

Є. В. МИРОНЕНКО, д-р техн. наук,
В. В. КАЛІНІЧЕНКО, канд. техн. наук, Краматорськ, Україна

АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКІВ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ТА ПОПЕРЕДНЬОГО ЗМІЦНЕННЯ ТВЕРДОГО СПЛАВУ З ІНТЕГРАЛЬНИМ ЕНЕРГЕТИЧНИМ КРИТЕРІЄМ ПРИ ЧИСТОВОМУ ТОЧІННІ СТАЛЕЙ

У статті представлені основні теоретичні підходи до аналізу зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання при чистовій обробці сталей гострінням твердосплавним інструментом з режимами різання й попереднього зміцнення твердого сплаву.

В статье представлены основные теоретические подходы к анализу связей интегрального энергетического критерия процесса резания при чистовой обработке сталей точением твердосплавным инструментом с режимами резания и первичного замещения твердого сплава.

In the article the basic theoretical approaches of the forming of connections system of cutting process' integral power criterion with the cutting modes and strengthening modes of instrument at steels sharp turning are presented. The hard-alloy instrument is approved by previous strengthening influence.

Постановка проблеми

Неухильне збільшення питомої ваги чистової токарної обробки в структурі технологічних процесів виготовлення сталевих деталей-тіл обертання обумовлює актуальність розробки моделей для розрахунково-аналітичного визначення оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними пластинами. Враховуючи широке використання методів зміцнення та нанесення зносостійких покриттів для підвищення стійкості твердосплавного інструменту, особливо актуальною є розробка подібних моделей для твердосплавного інструменту, підданого попередньому зміцнюючому енергетичному впливу (ЗЕВ).

Універсальні теоретичні моделі для визначення оптимальних режимів різання повинні базуватись на розгляді процесу різання як комплексу взаємопов'язаних явищ, інтенсивність кожного з яких може бути виражена через єдиний інтегральний енергетичний критерій. Значна кількість взаємопов'язаних фізичних процесів при точінні сталей твердосплавним інструментом зі зміцненням або зносостійким покриттям та залежність інтенсивності їхнього протікання від режимів різання і властивостей поверхневого шару інструменту, набутих ним в результаті

ЗЕВ, вимагає всебічного аналізу системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та ЗЕВ.

Аналіз досліджень та публікацій з проблеми, що розглядається

Розгляд процесу різання як комплексу взаємопов'язаних та взаємообумовлених фізичних явищ є загальною рисою робіт Ю. Г. Кабалдіна [1], В. С. Кушнера [2], О. Д. Макарова [3], С. С. Сіліна [4], В. К. Старкова [5], С. І. Тахмана [6], Л. Ш. Шустера [7], Ф. Я. Якубова [8] та інших. В якості параметрів, що обумовлюють інтенсивність фізичних явищ при різанні, в першу чергу – інтенсивність зношування інструменту, як основного фактору, що визначає працездатність різців при чистовому точінні, в розглянутих роботах використовуються показники, які за своєю сутністю є енергетичними: температура різання (показник, пов'язаний з кількістю теплової енергії в зоні різання) [3], накопичена внутрішня енергія поверхневого шару інструменту [8], прихована енергія деформування зрізаного шару та прихована енергія деформування поверхневого шару обробленої деталі [5]. Теоретичні концепції та рекомендації, наведені в роботах [1–8], створюють широке поле рішень для вибору оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей твердосплавними різцями.

Разом з тим, в перерахованих роботах відсутній вичерпний аналіз взаємних зв'язків всіх фізичних процесів та енергетичних перетворень в зоні різання. Акцент зроблений на залежності інтенсивності зношування інструменту від безумовно важливих, але все ж таки часткових показників енергетичного стану зони різання, кожен з яких не може бути визнаний інтегральним енергетичним критерієм в силу нехтування тими чи іншими фізичними явищами, визнаними авторами концепцій як малозначимі. Вищевказане обумовлює необхідність розробки універсальної теоретичної моделі процесу різання, що враховувала б зв'язки всіх різних за природою фізичних явищ (та, відповідно, енергетичних перетворень), які впливають на інтенсивність зношування інструменту. У випадку точіння інструментом, підданим попередньому ЗЕВ, така модель повинна також враховувати вплив величини потоку енергії, що надходить до поверхневого шару інструменту при зміцненні або нанесенні покриття, спричиняючи трансформацію характеристик процесу різання та зміну інтенсивності зношування різця.

