80 мм було виконано повздовжні пази 10×10 мм (5 шт.). Використаний інструмент оснащено PcbN групи ВН марки «Борсиніт».

Для оцінки точності прогнозування за допомогою моделі було використано еталонні набори даних, ними були масиви величини складової сили різання P_y , що відповідали чистовій обробці інструментом з PcbN групи ВН марки «Борсиніт», одним з напрямів використання якого є різання з ударним навантаженням. Оскільки руйнування за даних умов не спостерігалось і різальна кромка зберігала прямолінійність, записані діаграми сигналу демонструють достатню стабільність та відтворюваність. Для тренування моделі використовувалося 50 % вектора даних, інші 50 % – для порівняння з набором даних отриманим прогнозуванням. Фіксація миттєвих величин складових сили різання відбувалася за допомогою АЦП ADA-1406 з частотою до 10 кГц. Мінімальна довжина масиву даних, що використовувалася при моделюванні сигналу – 20000 точок.

Приклад порівняння реального та отриманого прогнозуванням сигналів наведено на рисунку 1. Кількісною характеристикою стабільності процесу різання є середньоквадратична похибка, що має місце при порівнянні цих сигналів, і для наведеного прикладу становить $RMSE = 40,2$ Н.

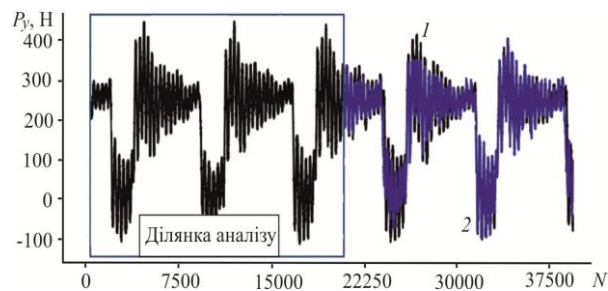


Рис. 1. Порівняння реального та отриманого прогнозуванням сигналів: 1 – отриманий при вимірюваннях сигнал, 2 – прогнозовані значення ($S = 0,05$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $v = 220$ м/хв, $\lambda = 30^\circ$)

Отримані результати досліджень. На рисунку 2 показано різальну кромку інструменту до та після проведення процесу різання. Як видно з цього рисунка, дефектів (сколів) немає, знос складає $h_z = 0,06$ мм ($S = 0,08$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $\lambda = 0^\circ$).

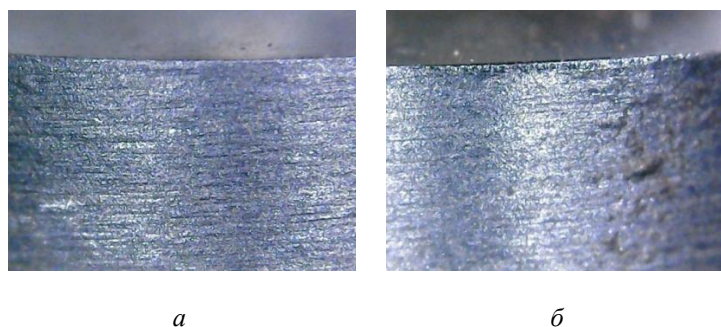


Рис. 2. Різальна кромка PcBN «Борсиніт»: а) – до обробки; б) – після 45 хв різання

На рисунку 3, а наведено загальний вид сигналу складової P_y , а на рисунку 3, б – ділянка сигналу після його стабілізації вибрана для тестування моделі (точки з діапазону $n = 6 \cdot 10^4 - 8 \cdot 10^4$). Рисунок 3 демонструє окремі імпульси складової сили різання, що виникають при обробці заготовки з повздовжніми пазами.

