

НАПРАВЛЕНИЙ ВИБІР ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВСТАНОВЛЕННЯ КРИТЕРІЇВ ОЦІНКИ НАЙБІЛЬШ РАЦІОНАЛЬНОГО МЕТОДУ ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛОРІЗАЛЬНИХ ІНСТРУМЕНТІВ

Доценко Артем Олексійович

PhD студент

Сумський національний аграрний університет, м. Суми, Україна

ORCID: 0009-0000-7230-9435

a.dotsenko.olivija@gmail.com

Представлені результати аналізу літературних джерел і виробничого досвіду з вибору матеріалів металорізабельних інструментів (MI) і основних вимог до їх виготовлення і експлуатації.

Враховуючи те, що не всі матеріали можуть використовуватися для поверхонь MI, їх вибір має вирішальне значення. У літературі відсутні комплексні дослідження, спрямовані на розробку технології вибору необхідного матеріалу MI та їх елементів, використання якої забезпечить максимальний ресурс їх роботи. Не одна з наявних у літературних джерелах рекомендацій щодо вибору матеріалів MI не є універсальною.

Метою цієї роботи є розробка системи та критеріїв спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь MI шляхом аналізу та синтезу існуючих аналогів, досвіду промисловості та рекомендацій у вітчизняній та іноземній літературі.

Запропоновано систему спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь MI на різних етапах їх життєвого циклу. Проведені дослідження дозволили розробити загальні положення щодо підвищення якості робочих поверхонь металорізабельного інструменту (MI) в залежності від вимог експлуатації. Вживаючи запропоновану методiku вирішення задачі спрямованого вибору технології підвищення якості робочих поверхонь MI, можна вирішувати як пряму, та і зворотню задачу – визначати знос, виражений реальною шорсткістю поверхні, по відомій роботі тертя, і навпаки – по відомому зносу, вираженого існуючою шорсткістю поверхні, передбачати потрібну для цього роботу тертя, тобто час потрібний для виконання цієї роботи. В свою чергу, знаючи час досягнення певної величини зносу MI, з'являється можливість для раціональної його експлуатації, вчасно призначати час для переточування і зміцнення не дозволяючи настання катастрофічного зносу. Використовуючи запропоновану математичну модель (1-6), з'являється можливість достовірно прогнозувати величину зносу робочих поверхонь MI сформованих тим чи іншим способом. При цьому константи рівняння зношування (енергія активації процесу зношування (E_A) і максимально допустимий знос, (ΔRa_{max}) є критерії для вибору найбільш раціональної технології підвищення якості інструменту. Знаючи величину зношування за певний час, а також величину витрат на виконання тієї чи іншої технології, ми вибираємо необхідну технологію підвищення якості MI.

Ключові слова: металорізабельний інструмент, знос, поверхневий шар, система спрямованого вибору, математична модель, критерії вибору.

DOI <https://doi.org/10.32782/msnau.2024.4.4>

Вступ. Надійність і якість металоріжучого інструменту (MI), що використовуються в процеси механічної обробки, істотно впливає на якість різноманітної обробки, стан деталей і всю ефективність виробництва. Вибір MI, що забезпечують надійність роботи протягом тривалого часу в широкому діапазоні зміни параметрів обробки, є однією з основних проблем, що виникають при проектуванні технологічного процесу (ТП) виготовлення деталей.

Як правило, головною причиною відмов MI є знос ріжучої кромки і як результат, підвищення відсотку браку, зменшення продуктивності всього ТП, зростання витрат на відновлення і порушень в технологічній системі (Zatulenکو & Zaiets, 2018).

Знос MI, як правило відбувається одночасно по його передній і задній поверхні і може супроводжуватись утворенням кратерів або навпаки наростів, що може негативно позначитися на поверхні обробки виготовлених деталей і бути причиною дорогої переробки. Також злам інструменту може призвести до зламування деталі, виходу з ладу і зупинки дорогого обладнання, навіть виведення з ладу всієї виробничої лінії.

Щоб уникнути збоїв і пов'язаних з ними наслідків, MI часто замінюють задовго до закінчення терміну їх корисного використання. Лише 50–80% очікуваного терміну служби інструменту зазвичай використовується (Zatulenکو & Zaiets, 2018).

