

М. В. ШАПОВАЛОВ, В. Д. КОВАЛЬОВ, Я. В. ВАСИЛЬЧЕНКО

ВПЛИВ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИРОБНИЧИХ ВИПРОБУВАНЬ ТВЕРДОСПЛАВНИХ РІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ, ЗМІЦНЕНИХ ОІМП НА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

Предметом дослідження в статті є процес зміцнення різального інструменту для важких верстатів. **Мета** роботи – підвищення експлуатаційного ресурсу, надійності, міцності і зносостійкості твердосплавних різальних інструментів за рахунок зміцнення обробкою імпульсним магнітним полем. В статті вирішуються наступні **завдання**: встановити основні фактори, що впливають на зміну зносостійкості твердого сплаву, який зміцнений обробкою імпульсним магнітним полем; дослідити вплив результатів випробувань твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП на продуктивність в виробничих умовах; встановити вплив зміцнення ОІМП на показники експлуатаційної стійкості інструменту; дослідити взаємозв'язок параметрів ОІМП, параметрів технологічного процесу різання і ефективності виробництва. Отримано наступні **результати**: на підставі виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів встановлено, що застосування обробки імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню зносостійкості різальних інструментів, зменшенню коефіцієнта варіації стійкості, підвищенню гамма-відсоткової стійкості, зменшенню кількості викришування, поломок в зоні приробітку інструменту. Застосування ОІМП дозволяє оптимізувати режими різання за продуктивністю обробки, собівартості операції і інструментальним витратам. Встановлено, що при важких умовах різання доцільно оптимізувати режим різання по величині подачі з урахуванням розсіювання стійкості інструментів. **Висновки**: застосування обробки імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню стійкості інструментів в 1,2 – 2,0 рази та зниженню коефіцієнту варіації стійкості в 1,3 – 3,1 рази. Гамма-відсоткова стійкість інструментів підвищується в 1,7 – 2,8 рази. Оптимальна стійкість підвищується в 1,4 – 2 рази, оптимальна подача – в 1,15–1,3 рази. Визначено залежність продуктивності обробки різання після ОІМП, від напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_s , вмісту кобальту в твердому сплаві C_0 , частоти імпульсів f .

Ключові слова: обробка імпульсним магнітним полем; твердосплавний інструмент; виробничі випробування; стійкість; коефіцієнт варіації стійкості.

Вступ

Підвищення ефективності металорізального обладнання вимагає особливої уваги до стабільності обробки деталей, скороченню простоїв верстатів, у тому числі з вини відмов різальних інструментів. Особливо це важливо для важких верстатів з ЧПК, вартість простоїв яких дуже велика. Тому проблема підвищення надійності різального інструменту для важких верстатів набула особливої актуальності. Дослідження методу обробки імпульсним магнітним полем інструментів показали високу його ефективність. Його перевага є в невисоких потребах до енерговитрат, витрат на виготовлення устаткування.

Аналіз проблеми і існуючих методів

Витрати при експлуатації виробів в значній мірі залежать від фізико-механічних властивостей матеріалів, для підвищення яких застосовуються різні методи зміцнення. При цьому більш ефективними є методи, які дозволяють поліпшувати фізико-механічні властивості матеріалів за об'ємом. До таких методів відноситься метод обробки імпульсним магнітним полем (ОІМП) [1, 2, 3]. Сутність ОІМП полягає в тому, що металорізальний інструмент перед обробкою поміщають в порожнину магніту, з'єданого зі збудником імпульсів. При магнітному впливі метал змінює свої фізичні і механічні властивості. Магнітно-імпульсна поле взаємодіє з матеріалом металорізального інструменту, змінює його теплові та електромагнітні властивості, покращує структуру і експлуатаційні характеристики. Поліпшення

властивостей у металорізального інструменту після ОІМП, досягається за рахунок спрямованої орієнтації вільних електронів речовини зовнішнім полем, внаслідок чого збільшується тепло- і електропровідність матеріалу. Основними перевагами ОІМП є: зміцнення металорізального інструменту будь-якої конструкції, простота технологічної оснастки і відсутність витратних матеріалів, екологічність, низька собівартість [5, 16, 17, 18].

Для реалізації процесу ОІМП використовується пристрій управління, який дозволяє встановлювати режими обробки виробу, тобто задавати певні параметри магнітної енергії і тривалість її впливу. Це дозволяє добирати режими обробки металорізального інструменту і використовувати даний пристрій для наукових досліджень. Але питання ефективності методу та вибору раціональних режимів зміцнення вивчені недостатньо. Тому наукове обґрунтування технології та режимів обробки імпульсним магнітним полем є актуальною задачею.

Мета даної статті

Підвищення експлуатаційного ресурсу, надійності, міцності і зносостійкості твердосплавних різальних інструментів за рахунок зміцнення обробкою імпульсним магнітним полем.

У статті вирішуються наступні завдання:

- встановити основні фактори, що впливають на зміну зносостійкості твердого сплаву, який зміцнений обробкою імпульсним магнітним полем;
- дослідити вплив результатів випробувань твердосплавних різальних інструментів, які зміцнені ОІМП на продуктивність в виробничих умовах;

- встановити вплив зміцнення ОІМП на показники експлуатаційної стійкості інструменту;

- дослідити взаємозв'язок параметрів ОІМП, параметрів технологічного процесу різання і ефективності виробництва.

Рішення задачі

Проведені випробування різальних інструментів з твердого сплаву після обробки імпульсним магнітним полем. Оцінка працездатності здійснювалася за такими показниками: середня стійкість інструментів T , коефіцієнт варіації зносостійкості K_T , гамма процентна стійкість T_γ , щільність розподілу стійкості $f(T)$, інтенсивність відмов $\lambda(T)$, ймовірність безвідмовної роботи $P(T)$.

Результати випробувань показали, що для твердосплавних інструментів, які зміцнені ОІМП, середня зносостійкість інструментів підвищилася в 1,2 – 2,0 рази, а коефіцієнт варіації зносостійкості знизився в 1,3 – 3,1 рази, що підтверджує раніше отримані експериментальні результати [6,7,9,10]. Більш суттєво підвищилася гамма процентна стійкість. Так при ймовірності 0,9 це підвищення відбувається в 1,7 – 2,8 рази, що говорить про доцільність використання цих інструментів на важких верстатах, коли є вимоги до великого періоду стійкості інструменту, що пов'язано з великою довжиною деталей.