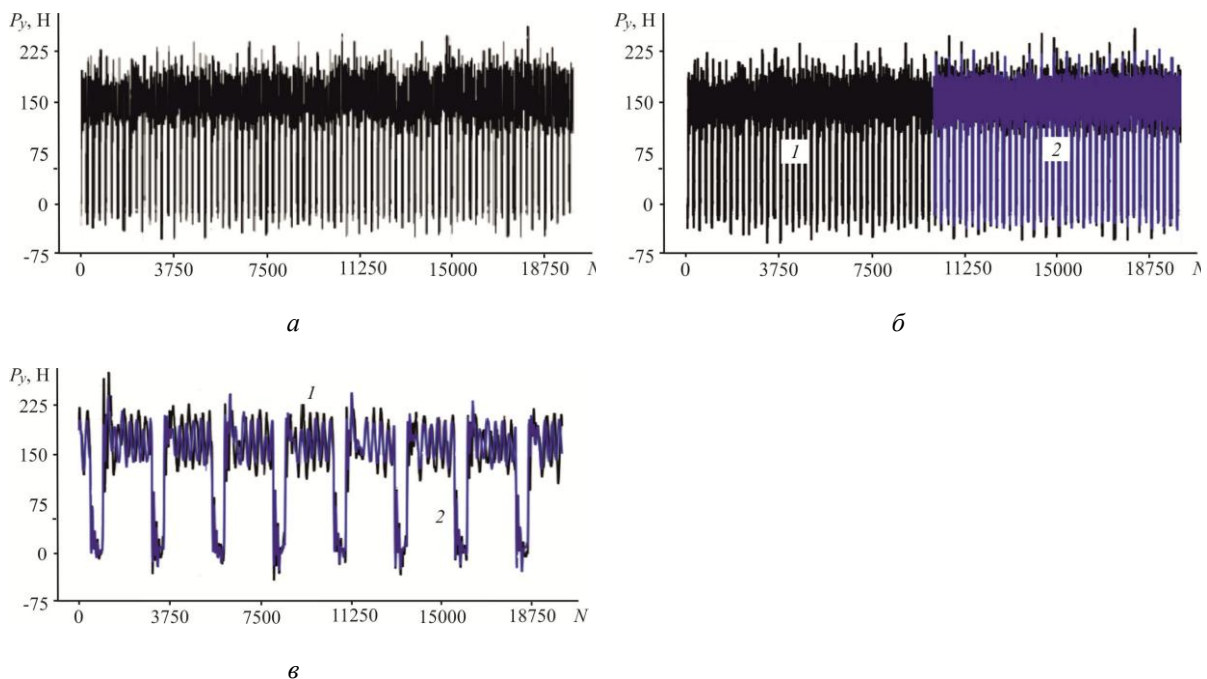


Рис. 3. Сигнал сили різання при стабільному процесі обробки: а) – загальний вид сигналу (10,5 с); б) – ділянка відліку (діапазон точок № 60–80 тис.), виділена для аналізу; в) – форма окремих імпульсів складової P_y сили різання

На рисунку 3 можна бачити загальний вигляд прогнозованої діаграми (відлік $1 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^3$) та порівняння форм прогнозованих та реальних імпульсів (останні 1200 точок). Оцінка якості прогнозу за коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,968$, за середньоквадратичною похибкою $RMSE = 42,7$, з чого можна зробити висновок про високу точність прогнозу.

Інший випадок. Різання на швидкості 120 м/хв, $S = 0,12$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $\lambda = 0^\circ$ супроводжується руйнуванням різця (рис. 4, а), що знаходить відображення на графіку сили різання (рис. 4, б). Для статистичного аналізу сигналу виділяється ділянка діаграми, що містить 20 тис. точок: 10 тис. вимірів до моменту руйнування для тренування моделі (діапазон $n = 17$ – 27 тис.) та 10 тис. точок для порівняння прогнозованих та експериментальних значень діаграми (діапазон $n = 27$ – 37 тис.) (рис. 4, в, г).