Таким чином, підвищення довговічності MI, що використовуються на виробництві є актуальним і своєчасним.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел показав, що процес зношування MI істотно відрізняється від зношування поверхонь деталей. Згідно (Kogobov & Preis, 1976) умови роботи MI викликають інтенсивний знос поверхонь, який в тисячу разів перевершує інтенсивність зношування поверхонь тертя деталей машин. Така різниця в інтенсивності зношування пояснюється особливостями умов роботи MI до яких слід віднести: дуже великий питомий тиск на поверхні MI, можливе підвищення температури до величин при яких відбуваються фазові перетворення, що може призвести до зниження твердості ріжучої кромки і її швидкого притуплення, шкрябання і пошкодження утвореною стружкою опрацьованих і постійне оновлених поверхонь тертя деталі.

Знос ріжучих інструментів ще більш значний при обробці твердих і крихких матеріалів, які в загалом характеризуються як «важкі для обробки». Обробка таких матеріалів може призвести до дуже високого зносу як бокових так і торцевих поверхонь МІ. На практиці вартість інструментів у разі гнучкої виробничі системи становлять приблизно 25 % загальна вартість обробки (Sakharov et al., 1990).

Загалом ресурс МІ характеризується стохастичністю і його точний прогноз досить складний. Застосування методів надійності може дозволити розрахунок ресурсу інструменту з урахуванням експериментально спостережуваного розподілу діючих разів до відмови.

Існує низка доповідей на тему надійності МІ при різних умовах різання. Карлсон і Стренд (Carlson & Strand, 1992) представили статистичну модель для прогнозування довговічності інструменту як стратегію частинного контролю. Основою їх моделювання було подовжене Рівняння Тейлора.

Wang та ін. (Wang et al., 2001) розробили залежну від надійності модель частоти відмов для прогнозування надійності МІ. Клім та ін. (Klim et al., 1996) запропонував модель надійності з урахуванням як бокового, так і лицевого зносу МІ. Дін і Хе (Ding & He, 2011) вивчали надійність МІ через модель пропорційної небезпеки.

Резервом підвищення якості МІ може бути створення на поверхнях, які зношуються захисних шарів, сформованих як за рахунок нанесених покриттів: конденсацією іонним бомбардуванням (КІБ), електроіскровим легуванням (ЕІЛ), шлікерним методом, різними видами напилювання тощо або шляхом використання зміцнюючих технологій: струмом високої частоти (СВЧ), лазерною обробкою (ЛО), хіміко-термічними методами (ХТО) азотуванням, цементацією, нітроцементацією та іншими. Створення на поверхнях МІ зносостійких захисних шарів, нанесених на тверду і міцну підкладку, дозволяє виготовити інструмент з композиційного матеріалу необхідної міцності, надійності і довговічності, а також з особливими властивостями (Tarelnyk et al., 2011).

Враховуючи те, що не всі матеріали можуть використовуватися для поверхонь МІ, їх вибір має вирішальне значення.

У літературі відсутні комплексні дослідження, спрямовані на розробку технології вибору необхідного матеріалу МІ та їх елементів, використання якої забезпечить максимальний ресурс їх роботи. Не одна з наявних у літературних джерелах рекомендацій щодо вибору матеріалів МІ не є універсальною.

Метою цієї роботи є розробка системи та критеріїв спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь МІ шляхом аналізу та синтезу існуючих аналогів, досвіду промисловості та рекомендацій у вітчизняній та іноземній літературі.

Виклад основного матеріалу досліджень. Система спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь МІ охоплює весь їх життєвий цикл (рис. 1), що включає в себе наступні етапи:

- підготовку виробництва, де визначаються його конструктивні особливості, матеріал різальної частини інструменту і державки, необхідні властивості їх поверхневих шарів і технологію забезпечення цих властивостей;
 - виробництво, яке включає в себе вибір способу отримання заготовки, її механічну обробку, з'єднання ріжучої частини з державкою, проміжний контроль якості, нанесення зміцнюючих покриттів на різальну частину інструменту карбідом і нітридом титану, окислом алюмінію тощо, завершальний контроль;
 - експлуатацію з використанням технології, що забезпечує максимальне застосування МІ до наступної переточки і/або нанесення зміцнюючих покриттів;
 - утилізацію, яка повинна враховувати не тільки матеріал з якого виготовлені МІ, а і в яких умовах вони працювали і які матеріали обробляли, так інструменти, які використовували при ремонтних роботах на АЕС повинні проходити утилізацію з спеціальними вимогами.
- Всі представлені на рис. 1 етапи розглядаються через спеціальні методи спрямованого вибору. При цьому