Аналіз інтенсивності відмов інструментів показав, що для інструментів, які зміцнені ОІМП, відсутня зона приробітки, що відобразилося на зменшенні числа відмов інструменту, які не усунені (викиршування, поломки) в 2,7 рази.

Оцінка ефективності обробки металів різанням проводилася за цільовими функціями, які характеризують продуктивність Q , собівартість C і інструментальні витрати S в залежності від стійкості інструментів і режимів різання. У цих функціях враховувалося також вплив розсіювання стійкості інструментів.

Для оцінки ефективності обробки металів різанням використовувалися цільові функції в розгорнутій формі:

- продуктивність механообробки:

$$Q = \frac{F_g}{\frac{A_0 \cdot T^\mu}{(T_{np} - T)^\mu} \cdot \left(1 + \frac{\tau \cdot \lambda}{T}\right) + T_e} \quad (1)$$

- собівартість операції:

$$C_0 = \frac{A_0 \cdot T^\mu}{(T_{np} - T)^\mu} \cdot E \cdot \left(1 + \frac{\tau \cdot \lambda}{T}\right) + S_T \cdot A_0 \cdot \frac{T^{\mu-1}}{(T_{np} - T)^\mu} \cdot \lambda + C_{\text{мат}} \quad (2)$$

- інструментальні витрати:

$$S = S_T \cdot A_0 \cdot \frac{T^{\mu-1}}{(T_{np} - T)^\mu} \cdot \lambda, \quad (3)$$

де F_g – річний діючий фонд роботи обладнання; λ – коефіцієнт часу різання, визначений як відношення часу різання до машинного часу

$\lambda = \frac{T_p}{T_M} \leq 1$; T_e – допоміжний час; A_0 – постійна, яка залежить від параметрів процесу різання; μ – показник відносної зносостійкості інструменту в формулі Тейлора:

$$V = \frac{C_v}{T^\mu}, \quad (4)$$

де E – собівартість верстатохвилин роботи верстату; S_T – витрати відносно інструменту за період його стійкості; T_{np} – граничне значення стійкості, що за рахунок зміни тільки швидкості різання перевершити не вдається. Для твердосплавних інструментів під час обробки сталі $T_{np} = 600$ хв.

З урахування граничної стійкості формула Тейлора була перетворена до виду:

$$T = \frac{C_T}{v^\mu + \frac{C_T}{T_{np}}}, \quad (5)$$

де τ – час простою обладнання під час заміни затупленого інструменту гострим.

Якщо під час роботи обладнання має місце розсіювання зносостійкості інструментів, а також ймовірність виходу інструменту з ладу внаслідок викршування або поломок, то в формулах (1–3) час на заміну інструменту, який затупився, гострота буде залежати від ймовірності безвідмовної роботи і, тому, воно складається з часу на планову заміну інструментів τ_n і часу, що витрачається на аварійну його заміну τ_a :

$$\tau = \tau_n \cdot P(T) + \tau_a [1 - P(T)]. \quad (6)$$

У той же час показник ступеню μ у формулі Тейлора залежить від розсіювання стійкості, що виражається формулою:

$$\mu = \frac{C_\mu \cdot (E_2 \cdot K_2 - E_1 \cdot K_1)}{b \cdot \ln V}, \quad (7)$$

де C_μ – коефіцієнт, який залежить від матеріалу, який оброблюється, розсіювання стійкості та типорозміру інструменту; K_1, K_2 – коефіцієнти, які залежать від об'єму вибірки та розсіювання стійкості; b – коефіцієнт форми розподілення Вейбулла, що є універсальним законом, який описує розсіювання стійкості; $E_1 = \ln(-\ln P_{\text{min}})$; $E_2 = \ln(-\ln P_{\text{max}})$,

де $P_{T_{\min}}$, $P_{T_{\max}}$ – вірогідність безвідмовної роботи за умови найменшого та найбільшого значення зносостійкості інструментів в усій вибірці.

З урахуванням наведених вище залежностей були розраховані продуктивність, собівартість операції та інструментальні витрати для операції партії інструментів, графіки яких наведені на рисунках 1–3.

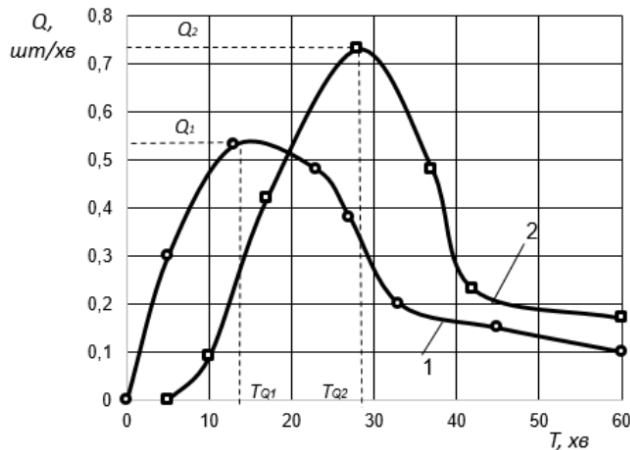


Рис. 1. Вплив ОІМП на продуктивність операції (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

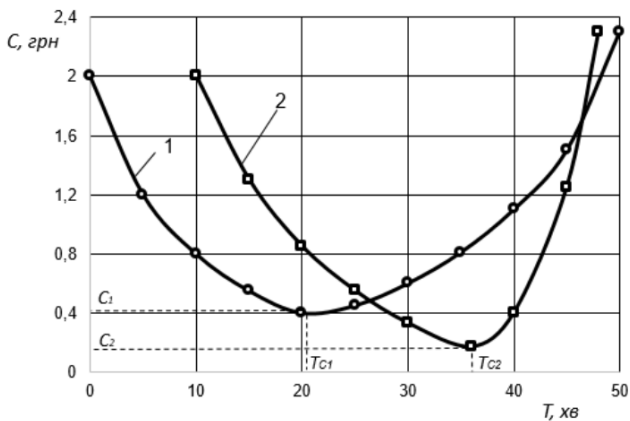


Рис. 2. Вплив ОІМП на собівартість операції (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