У випадку сколювання різальної кромки (рис. 5, а) $RMSE = 80,8$, при цьому результат розрахунку за регресійною моделлю $RMSE = 78,9$. Діаграми на рисунках 5, б–г характеризують руйнування інструменту за умов обробки з режимами $\lambda = 0^\circ$; $v = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм.

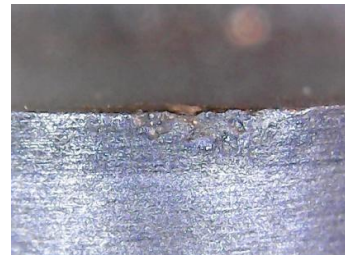
При $\lambda = 30^\circ$; $v = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм (рис. 6) для різальної кромки інструменту характерне викришування без макроруйнування, стабільність процесу різання за таких умов вища, а характеристика сигналу становить $RSME = 54,7$.

Збільшення кута нахилу різальної кромки приводить до зростання стабільності процесу різання та конструктивної міцності інструменту. На рисунку 7 показано приклад сигналу при $\lambda = 40^\circ$; $v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об; $t = 0,2$ мм, величина $RSME$ при цьому становить 53,2.

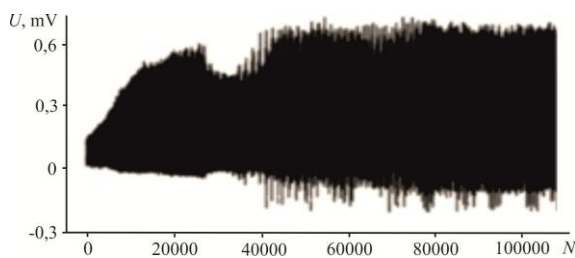
На поверхні відгуку залежності середньоквадратичної похибки $RSME$ прогнозування сигналу сили різання (рис. 8) можна виділити зони, що відповідають характерному стану контактних поверхонь різального інструменту: руйнуванню, викришуванню та стабільній роботі з рівномірним зношуванням по задній поверхні різця. Відповідні значення $RMSE$ становлять: $RMSE < 56$ – різальна кромка інструменту зберігає свою цілісність; $RMSE > 62$ – крихке руйнування композиту; $56 < RMSE < 62$ – мікровикришування різальної кромки інструменту.