Рис. 1. Використання системи спрямованого вибору технології забезпечення необхідної якості робочих поверхонь МІ на різних етапах життєвого циклу

необхідно враховувати, що кожний з обраних методів впливає один на одного і кінцева якість МІ буде залежати від їх послідовності.

Під час проведення наукових досліджень потрібно використовувати системний підхід, який забезпечує належне застосування спрямованого вибору технологій забезпечення необхідної якості робочих поверхонь МІ на усіх стадіях їх життєвого циклу.

Проблеми пов'язані з підвищенням зносостійкості МІ необхідно вирішувати в тісному зв'язку між конструкторськими, технологічними і триботехнічними вимогами. Вибір більш раціонального матеріалу МІ відбувається лише тоді, коли проаналізовані конструкційні та триботехнічні характеристики схеми різання та режимів роботи.

Якість поверхонь виробів значною мірою залежить від способу її формування ще на стадії механічної обробки, починаючи від способу позиціонування заготовки на верстатах (Kotliar et al., 2020) і враховуючи всю механічну систему «приспособлення–заготовка» (Ivanov et al., 2018; Ivanov et al., 2019). Питання підвищення якості робочих поверхонь деталей машин і механізмів, конструювання їх поверхневих шарів може бути вирішено геометричними методами, які дозволяють отримати кращу геометричну форму деталі більш раціональними методами (Пулурака et al., 2020).

Аналіз відповідних наукових робіт і проведення самостійних досліджень, дозволить обрати більш раціональну заготовку для МІ, його термічну обробку, а також більш економічно обґрунтовані методи механічної обробки. Результати проведених досліджень будуть корисними і при виконанні складального процесу тому що на цьому етапі остаточно з'являються потрібні властивості інструменту. Не менше значення для отримання якісного МІ мають методи контролю.

Володіючи повною технічною характеристикою МІ (матеріал, параметри якості робочих поверхонь тощо), можна управляти процесами його більш раціональної експлуатації, відновлення працездатності на стадії ремонту і раціональної утилізації.

На рис. 2 представлений набір методів для досягнення необхідної якості робочих поверхонь МІ, які складають практичну область застосування результатів виконаних наукових досліджень.

При рішенні задач, пов'язаних з підвищенням якості робочих поверхонь МІ, потрібно користуватись не тільки

вартістю окремих операцій, а й їх впливу на екологічну безпеку. Тобто потрібно обирати менш вартісні операції з низки екологічно безпечних, а затрати на підтримку екології враховувати до загальних витрат. Потрібно відмітити, що першим етапом можна обирати більш економічні операції, а серед них більш дешеві екологічно безпечні. Тоді екологічні характеристики можна використовувати в якості самостійних критеріїв оптимізації більш раціональних варіантів.

В процесі роботи робочі поверхні МІ підлягають механічному впливу (абразивному зносу) і дії молекулярно-термічних процесів (адгезійному і дифузійному зносам) і як результат зношуються.

Згідно (Zatulenko & Zaiets, 2018) при графічному зображенні (рис. 3) крива величини зносу має три основні ділянки: 1 – початковий прискорений знос, який триває всього декілька хвилин. На цій ділянці відбувається прискорений знос, коли зрізаються та деформуються виступаючі окремі ділянки на ріжучій кромці інструменту; 2 – період найбільш тривалої роботи інструменту, який відмічається нормальним (сталим) зносом. В цей період знос плавно збільшується по мірі зростання часу роботи; 3 – період катастрофічного зношування, аж навіть до поломки інструменту.

При виборі раціональної технології підвищення якості робочих поверхонь МІ в якості критеріїв використовують: повний знос ріжучої кромки, кількість виготовлених деталей, поява характерного пилу або вібрації тощо. Ці критерії не гарантують повного використання МІ до настання етапу катастрофічного зносу, після якого інструмент більш неможливо використовувати. Тому нами розглядається процес нормального тертя та зношування до настання катастрофічного зносу. Нормальні процеси визначають ресурси роботи МІ – їх довговічність, продуктивність і економічність.