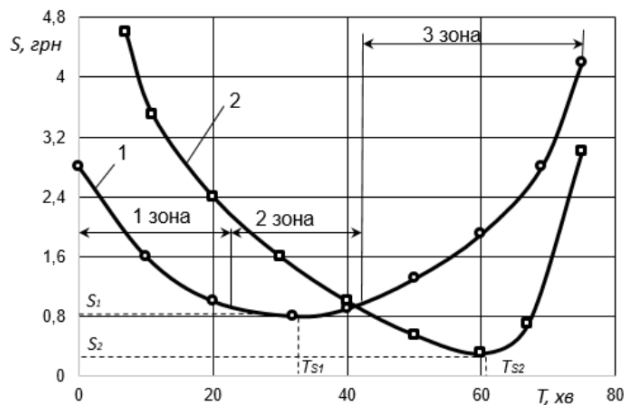


Рис. 3. Вплив ОІМП на інструментальні витрати (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

Оцінка ефективності обробки металів різанням дозволила встановити підвищення оптимальної

стійкості різальних інструментів, які зміцнені ОІМП в 1,4 – 2,5 рази, а також дати практичні рекомендації щодо визначення оптимальної подачі.

Використовуючи результати виробничих випробувань, на основі принципів системного підходу був представлений взаємозв'язок параметрів механічної обробки і ефективності виробничого процесу при використанні ОІМП.

З наведених вище графіків також видно, що застосування ОІМП сприяє підвищенню продуктивності операції, зниженню її собівартості і інструментальних витрат за умови оптимальної стійкості інструментів. Це говорить про підвищення ефективності технологічного процесу під час застосуванні зміцнення різальних інструментів ОІМП.

При відомому значенні оптимальної стійкості інструменту T_{opt} оптимальний розмір швидкості різання (за умови прийнятого критерія оптимізації) може бути розрахований за формулою:

$$V = \frac{C_V}{X^{K_X}} \cdot \left[\frac{(T_{np} - T_{opt}) \cdot T_c}{T_{opt} \cdot (T_{np} - T_c)} \right]^{\frac{1}{\mu}} \cdot K_{III} \cdot K_q \cdot K_M \cdot K_{сож} \cdot K_{СП} \cdot K_{ж}, \quad (8)$$

де X – характеристика різання, яка введена для того, щоб відобразити безперервний характер зміни швидкості різання. Для операції точіння ця характеристика визначається з виразу: $X = \alpha \cdot S \cdot \sin \varphi$, T_c – нормативна стійкість; $K_{III} \cdot K_q \cdot K_M \cdot K_{сож} \cdot K_{СП} \cdot K_{ж}$ – коефіцієнти, які враховують вплив на швидкість різання, відповідно, інструментального матеріалу, мастильно-охолоджуючих засобів, стан поверхні заготовки оброблюваної деталі, жорсткість системи ВПД.

За умови важких умов різання (обробка по ливарної кірки, різання з ударами, нерівномірність припуску) будуть переважати тендітні руйнування, інструменту. У цьому випадку важливим критерієм стійкості інструменту є його міцність. Характеризує цю міцність інструменту гранична подача, при якій відбувається руйнування інструменту S_p . Продуктивність обробки за таких умов, рекомендовано розраховувати за формулою:

$$Q = 10^3 \cdot t \cdot S \cdot V \cdot T. \quad (9)$$

Оскільки в виробничих умовах має місце розсіювання стійкості інструментів, то призначення режимів різання повинно здійснюватися, виходячи із забезпечення зносостійкості із заданою вірогідністю P . Остання визначається в залежності від характеру розподілення стійкості по аналогії з гамма-відсотковим ресурсом виробу. Така стійкість називається гамма-відсотковою стійкістю та визначається за допомогою графіків безвідмовної роботи інструментів, складених за результатами спостережень за роботою інструментів.

За умови чорнової обробки твердосплавними інструментами на розмір розсіювання стійкості чине

вплив подачі S . Залежність коефіцієнту варіації стійкості від подачі виражається рівнянням [14, 15]:

$$K_T = M_K + 0,75 \cdot S, \quad (10)$$

де M_K – коефіцієнт, який залежить від умов різання.

Останній вираз використано під час розробки нормативів різання для важких верстатів токарно-карусельної групи [8,12].

У свою чергу встановлено функційний зв'язок між коефіцієнтами варіації стійкості та параметрами розподілення Вейбулла:

$$K_T = \left[\frac{\Gamma \cdot \left(1 + \frac{2}{b}\right)}{\left[\Gamma \cdot \left(1 + \frac{1}{b}\right)\right]^2} - 1 \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

де Γ – гамма-функція.

Отже, гамма-відсоткова стійкість має тісний зв'язок з коефіцієнтом варіації стійкості.

Враховуючи визначений вплив подачі на розмір розсіювання стійкості (9), а також складний характер залежності гамма-відсоткової стійкості від коефіцієнту варіації стійкості (10), а, відповідно, і від подачі, важливо знати ступінь впливу подачі та гамма-відсоткової стійкості на виробництво обробки (8).

На рисунку 4 відображена залежність продуктивності від розміру подачі для випадку повздовжнього точіння сталі твердістю HB 201-226 на верстаті моделі 1A665 різцями зі сплаву T5K10 ($\varphi = 60^\circ$, $t = 4$ мм, $S = 1,6$ мм/об, $V = 36$ м/хв).

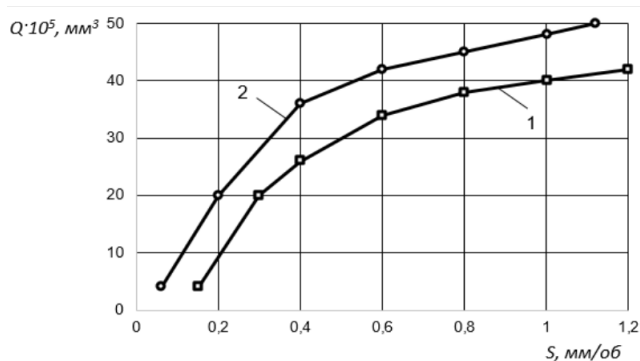


Рис. 4. Вплив подачі на продуктивність обробки без урахування розсіювання стійкості (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

З рисунка 4 (довірчий інтервал: $\Delta Q = \pm 0,986 \cdot 10^5$ мм³) видно, що при постійному значенні середньої стійкості інструментів зі збільшенням подачі спостерігається безперервне зростання продуктивності. Причому для зміцнених інструментів крива 2 знаходиться вище, що говорить про зростання продуктивності під час роботи інструментами, які зміцнені ОІМП.