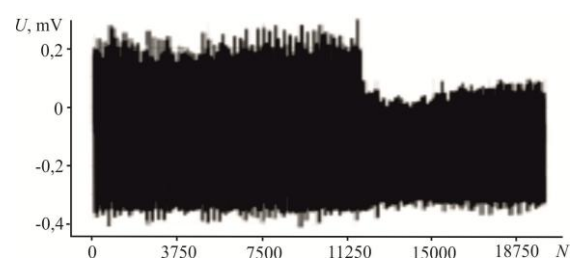
а



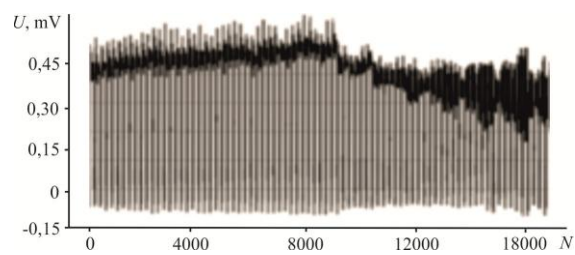
а



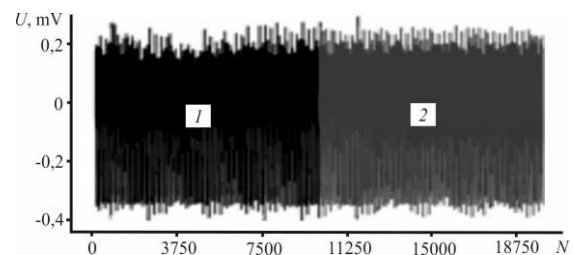
б



б



в



в

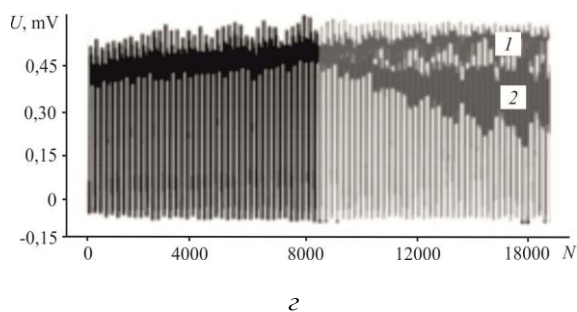


Рис. 4. Різальна кромка PcBN після руйнування інструменту (а), складова P_y сили різання при обробці з ударом: б – загальний вид сигналу; в – ділянка, що характеризує момент руйнування інструменту; г – порівняння прогнозованого та експериментального сигналів ($\lambda = 0^\circ$; $v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об; $t = 0,2$ мм) $RSME = 78,9$

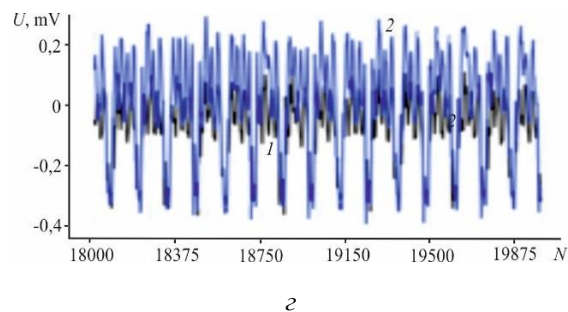


Рис. 5. Різальна кромка PcBN після руйнування інструменту (а), складова P_y сили різання при обробці з ударом: б – загальний вид сигналу; в – ділянка, що характеризує момент руйнування інструменту; г – порівняння прогнозованого та експериментального сигналів ($\lambda = 0^\circ$; $v = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм) $RSME = 63,6$ (1 – P_y ; 2 – прогноз)

З використанням результатів реалізації факторного плану експериментів Боксу – Бенкена отримана регресійна залежності середньоквадратичної похибки $RSME$ прогнозування сигналу сили різання від умов оброблення (коефіцієнт детермінації моделі $R^2 = 0,85$):

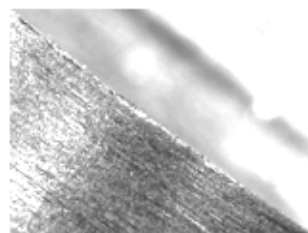
$$RMSE = 39,2 - 25,87 \cdot \lambda - 0,57 \cdot \lambda^2 + 17,57 \cdot S + 0,56 \cdot S^2 + 24,78 \cdot t + 1,53 \cdot t^2 - 2,75 \cdot v + 2,33 \cdot v.$$

Оптимізація умов різання за критерієм мінімуму параметра $RSME$ і максимізації при цьому функції бажаності Харингтона [13] з наближенням її значення до 1 дозволяє встановити такі оптимальні параметри режимів різання, що забезпечують стабільне різання в умовах оброблення з динамічним навантаженням: $\lambda = (40-50)^\circ$; $S = 0,1-0,12$ мм/об; $t = 0,125-0,175$ мм; $v = 180-200$ м/хв.