Система тертя є істотно термодинамічної, а закономірності перетворення енергії із зовнішньої механічної в енергію внутрішніх процесів визначаються структурним станом матеріалів, видом кристалічних ґрат і фізико-хімічним дією мастильних середовищ.

Зміна енергії системи тертя за рахунок запасеної енергії викликає значні зміни властивостей інструменту і стан його робочої поверхні. Багато властивостей тіл пов'язані зі зміною їх вільної енергії при зовнішньому



Рис. 2. Методи досягнення необхідної якості робочих поверхонь МІ

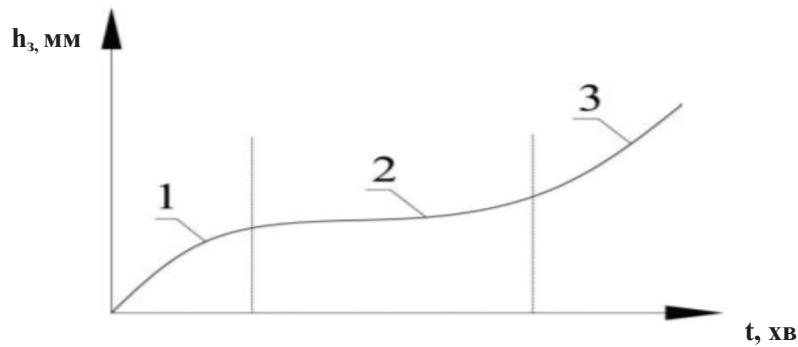


Рис. 3. Графік зміни зносу інструменту за час його роботи [1]

впливі, яка, у свою чергу, визначає зміну властивостей і розмірів тіла.

Таким чином, основними при оцінці того чи іншого методу досягнення необхідної якості робочої поверхні МІ повинні бути енергетичні та економічні критерії. Гідність енергетичного підходу полягає в можливості інтегрального опису за допомогою енергетичних критеріїв впливу численних параметрів, від яких залежать процеси зносу МІ.

Нижче розглянуті енергетичні критерії, що надають визначальний вплив на зносостійкість сформованих різними технологіями робочі поверхні МІ.

Слід відмітити, що в процесі використання МІ відбуваються значні механічні навантаження, які з'являються при зовнішньому терті робочих поверхонь інструменту об поверхню оброблюваного матеріалу. В результаті цього процесу змінюються фізико-механічні властивості поверхневих шарів та їх радикальна трансформація, тобто механічна енергія викликає хімічні реакції. Тому за критерій зносу можна прийняти енергію активації процесу зносу E_A .

При нормальному терті, на 1-й і 2-й стадіях початкового і нормального (сталого) зносу (рис. 4) між шорсткістю поверхні (ΔRa) і роботою, витраченою на тертя ($A_{тр}$), що ініціює цей знос, в першому наближенні існує експоненційно зростаюча залежність.

Зі збільшенням величини роботи, витраченої тертя, знос збільшується тим більше, що більше енергія активації E_A .

Таким чином, виходячи з експериментальної залежності ΔRa від $(-A_{тр})^{-1}$ (зменшувальна експонента), можна зробити висновок, що $\ln \Delta Ra$ пропорційно $(-A_{тр})^{-1}$ та величині E_A , тобто

$$\ln \Delta Ra \sim (-A_{тр})^{-1}, EA \quad (1)$$

Переходячи від наближеної рівності до точної

$$\Delta Ra = C \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}} \quad (2)$$

де $C = \Delta Ra_{max}$ – максимально допустимий знос
Тоді

$$\Delta Ra = \Delta Ra_{max} \cdot e^{\frac{-E_A}{A_{тр}}} \quad (3)$$

Залежність (3) назвемо рівнянням зносу. Визначаючи в формулі (3)

$$E_A = A_{тр} \cdot \quad (4)$$

маємо:

$$\frac{\Delta Ra}{\Delta Ra_{max}} = e^{-1}. \quad (5)$$

Таким чином E_A – це така фізична величина, яка дорівнює такій роботі тертя, при якій $\Delta Ra = \frac{\Delta Ra_{max}}{e}$, тобто ΔRa в e раз менше ΔRa_{max} . Назвемо її константою зносу ЕІЛ робочих поверхонь МІ. Розмірність $[E_A] = \text{Дж}$.