Якщо ж для розрахунку продуктивності замість середньої стійкості використовувати гамма-відсоткову

стійкість, то, як видно з рисунка 5, існує значення подачі, відповідне максимальній продуктивності. При цьому при збільшенні ймовірності безвідмовної роботи $P(T)$ максимум продуктивності зміщується в бік зменшення подачі.

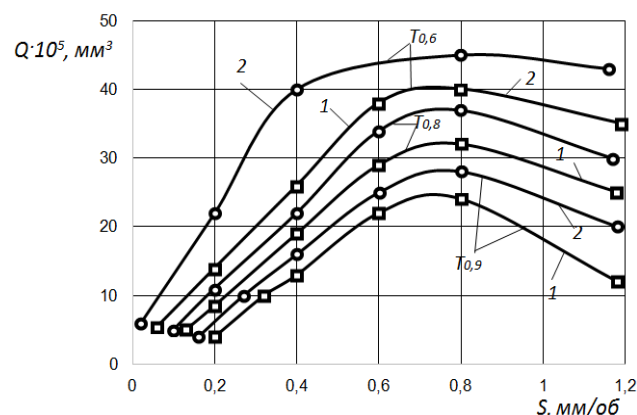


Рис. 5. Вплив подачі на продуктивність обробки з урахуванням розсіювання стійкості (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

Оптимальний розмір подачі під час роботи інструментами, які зміцнені ОІМП, збільшується у 1,2 – 1,3 рази під час зростання продуктивності обробки в 1,1 – 1,2 рази.

Аналогічні закономірності відслідковуються також під час дослідження впливу подачі на собівартість (рисунки 6 и 7, довірчий інтервал: $\Delta C = \pm 0,0342$ грн.) та інструментальні витрати (рисунки 8 та 9, довірчий інтервал: $\Delta S = \pm 0,148$ грн.).

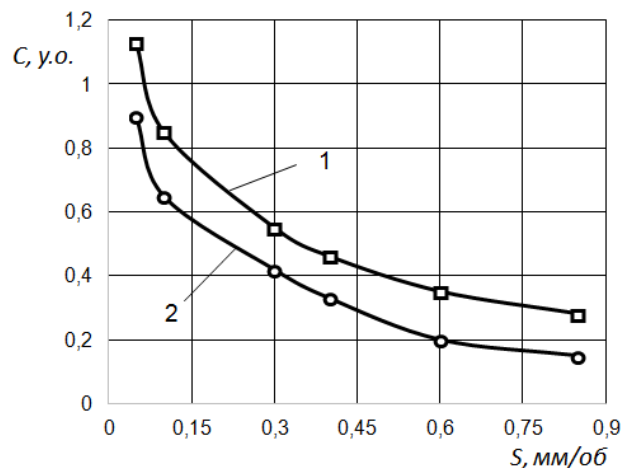


Рис. 6. Вплив подачі на собівартість обробки без урахування розсіювання стійкості (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

Так оптимальна подача, яка відповідає мінімальній собівартості операції, під час роботи інструментами, зміцненими ОІМП, збільшується в 1,15 – 1,25 рази за умови зниження собівартості операції в 1,1 – 1,2 рази. Оптимальна подача, яка відповідає мінімальним інструментальним витратам збільшується в 1,1 – 1,2 рази.

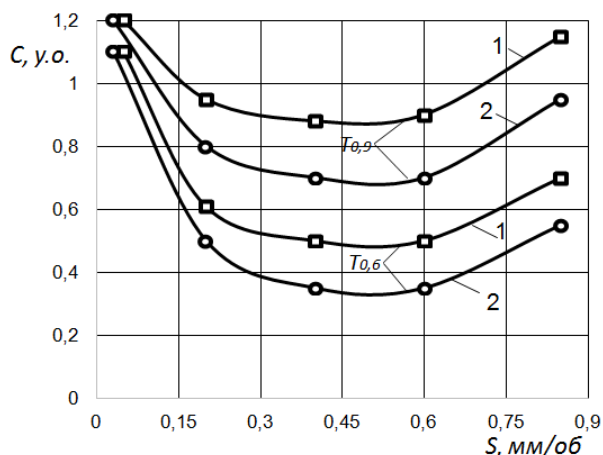


Рис. 7. Вплив подачі на собівартість обробки з урахуванням розсіювання стійкості (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

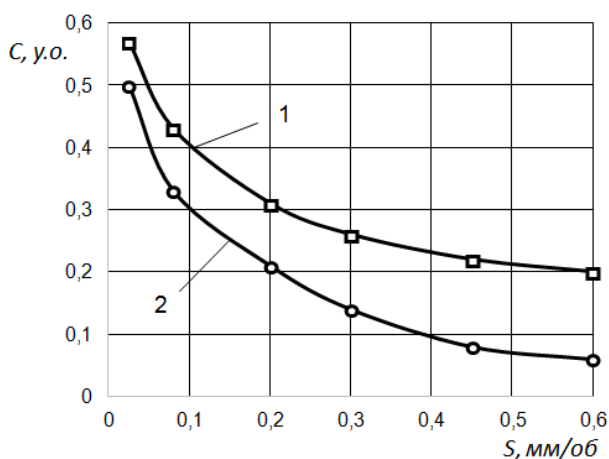


Рис. 8. Вплив подачі на інструментальні витрати без урахування розсіювання стійкості (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