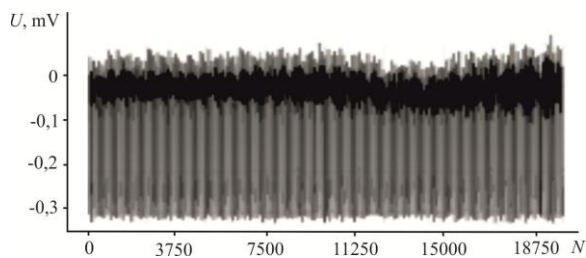
Висновки. На основі статистичної обробки даних щодо величини сили різання, що виникає при обробці загартованої сталі інструментами із PcBN з ударом, проведено оцінку стабільності процесу та оптимізовано умови різання. На поверхні відгуку залежності $RSME$ можна виділити зони, що відповідають характерному стану контактних поверхонь різального інструменту: руйнуванню, викришуванню та стабільній роботі з рівномірним зношуванням по задній поверхні різця. Відповідні значення $RMSE$ становлять: $RMSE < 56$ – різальна кромка інструменту зберігає свою цілісність; $RMSE > 62$ – крихке руйнування композиту; $56 < RMSE < 62$ – мікровикришування різальної кромки інструменту. Оптимізація умов різання за критерієм мінімуму параметру $RSME$ і максимізації при цьому функції бажаності Харингтона з наближенням її значення до 1, дозволяє встановити оптимальні параметри режимів різання, що забезпечують стабільне різання в умовах динамічних навантажень: кут нахилу різальної кромки $\lambda = 40^\circ-50^\circ$; повздовжня подача інструменту $S = 0,10-0,12$ мм/об; глибина різання $t = 0,125-0,175$ мм; швидкість різання $v = 180-200$ м/хв.



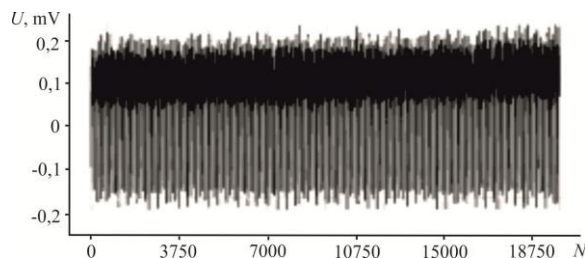
а



а



б



б

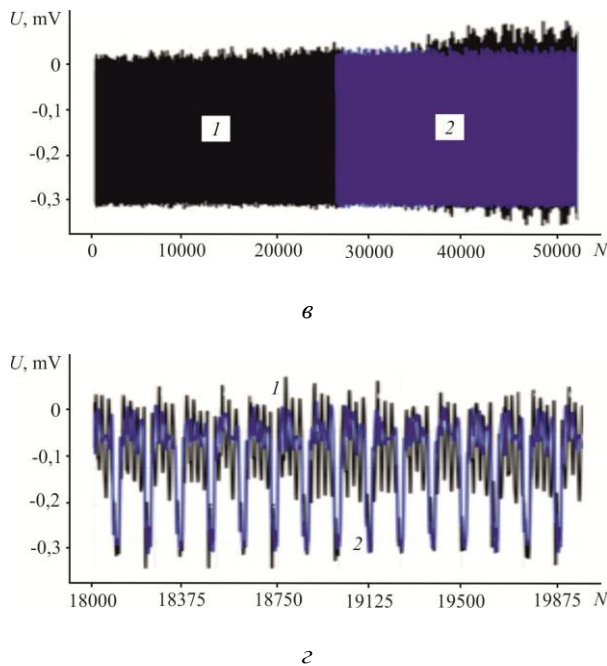


Рис. 6. Різальна кромка РСВН після руйнування інструменту (а), складова P_y сили різання при обробці з ударом: б – загальний вид сигналу; в – ділянка, що характеризує момент руйнування інструменту; г – порівняння прогнозованого та експериментального сигналів ($\lambda = 30^\circ$; $v = 120$ м/хв; $S = 0,12$ мм/об; $t = 0,2$ мм) $RSME = 54,7$