Величину роботи тертя, необхідну для отримання зносу, вираженого конкретною шорсткістю (ΔRa_x) можна визначити з рівняння (2).

Тоді відповідно маємо:

$$A_{тр} = \frac{E_A}{\ln \frac{\Delta Ra_{max}}{\Delta Ra_x}}; \quad (6)$$

Вживаючи методику вирішення задачі спрямованого вибору технології підвищення якості робочих поверхонь МІ, можна вирішувати як пряму, та і зворотну задачу – визначати знос, виражений реальною шорсткістю поверхні, по відомій роботі тертя, і навпаки – по відомому зносу, вираженому існуючою шорсткістю поверхні, передбачати потрібну для цього роботу тертя, тобто час потрібний для виконання цієї роботи. В свою чергу, знаючи час досягнення певної величини зносу МІ, з'являється можливість для раціональної його експлуатації, вчасно призначити час для переточування і зміцнення не дозволяючи настання катастрофічного зносу.

Використовуючи запропоновану математичну модель (1-6), з'являється можливість достовірно прогнозувати величину зносу робочих поверхонь МІ сформованих тим чи іншим способом. При цьому константи рівняння зношування (енергія активації процесу зношування, E_A і максимально допустимий знос, ΔRa_{max}) є критерії для вибору найбільш раціональної технології підвищення якості інструменту.

Знаючи величину зношування за певний час, а також величину витрат на виконання тієї чи іншої технології, ми вибираємо необхідну технологію підвищення якості МІ.

Висновки:

1. Проведені дослідження дозволили розробити загальні положення щодо підвищення якості робочих

поверхонь металорізального інструменту (МІ) в залежності від вимог експлуатації.

2. Запропоновано систему спрямованого вибору технологій формування робочих поверхонь МІ, що враховує всі стадії їх життєвого циклу.

3. Для досягнення заданої якості робочих поверхонь МІ, залежно від її виду та вимог до неї, можуть бути використані як окремі методи, так і їх комбінації.

4. Запропоновано фізично обґрунтовану математичну модель процесу зносу, зміцнених робочих поверхонь МІ при обробці деталей, що дозволяє по роботі тертя визначати знос, виражений зміною шорсткості поверхні.

5. Розроблено методику визначення константи зносу E_A для різних матеріалів пар тертя, а також константи рівняння зносу, вираженого зміною шорсткості поверхні – максимальному зносу.

Бібліографічні посилання:

1. Carlson, T.E., Strand F. (1992). A statistical model for prediction of tool life as a basis for economical optimization of the cutting process, *Annals of CIRP* 41/1, pp. 79-82.
2. Ding, F., He., Z. (2011) Cutting tool wear monitoring for reliability analysis using proportional hazards model, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 57, pp. 565-574.
3. Ivanov, V., Dehtiarov, I., Denysenko, Y., Malovana, N., and Martynova, N. (2018). Experimental diagnostic research of fixture. *Diagnostyka*, 19(3), pp.3-9. <https://doi.org/10.29354/diag/92293>.
4. Ivanov, V., Dehtiarov, I., Pavlenko, I., Kosov, M., Hatala, M. (2020). Technological Assurance and Features of Fork-Type Parts Machining. In: Ivanov, V., et al. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing II. DSMIE 2019. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-22365-6_12
5. Klim, Z., Ennajimi, E., Balazinski, M., Fortin, C. (1996). Cutting tool reliability analysis for variable feed milling of 17-4PH stainless steel, *Wear* 195, pp. 206-213.
6. Korobov Yu.M., Preis H. A. (1976). *Elektromekhanichniy znos pry terti i rizanni metaliv* [Electromechanical wear during friction and cutting of metals]. – Kyiv: Tekhnika. – 200 s. [in Ukrainian]
7. Kotliar, Y. Basova, V. Ivanov, O. Murzabulatova, S. Vasytsova, M. Litvynenko, and O. Zinchenko (2020). Ensuring the economic efficiency of enterprises by multi-criteria selection of the optimal manufacturing process. *Management and Production Engineering Review*, 11, No. 1: 52.
8. Pylypaka, S., Volina, T., Mukvich, M., Efremova, G., Kozlova, O. (2020). Gravitational Relief with Spiral Gutters, Formed by the Screw Movement of the Sinusoid. In: Ivanov, V., Pavlenko, I., Liaposhchenko, O., Machado, J., Edl, M. (eds) *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III. DSMIE 2020. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50491-5_7.
9. Sakharov, G.N., Ilyikh, V., Konyukhov, Yu. V. (1990). Improvement of fastening elements in an assembled cutting tool, *Soviet engineering research*, 10/11, pp. 102-103.
10. Tarelnyk V.B., Konoplianchenko Ye. V., Martsynkovskiy V.S. ta in. (2011). *Pidvyshchennia stiiikosti rizalnoho instrumentu tekhnolohichnyy metodamy: navch. posibnyk* [Increasing the durability of cutting tools using technological methods: a training manual] *Pid redaktsiieiu profesora Tarelnyka V.B.* – Sumy: Universytetska knyha. – 189 s.
11. Wang, K.-S., Lin, W.-S., Hsu, F.-S. (2001). A New Approach for Determining the Reliability of a Cutting Tool, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 17, pp. 705-709.
12. Zatulenko A. S., Zaiets S.S. (2018). *Vplyv protsesu znoshuvannia rizalnoho instrumentu na tochnist mekhanichnoi obrobky* [The impact of the cutting tool wear process on machining accuracy]. – XI vseukrainska naukovo-praktychna konferentsiia studentiv ta aspirantiv «POHLIAD U MAIBUTNIE PRYLADOBUDUVANNIA», 15-16 travnia 2018 roku, KPI im. Ihoria Sikorskoho, m. Kyiv, Ukraina. [in Ukrainian].

Dotsenko A. O., PhD student, Sumy National Agrarian University, Sumy, Ukraine

Target-specific choice of technology and setting the criteria for evaluating the most rational method for strengthening metal-cutting tools

The paper outlines the findings of the analysis of the literary sources and production experience on the choice of materials for metal-cutting tools (MCT) and the basic requirements for their manufacture and operation.

Considering that less than all materials can be used for MCT surfaces, their choice is of crucial importance. There are no comprehensive studies in the literature aimed at developing a technology for choosing the materials required for the MCT and their elements, the use of which would ensure the MCT maximum service life. None of the recommendations relative to the choice of the MCT materials, which are available in the literature, is universal. The purpose of this paper is to develop a system and criteria for performing the target-specific choice of a technology, which, on analyzing and synthesizing the existing analogs, industry experience and recommendations described in the national and foreign literatures, ensures the required quality of the MCT working surfaces.

A system for the target-specific choice of technology for ensuring the required quality of the MCT working surfaces at different stages of their life cycle has been proposed. The conducted studies enabled the authors to develop the general provisions on improving the quality of the MCT working surfaces depending on the requirements of operation. With the use of the proposed method for solving the problem of the target-specific choice of the technology for improving the quality of the MCT working surfaces, it is possible to solve both the direct straight and the inverse technical problems. Those are: to determine the wear expressed by the real surface roughness, based on the known friction work, and vice versa, based on the known wear expressed by the existing surface roughness, to predict the friction work required for this, that is, the time required to fulfill this work. In turn, having known the period of time for reaching a certain value of the MCT wear, a specialist obtains an opportunity to operate the MCT rationally, as well as to schedule the time for resharpening and strengthening

the MCT, preventing the build-up of the MCT catastrophic wear. With the use of the proposed mathematical model (1-6), it becomes possible to predict reliably the value of the wear for the MCT working surfaces formed by one or another method. In this case, the constants of the wear equation (the activation energy of the wear process (E_a) and the maximum allowable wear, (ΔRa_{max}) are the criteria for choosing the most rational technology for improving the MTC quality. Having known the amount of wear over a certain time, as well as the cost of implementing a particular technology, one can choose the necessary technology for improving the MTC quality.

Key words: metal-cutting tool, wear, surface layer, target-specific choice system, mathematical model, choice criteria.