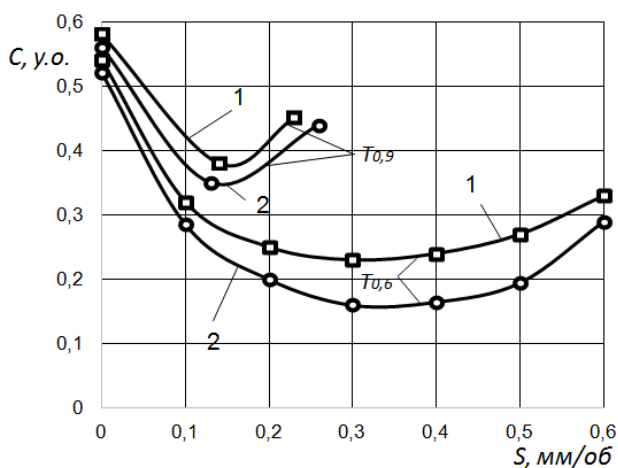


Рис. 9. Вплив подачі на інструментальні витрати з урахуванням розсіювання стійкості (1 – інструменти без зміцнення; 2 – зміцнені інструменти)

Таким чином, за умови чорнової обробки, коли переважає крихке руйнування інструменту, призначати режими різання необхідно, виходячи з оптимального значення подачі з урахуванням розсіювання стійкості інструментів.

Процес обробки металів різанням являє собою систему, що складається з елементів, які є окремими процесами [8, 11, 13]. Стан системи характеризується підбором значень ряду змінних (факторів, показників), а поведінка системи – послідовністю станів у часі. Система має властивість відносної стійкості в тому сенсі, що вона зберігається лише в певних межах зміни її змінних. Для нашого випадку – чорнова обробка металів твердосплавними різальними інструментами, які зміцненні ОІМП.

Вивчення системи здійснюється шляхом зміння параметрів її функціонування:

1. Матеріал, що оброблюється – його властивості: твердість, межа міцності.
2. Операція обробки – знятий припуск, стан вихідної поверхні, режими різання.
3. Різальний інструмент – інструментальний матеріал (склад, властивості), геометричні та конструктивні параметри.
4. Жорсткість системи, її динамічні властивості.
5. Параметри ОІМП – напруженість магнітного поля, частота імпульсів.

Було розглянуто такі результати функціонування системи:

1. Стійкість різального інструменту, гамма-відсоткова стійкість.
2. Варіація стійкості.
3. Продуктивність обробки.
4. Собівартість операції.
5. Інструментальні витрати.

На кожен з параметрів функціонування системи в більшій чи меншій мірі впливають всі змінні фактори її стану, а також їх взаємовплив. У цілому розглянута система характеризується великою кількістю можливих станів і великою кількістю зв'язків між її елементами, тобто є складною системою. Зв'язок між параметрами буде визначено у вигляді статистичних моделей, що характеризують взаємозв'язок між основними змінними факторами системи і параметрами, які характеризують ефективність виробництва.

В якості моделі для опису залежності продуктивності обробки від зміни напруженості магнітного поля x_1 (H), частоти імпульсів x_2 (f), вмісту кобальту в твердому сплаві x_3 (C_0), межі міцності твердого сплаву x_4 (σ_6) було застосовано рівняння першого ступеню із взаємодіями:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{14}x_1x_4 + b_{23}x_2x_3 + b_{24}x_2x_4 + b_{34}x_3x_4 + b_{123}x_1x_2x_3 + b_{234}x_2x_3x_4 + b_{134}x_1x_3x_4 + b_{124} + x_1x_2x_4 + b_{1234}x_1x_2x_3x_4.$$

Зазначене рівняння отримано шляхом варіювання кожного з факторів x_i на верхньому x_{i0} та нижньому x_{in} рівнях, які відрізняються від базового рівня x_{i0} розміром кроку варіювання $\pm\Delta x_i$.

За основу плану експерименту був прийнятий повний факторний експеримент виду 2^4 , де 2 – число

рівней (верхній та нижній) незалежних змінних; 4 – число незалежних замінних [4]. Цей план дозволяє реалізувати всі можливі неповторювані комбінації рівнів незалежних змінних, кожна з яких примусово варіюється на двох рівнях. Для спрощення обчислень застосовано формулу перетворення:

$$Z_i = \frac{x_i - x_{i0}}{\Delta x_i}. \quad (12)$$

Розмір нижнього та верхнього рівня, та, відповідно, розмір кроку варіювання для кожної змінної мав такі значення:

$$- H : x_{1n} = 0,8 \cdot 10^5 \text{ А/м}, \quad x_{1e} = 1,3 \cdot 10^5 \text{ А/м}, \\ \Delta x_1 = 0,25;$$

$$- f : x_{2n} = 5 \text{ Гц}, \quad x_{2e} = 10 \text{ Гц}, \quad \Delta x_2 = 2,5;$$

$$- C_0 : x_{3n} = 6\%, \quad x_{3e} = 10\%; \quad \Delta x_3 = 2;$$

$$- \sigma_6 : x_{4n} = 5,1 \cdot 10^8 \text{ Па}, \quad x_{4e} = 6,3 \cdot 10^8 \text{ Па}, \\ \Delta x_4 = 0,6.$$

Коефіцієнти апроксимуючої функції визначалися за формулою:

$$b_i = \frac{\sum_{m=1}^N x_{im} \cdot y_m}{N}. \quad (13)$$

Математичну модель залежності продуктивності обробки від показників зміни напруженості магнітного поля x_1 (H), частоти імпульсів x_2 (f), вмісту кобальту в твердому сплаві x_3 (C_0), межі міцності твердого сплаву x_4 (σ_6) за результатами проведеного випробування може бути записано у вигляді:

$$y = 2,795 + 0,828z_1 + 0,025z_2 + 0,358z_3 + 0,369z_4 - \\ - 0,006z_5 + 0,115z_6 + 0,126z_7 + 0,016z_8 + 0,027z_9 - \\ - 0,148z_{10} - 0,117z_{11} + 0,145z_{12} - 0,102z_{13} - 0,019z_{14} - \\ - 0,049z_{15}. \quad (14)$$

Перевірка на статичну значність розрахованих коефіцієнтів проводилася за довірчим значенням коефіцієнтів:

$$\Delta b_i = \pm t_{кр} S_{b_i}, \quad (15)$$

де S_{b_i} – дисперсія, яка характеризує помилку випробування у визначенні коефіцієнтів регресії:

$$S_{b_i} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}}, \quad (16)$$

де S_y^2 – дисперсія опыту.