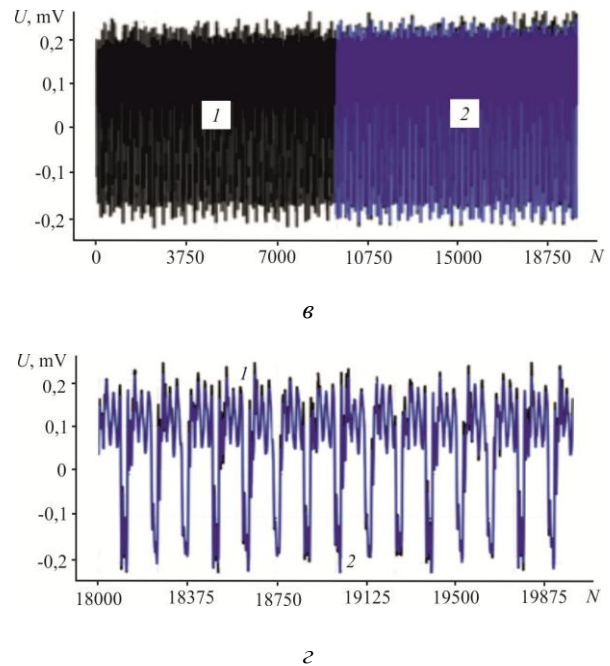


Рис. 7. Різальна кромка РСВН після руйнування інструменту (а), складова P_y сили різання при обробці з ударом: б – загальний вид сигналу; в – ділянка, що характеризує момент руйнування інструменту; г – порівняння прогнозованого та експериментального сигналів ($\lambda = 40^\circ$; $v = 120$ м/хв; $S = 0,19$ мм/об; $t = 0,2$ мм) $RSME = 53,2$

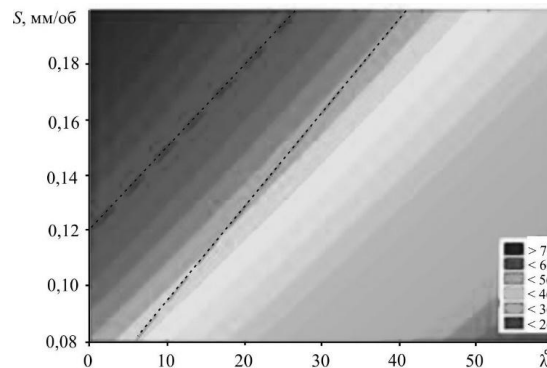


Рис. 8. Поверхня відклику залежності $RMSE$ від S та λ при $v = 120$ м/хв, $t = 0,2$ мм

Список використаної літератури:

1. Основи теорії різання матеріалів : підручник / М.П. Мазур, Ю.М. Внуков, А.І. Грабченко та ін. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с.
2. Залога В.А. Підвищення стабільності процесу різання шляхом зміни швидкості різання в процесі обробки / В.О. Залога, Р.М. Зінченко, Ю.В. Шаповал // Високі технології в машинобудуванні. – 2014. – Вип. 1 (24). – С. 59–70.
3. Modeling of dynamic cutting forces in thin-walled structures trimming / S.-L. Ma, T.Huang, X.-M. Zhang, H.Ding // Proc. CIRP. – 2023. – Vol. 117. – P. 151–156.
4. Recent advances in modelling of metal machining processes / P.J. Arrazola, T.Özel, D.Umbrello and other // CIRP Annals. – 2013. – Vol. 62, № 2. – P. 695–718.
5. Guiming Q. Research on Intelligent Technology of CNC Machine Tool Industrial Design / Q.Guiming // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1754, № 1.
6. Song Q.H. An Improved Tool Path Model Including Gyroscopic Effect for Instantaneous Cutting Force Prediction in High-Speed Milling / Q.H. Song, X.Ai // Adv. Mat. Res. – 2011. – Vol. 418–420. – P. 840–843.
7. Matsumura T. Cutting Force Model in Milling with Cutter Runout / T.Matsumura, S.Tamura // Proc. CIRP. – 2017. – Vol. 58. – P. 566–571.