Список літератури

1. Постников С. Н., Кунгин А. Д. Об одной из причин повышения стойкости быстрорежущего инструмента, подвергнутого магнитной обработке. Оптимизация процессов резания жаро- и особопрочных материалов. *Межвузовский научный сборник*. Уфа. 1980. № 5. С. 157–160.
2. Постников С. Н. Физические основы обработки материалов и изделий последовательностью импульсов слабого магнитного поля. Доклад третьего научно-технического семинара с международным участием по технологии финишной обработки АМО'87 (Варна, окт. 1987 г.). София, 1988. С. 199–207.

На підставі результатів експериментів було розраховано довірче значення для коефіцієнтів регресії: $\Delta b_i = \pm 0,037$.

Тому, відкинувши незначні члени взаємодії, первинну математичну модель можна представити у вигляді:

$$y = 2,795 + 0,828z_1 + 0,35z_3 + 0,369z_4 + 0,115z_6 + \\ + 0,126z_7 - 0,148z_{10} - 0,117z_{11} + 0,145z_{12} - \\ - 0,102z_{13} - 0,049z_{15}.$$

Переходячи від кодованих значень змінних до натуральних, отримуємо рівняння залежності продуктивності обробки від напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_6 , вмісту кобальту в твердому сплаві C_0 , частоти імпульсів f :

$$Q = (-22,728 + 0,094H + 2,869C_0 + 4,7717\sigma_6 + 3,43f + \\ + 0,0031HC_0 - 0,0144H\sigma_6 - 0,7787f\sigma_6 - 0,5983C_0\sigma_6 - \\ - 0,892Hf - 0,4846fC_0 + 0,0112HfC_0 + 0,0973fC_0\sigma_6 + \\ + 0,0026HfC_0\sigma_6) \cdot 10^6.$$

Використовуючи це рівняння та застосовуючи метод крутого сходження, знайдено найбільш доцільні розміри відхилень напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_6 , вмісту кобальту в твердому сплаві C_0 , частоти імпульсів f від номінальних значень.

Висновки

1. Результати виробничих випробувань твердосплавних різальних інструментів довели, що застосування обробки імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню стійкості інструментів в 1,2 – 2,0 рази та зниженню коефіцієнту варіації стійкості в 1,3 – 3,1 рази. Гамма-відсоткова стійкість інструментів підвищується в 1,7 – 2,8 рази.

2. Встановлено, що використання обробки імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню оптимальної стійкості в 1,4 – 2 рази.

3. Для інструментів, які працюють в умовах важкого різання, використання обробки імпульсним магнітним полем сприяє підвищенню оптимальної подачі в 1,15-1,3 рази.

4. Використовуючи факторний аналіз типу 2^4 , визначено залежність продуктивності обробки різцями, які зміцнені ОІМП, від напруженості магнітного поля H , межі міцності твердого сплаву σ_6 , вмісту кобальту в твердому сплаві C_0 , частоти імпульсів f .

3. Малыгин Б. В. Магнитное упрочнение инструмента и деталей машин. М. : Машиностроение, 1989. 112 с.
4. Кацев П. Г. Статистические методы исследований режущего инструмента. М. : Машиностроение, 1974. 155 с.
5. Ковалев В. Д., Васильченко Я. В., Клименко Г. П. Применение обработки импульсным магнитным полем для упрочнения деталей машин и режущего инструмента. *Вестник двигателестроения*. Запорожье. ЗНТУ. 2004. № 4. С. 149–151.
6. Сорока О. Б., Родичев Ю. М., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В. Зміцнення твердосплавного різального інструменту для важкого машинобудування на основі поверхневої та об'ємної модифікації фізичними методами. *Вісник Тернопільського Національного технічного університету ім. І.Пулюя*. 2013. № 3 (71). С. 133–145.
7. Родичев Ю. М., Сорока О. Б., Ковальов В. Д., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Прискорені випробування різальних пластин при інтенсивному контактному навантаженні. *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії*. Краматорськ, 2018. № 1 (43). С. 181–187.
8. Kovalev V., Vasilchenko Y. Statistical researches of work of the enterprises of heavy mechanical engineering for a substitution of technical characteristics of new machine tools. 11th International Conference RaDMI 2011 from 15-18 September 2011, Sokobanja (Serbia). 2011. P. 359–364.
9. Soroka O., Rodichev J., Shabetia O., Kovalov V., Vasilchenko Y., Shapovalov M. Strength of tool materials. Modern trends in material processing: Collective monograph. Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja. 2018. P. 185–217.
10. Клименко Г. П., Мироненко Є. В., Гузенко В. С., Васильченко Я. В., Шаповалов М. В. Експлуатація збірних різців : монографія для студентів спеціальностей 6.050503, 6.050502, 8.05050301, 8.05050302, 8.05050201 денної та заочної форми навчання. Краматорськ. 2015. 86 с.
11. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В. Разработка технологических систем для обработки крупногабаритных деталей на базе адаптивных многоцелевых тяжелых станков. *Вестник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт*. 2013. № 139. С. 28–32.
12. Васильченко Я. В., Сукова Т. А., Шаповалов М. В. Методы повышения эффективности процесса резания на тяжелых станках. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць*. Краматорськ. 2011. № 29. С. 76–84.
13. Шаповалов М. В., Васильченко Я. В. Банк данных для выбора рациональной конструкции сборных резцов. *Сборник научных трудов ЗАО ОНИКС. Теория и практика в машиностроении*. Ирбит. 2013. С. 159–162.
14. Скибин В. В., Абанкин В. И. Выбор подачи с учетом рассеивания стойкости твердосплавных резцов. *Сб. Надежность режущего инструмента*. Вып. № 2. Киев. Вища школа, 1975. С. 39–42.
15. Хае Г. Л. Надежность режущего инструмента. Киев. УкрНИИТИ, 1968. 115 с.
16. Pal C. N., Pal D. K., Das Yupta M. C. Influence of magnetic field on drill life in drilling cast iron. *J. Just. Eng. (India). Mech. Eng. Div.* 1974. № 5. P. 241–246.
17. Advances in Engineering Materials and Applied Mechanics: Proceedings of the International Conference on Machinery, Materials Science and Engineering Application. (MMSE 2015). Wuhan. China. June 27-28 2015.
18. Алифанов А. В., Попова Ж. А., Ционенко Н. М. Магнитно-импульсная обработка стальных изделий. *Перспективные материалы и технологии : Сб. науч. тр.* Гл. 25. Витебск. ВГТУ 2013. С. 520–542.

References

1. Postnikov, S. N., Kungin, A. D. (1980), "About one of the reasons for increasing the durability of a high-speed tool subjected to magnetic processing. Optimization of cutting processes of heat- and extra-strong materials" ["Ob odnoy iz prichin povysheniya stoykosti bystrorezhushchego instrumenta, podvergnutogo magnitnoy obrabotke. Optimizatsiya protsessov rezaniya zharo- i osoboprochnykh materialov"], *Interuniversity scientific collection*, Ufa, No. 5, P. 157–160.
2. Postnikov, S. N. (1988), "Physical bases of processing materials and products by a sequence of pulses of a weak magnetic field" ["Fizicheskie osnovy obrabotki materialov i izdeliy posledovatel'nost'yu impul'sov slabogo magnitnogo polya"], *Report of the third scientific and technical seminar with international participation on the finishing technology of AMO'87 (Varna, Oct. 1987)*. Sofia, P. 199–207.
3. Malygin, B. V. (1989), *Magnetic hardening of tools and machine parts [Magnitnoe uprochnenie instrumenta i detaley mashin]*, Moscow, Engineering, 112 p.
4. Katsev, P. G. (1974), *Statistical methods of cutting tool research [Statisticheskie metody issledovaniy rezhushchego instrumenta]*, Moscow, Engineering, 155 p.
5. Kovalov, V., Vasilchenko, Y., Klimenko, G. (2004), "Application processing pulse magnetic field for hardening machine parts and cutting tools" ["Primenenie obrabotki impul'snym magnitnym polem dlya uprochneniya detaley mashin i rezhushchego instrumenta"], *Engine Bulletin*, Zaporozhye, ZNTU, No. 4, P. 149–151.
6. Soroka, O., Rodichev, Ju., Kovalov, V., Vasylichenko, J. (2013), "Strengthening of the carbide cutting tool for heavy engineering on the basis of surface and bulk modification by physical methods", ["Zmicennja tverdosplavnogho rizal'nogho instrumentu dlja vazhkogho mashynobuduvannya na osnovi poverkhnevoji ta ob'jemnoji modyfikaciji fizychnymy metodamy"], *Bulletin of the Ternopil National Technical University named after I.Pulyuya*, No. 3 (71), P. 133–145.
7. Rodichev, Ju., Soroka, O., Kovalov, V., Vasylichenko, J., Shapovalov, M. (2018), "Accelerated test of cutting plates with intensive contact loading" ["Prskoreni vyprobuvannya rizal'nykh plastyn pry intensyvnomu kontaktnomu navantazhenni"], *Bulletin of the Donbass State Engineering academy*, Kramatorsk, No. 1 (43), P. 181–187.
8. Kovalev, V., Vasilchenko, Y. (2011), "Statistical researches of work of the enterprises of heavy mechanical engineering for a substitution of technical characteristics of new machine tools", *11th International Conference RaDMI 2011 from 15-18 September 2011*, Sokobanja (Serbia), P. 359–364.
9. Soroka, O., Rodichev, Ju., Shabetia, O., Kovalov, V., Vasilchenko, Y., Shapovalov, M. (2018), Strength of tool materials, *Modern trends in material processing: Collective monograph, Edited by Predrag Dašić*, Vrnjačka Banja, P. 185–217.
10. Klymenko, G., Myronenko, Je., Ghuzenko, V., Vasylichenko, J., Shapovalov, M. (2015), "Exploitation of prefabricated cutters : a monograph for students of specialties 6.050503, 6.050502, 8.05050301, 8.05050302, 8.05050201 of full-time and part-time study" ["Ekspluatacija zbirnykh rizciv: monografija dlja studentiv special'nostej 6.050503, 6.050502, 8.05050301, 8.05050302, 8.05050201 dennoji ta zaочноji formy navchannya"], Kramatorsk, 86 p.

11. Vasilchenko, Y., Sukova, T., Shapovalov, M. (2013), "Development of technological systems for processing large-sized parts based on adaptive multi-purpose heavy machines" ["Razrabotka tekhnologicheskikh sistem dlya obrabotki krupnogabaritnykh detaley na baze adaptivnykh mnogotselevykh tyazhelykh stankov"], *Bulletin of SevNTU. Machinery and equipment and transport*, No. 139, P. 28–32.
12. Vasilchenko, Y., Sukova, T., Shapovalov, M. (2011), "Methods to improve the efficiency of the cutting process on heavy machines" ["Metody povysheniya effektivnosti protsessa rezaniya na tyazhelykh stankakh"], *Reliability of tools and optimization of technological systems. Collection of scientific papers*, Kramatorsk, No. 29, P. 76–84.
13. Shapovalov, M., Vasilchenko, Y. (2013), "Databank for choosing a rational design of precast cutters" ["Bank dannykh dlya vybora ratsional'noy konstruktzii sbornykh reztsov"], *Collection of scientific papers of JSC ONIKS. Theory and practice in engineering*, Irbit, P. 159–162.
14. Skibin, V., Abankin, V. (1975), "Choice of supply with regard to the dispersion of the hardness of carbide cutters" ["Vybor podachi s uchetom rasseivaniya stoykosti tverdospilavnykh reztsov"], *Collection Reliability cutting tools*, Issue 2, Kyiv, Higher school, P. 39–42.
15. Khaet, G. (1968), *Reliability of the cutting tool [Nadezhnost' rezhushchego instrumenta]*, Kyiv, UkrNIITI, 115 p.
16. Pal, C., Pal, D., Das Gupta, M. (1974), Influence of magnetic field on drill life in drilling cast iron, *J. Inst. Eng. (India), Mech. Eng. Div.*, No. 5, P. 241–246.
17. Advances in Engineering Materials and Applied Mechanics: *Proceedings of the International Conference on Machinery, Materials Science and Engineering Application, (MMSE 2015)*, Wuhan, China, June 27-28 2015.
18. Alifanov, A., Popova, Zh., Tsionenko, N. "Magnetic-impulse treatment of steel products" ["Magnitno-impul'snaya obrabotka stal'nykh izdeliy"], *Perspective materials and technologies : Sat. scientific tr.*, Part 25, Vitebsk, VSTU, P. 520–542.