8. Modeling study of milling force considering tool runout at different types of radial cutting depth / Y.Chen, J.Lu, Q.Deng and other // J. of Manuf. Proc. – 2022. – Vol. 76. – P. 486–503.
9. Vogl G.W. Cutting force estimation from machine learning and physics-inspired data-driven models utilizing accelerometer measurements / G.W. Vogl, Y.Qu, R.Eischens and other // Proc. CIRP. – 2024. – Vol. 126. – P. 318–323.
10. Altintas Y. Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping / Y.Altintas, M.Eynian, H.Onozuka // CIRP Annals. – 2008. – Vol. 57, № 1. – P. 371–374.
11. Khusainov R.V. Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using UNIGRAPHICS NX / R.V. Khusainov, I.F. Sharafutdinov // IOP Conf. Series : Mat. Sci. and Eng. – 2016. – Vol. 134.
12. Time series forecast of sales volume based on XGBoost / L.Zhang, W.Bian, W.Qu and other // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1873.
13. Волокита А.М. Основи теорії планування експерименту : навч. посіб. / А.М. Волокита, В.Л. Селіванов. – Київ : КПІ ім. І.Сікорського, 2022. – 41 с.

References:

1. Mazur, M.P., Vnukov, Yu.M., Hrabchenko, A.I. et al. (2020), *Osnovy teorii rizannia materialiv*, pidruchnyk, Novyi Svit-2000, Lviv, 471 p.
2. Zaloha, V.A., Zinchenko, R.M. and Shapoval, Yu.V. (2014), «Pidvyshchennia stabilnosti protsesu rizannia shliakhom zminy shvydkosti rizannia v protsesi obrobky», *Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni*, Issue 1 (24), pp. 59–70.
3. Ma, S.-L., Huang, T., Zhang, X.-M. and Ding, H. (2023), «Modeling of dynamic cutting forces in thin-walled structures trimming», *Proc. CIRP*, Vol. 117, pp. 151–156.
4. Arrazola, P.J., Özel, T., Umbrello, D. et al. (2013), «Recent advances in modelling of metal machining processes», *CIRP Annals*, Vol. 62, No. 2, pp. 695–718.
5. Guiming, Q. (2021), «Research on Intelligent Technology of CNC Machine Tool Industrial Design», *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1754, No. 1.
6. Song, Q.H. and Ai, X. (2011), «An Improved Tool Path Model Including Gyroscopic Effect for Instantaneous Cutting Force Prediction in High-Speed Milling», *Adv. Mat. Res.*, Vol. 418–420, pp. 840–843.
7. Matsumura, T. and Tamura, S. (2017), «Cutting Force Model in Milling with Cutter Runout», *Proc. CIRP*, Vol. 58, pp. 566–571.
8. Chen, Y., Lu, J., Deng, Q. et al. (2022), «Modeling study of milling force considering tool runout at different types of radial cutting depth», *J. of Manuf. Proc.*, Vol. 76, pp. 486–503.
9. Vogl, G.W., Qu, Y., Eischens, R. et al. (2024), «Cutting force estimation from machine learning and physics-inspired data-driven models utilizing accelerometer measurements», *Proc. CIRP*, Vol. 126, pp. 318–323.
10. Altintas, Y., Eynian, M. and Onozuka, H. (2008), «Identification of dynamic cutting force coefficients and chatter stability with process damping», *CIRP Annals*, Vol. 57, No. 1, pp. 371–374.
11. Khusainov, R.V. and Sharafutdinov, I.F. (2016), «Methods of assessing the dynamic stability of the cutting process using UNIGRAPHICS NX», *IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng.*, Vol. 134.
12. Zhang, L., Bian, W., Qu, W. et al. (2021), «Time series forecast of sales volume based on XGBoost», *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 1873.
13. Volokyta, A.M. and Selivanov, V.L. (2022), *Osnovy teorii planuvannia eksperymentu*, navch. posib., KPI im. I.Sikorskoho, Kyiv, 41 p.

Манохін Андрій Сергійович – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший дослідник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-1479-8482>.

Наукові інтереси:

- моделювання процесів оброблення різанням;
- фізика процесу різання.