Надійшла (Received) 30.11.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Шаповалов Максим Валерійович – Донбаська державна машинобудівна академія, асистент кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій, Краматорськ, Україна; e-mail: harleymax1979@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-5753-9598>.

Шаповалов Максим Валерієвич – Донбасская государственная машиностроительная академия, ассистент кафедры компьютеризованных мехатронных систем, инструментов и технологий, Краматорск, Украина.

Shapovalov Maxim – Donbass State Engineering Academy, Assistant at the Department of Computerized Mechatronic Systems, Tools and Technologies, Kramatorsk, Ukraine.

Ковальов Віктор Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Донбаська державна машинобудівна академія, ректор, Краматорськ, Україна; e-mail: kovalov.viktor@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5091-5856>.

Ковалев Виктор Дмитриевич – доктор технических наук, профессор, Донбасская государственная машиностроительная академия, ректор, Краматорск, Украина.

Kovalov Viktor – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Donbass State Engineering Academy, Rector, Kramatorsk, Ukraine.

Васильченко Яна Василівна – доктор технічних наук, доцент, Донбаська державна машинобудівна академія, завідувач кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій, Краматорськ, Україна; e-mail: wasilchenko.ua@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4566-8827>.

Васильченко Яна Васильевна – доктор технических наук, доцент, Донбасская государственная машиностроительная академия, заведующий кафедры компьютеризованных мехатронных систем, инструментов и технологий, Краматорск, Украина.

Vasilchenko Yana – Doctor of Sciences (Engineering), Associate Professor, Donbass State Engineering Academy, Head at the Department of Computerized Mechatronic Systems, Tools and Technologies, Kramatorsk, Ukraine.

ВЛИЯНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ, УПРОЧНЕННЫХ ОИМП НА ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

Предметом исследования в статье является процесс упрочнения режущего инструмента для тяжелых станков. **Цель** работы – повышение эксплуатационного ресурса, надежности, прочности и износостойкости твердосплавных режущих инструментов за счет обработки импульсным магнитным полем. В статье решаются следующие **задачи**: установить основные факторы, влияющие на изменение износостойкости твердого сплава, который обработан импульсным магнитным полем; исследовать влияние результатов испытаний твердосплавных режущих инструментов, которые упрочнены ОИМП на производительность в производственных условиях; установить влияние ОИМП на показатели эксплуатационной стойкости инструмента; исследовать взаимосвязь параметров ОИМП, параметров технологического процесса резания и эффективности производства. Получены следующие **результаты**: на основании производственных испытаний твердосплавных режущих инструментов установлено, что применение обработки импульсным магнитным полем способствует повышению износостойкости режущих инструментов, уменьшению коэффициента вариации устойчивости, повышению гамма-процентной устойчивости, уменьшению количества выкрашивания, поломок в зоне приработки инструмента. Применение ОИМП позволяет оптимизировать режимы резания по производительности обработки, себестоимости операции

и инструментальным расходам. Установлено, что при тяжелых условиях резания целесообразно оптимизировать режим резания по величине подачи с учетом рассеяния стойкости инструментов. **Выводы:** применение обработки импульсным магнитным полем способствует повышению устойчивости инструментов в 1,2 – 2,0 раза и снижению коэффициента вариации стойкости в 1,3 – 3,1 раза. Гамма-процентная устойчивость инструментов повышается в 1,7 – 2,8 раза. Оптимальная стойкость повышается в 1,4 – 2 раза, оптимальная подача - в 1,15 – 1,3 раза. Определена зависимость производительности обработки резцами после ОИМП от напряженности магнитного поля H , предела прочности твердого сплава σ_s , содержания кобальта в твердом сплаве C_0 , частоты импульсов f .

Ключевые слова: обработка импульсным магнитным полем; твердосплавный инструмент; производственные испытания; стойкость; коэффициент вариации стойкости.

THE IMPACT OF THE RESULTS OF PRODUCTION TESTS OF CARBIDE CUTTING TOOLS HARDENED BY A MAGNETIC-PULSE TREATMENT ON INCREASING THE EFFICIENCY OF THE TECHNOLOGICAL CUTTING PROCESS

The **subject matter** of the article is the process of hardening cutting tools for heavy machines. The **goal** of the work is to increase the operating life, reliability, durability and wear resistance of carbide cutting tools due to magnetic-pulse treatment. The **tasks** were solved: the main factors affecting the change in wear resistance of a carbide treated with a pulsed magnetic field; the impact of the test results of carbide cutting tools hardened by a magnetic-pulse treatment (MPT) on the productive capacity was studied; the MPT impact on the tool durability indices; the interrelation of the MPT parameters, cutting parameters and production efficiency were studied. The following **results** were obtained: the production tests of carbide cutting tools showed that magnetic-pulse treatment contributes to improving the wear resistance of cutting tools, reducing the coefficient of durability variations, increasing gamma-percentile stability, reducing the amount of chipping and breakage in the area of tool breaking-in. The MPT application enables optimizing cutting conditions in performance rate, cost of operation and tool expenses. It was found out that under difficult cutting conditions, the cutting mode should be optimized in the depth of cut, taking into account the spread of tool durability. **Conclusions.** A magnetic-pulse treatment contributed to increasing the stability of tools by 1.2-2.0 times and decreasing the coefficient of durability variations by 1.3-3.1 times. The gamma-percentile stability of tools increased by 1.7 - 2.8 times; the optimum durability went up by 1.4-2 times, the optimal feed – by 1.15-1.3 times. The dependence of the performance of machining with a cutter after MPT on the magnetic intensity H , on the carbide resistance to rupture σ_s , on the amount of cobalt in a carbide C_0 and on the pulse frequency f was determined.

Keywords: magnetic-pulse treatment; carbide tools; production tests; durability; the coefficient of durability variations.