E-mail: the.manokhin@gmail.com.

Клименко Сергій Анатолійович – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший дослідник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

<https://orcid.org/0000-0002-7913-5519>.

Наукові інтереси:

- процеси фінішної обробки;
- процеси обробки інструментами із надтвердих матеріалів;
- захисні покриття.

E-mail:alcon1202@urk.net.

Клименко Сергій Анатолійович – заступник директора з наукової роботи інституту, член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-1464-3771>.

Наукові інтереси:

- матеріалознавство інструментальних матеріалів та покриттів;
- фінішне оброблення інструментами із надтвердих матеріалів.

E-mail: atmu@meta.ua.

Копсйкіна Марина Юріївна – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

<https://orcid.org/0000-0002-5956-5503>.

Наукові інтереси:

- інструменти із надтвердих матеріалів;
- діагностика стану інструментів та шляхи підвищення їх працездатності.

E-mail: atmu1@meta.ua.

Мельнийчук Юрій Олексійович – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

<https://orcid.org/0000-0003-4529-2775>.

Наукові інтереси:

- виробництво різальних інструментів із надтвердих матеріалів;
- процеси обробки інструментами із надтвердих матеріалів.

E-mail: en22@i.ua.

Чумак Анатолій Олександрович – науковий співробітник, кандидат технічних наук Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

<https://orcid.org/0000-0001-9054-3196>.

Наукові інтереси:

- процеси оброблення інструментами із надтвердих матеріалів;
- діагностика стану інструментів.

E-mail: chumak1826ar@gmail.com.

Найденко Артем Григорович – старший науковий співробітник, кандидат технічних наук Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

<https://orcid.org/0009-0005-2094-1208>.

Наукові інтереси:

- моделювання процесів оброблення різанням;
- оптимізація процесів оброблення.

E-mail: artemu@ukr.net.

Manokhin A.S., Klimenko S.An., Klimenko S.A., Kopeikina M.Yu., Melniychuk Yu.O., Chumak A.O., Naidenko A.G.

Determination of stability of the cutting process under dynamic loading conditions

An approach to quantitatively determining the stability of the cutting process under dynamic loading conditions is demonstrated. With this method, it is proposed to evaluate the time series of cutting force values and determine the stability index as a function of the prediction accuracy, which is determined by the root mean square error of deviation (RSME) of the predicted and experimental values of the cutting force signal. The prediction of the dependence is carried out using machine learning based on the XGB method (extreme gradient acceleration). The practical significance of the developed method lies in the ability to provide a quantitative assessment of the stability of the cutting process regardless of the state of the cutting edge of the tool, which can be characterized by both uniform wear and the presence of defects (microcracks, chips) and macrofracture.

Experimental values of the cutting signal strength were obtained when processing a workpiece made of hardened steel with longitudinal grooves to simulate a pulsed dynamic load on the cutting tool with PcBN «Borsinit». The cutting force values were recorded using a UDM-600 dynamometer and an ADA-1406 ADC. It was found that the RSME values in the range of applied processing conditions ($v = 120\text{--}210$ m/min; $S = 0.10\text{--}0.19$ mm/rev; $t = 0.1\text{--}0.2$ mm) were within 40–60 N. The optimal parameters of cutting modes that ensure stable cutting under dynamic conditions correspond to the following conditions: longitudinal tool feed $S = 0.10\text{--}0.12$ mm/rev; cutting depth $t = 0.125\text{--}0.175$ mm; cutting speed $v = 180\text{--}200$ m/min. at a value of $RSME < 56$. It is also shown that the use of a tool with a cutting edge inclination angle $\lambda = 40\text{--}50^\circ$ practically eliminates cutter breakage and increases the stability of the cutting process.

Keywords: cutting tool; cutting force; intermittent machining; process stability; machine learning; prediction; tool failure; wear.

Стаття надійшла до редакції 09.04.2025.