Загальні принципи розробки подібної моделі процесу різання для чистового точіння сталей твердосплавним інструментом зі зміцненням або зносостійким покриттям наведені в попередніх роботах авторів [9, 10]. В них передбачається вираження цільової функції та системи обмежень через інтегральний енергетичний критерій e процесу різання, що дорівнює співвідношенню питомої енергії відокремлення одиниці маси (об'єму) оброблюваного матеріалу (або питомої енергії утворення одиниці площі

обробленої поверхні), та питомої енергії диспергування одиниці маси (об'єму) твердого сплаву при зношуванні різальної пластини.

Огляд невирішених частин проблеми

Розгляд комплексу фізичних та енергетичних явищ при різанні в проаналізованих роботах базується на виділенні одного найважливішого явища (комплексу явищ), що визначає інтенсивність зношування інструменту, при цьому впливом інших фізичних явищ на процес різання в тій чи іншій мірі нехтують. Режими різання, вибрані на основі рекомендацій цих робіт, можна вважати оптимальними лише з чітко вказаними припущеннями.

Наприклад, в роботі О. Д. Макарова [3] в якості показника, що справляє визначальний вплив на інтенсивність зношування інструменту та характеристики процесу різання, використовується температура різання. Такий підхід зводить енергетичний баланс зони різання до теплового балансу, при цьому не враховується нетеплова складова енергії процесу різання, яка, хоч і є незначною у порівнянні з тепловою, здатна серйозно впливати на фізичні процеси в контактних мікрооб'ємах матеріалів, зокрема на процес диспергування часток поверхневого шару інструменту. В роботі Ф. Я. Якубова [8], навпаки, більшу увагу приділено процесам зміни величини внутрішньої енергії в контактній зоні та поверхневому шарі інструменту і їхньому впливу на диспергування часток інструментального матеріалу. Наголос на ролі нетеплової складової енергії процесу різання в зношуванні інструменту, в свою чергу, призводить до нівелювання ролі теплових явищ в цьому процесі. В моделі процесу різання, розробленій В. К. Старковим [5], ключовими характеристиками є значення прихованої енергії деформування зрізаного шару та прихованої енергії деформування поверхневого шару обробленої деталі, а в якості основного комплексу явищ при різанні розглядається деформація матеріалу заготовки, при цьому нівелюється роль процесів тертя.

В проаналізованих роботах не приділяється окремої уваги енергетичному стану зони різання при обробці інструментом зі зміцненням чи покриттям та зв'язку інтенсивності фізичних явищ при різанні з величиною енергії, що надходить до поверхневого шару інструменту при ЗЕВ.

Універсальна модель процесу різання не може базуватись на домінуванні комплексу явищ тільки однієї фізичної природи. Інтегральний енергетичний критерій процесу різання повинен враховувати співвідношення інтенсивності всіх енергетичних перетворень в зоні різання. При цьому загальна величина зовнішньої енергії, яка надходить до зони різання, визначатиметься величиною роботи різних сил, що витрачається на здійснення стружкоутворення, тертя та інших фізичних

процесів при різанні. В той же час величина внутрішньої енергії поверхневого шару різального інструменту, що братиме участь в контактних процесах та зазнаватиме зношування, формується за рахунок прирощення початкового значення внутрішньої енергії в результаті ЗЕВ; інтенсивність прирощення залежатиме від режимів ЗЕВ.

В зв'язку з вищевказаним, важливою задачею є аналіз системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та попереднього ЗЕВ.

Мета статті – на основі аналізу енергетичних перетворень при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними різальними пластинами зі зміцненням або зносостійким покриттям сформулювати систему зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та ЗЕВ.

Основна частина

При чистовому точінні стійкість інструменту і технологічні характеристики деталей визначаються інтенсивністю зношування різців. Відповідно, умовою оптимальності процесу різання має бути найменша питома інтенсивність зношування різців при відокремленні одиниці маси зрізаного шару (або утворенні одиниці площі обробленої поверхні). Тому інтегральний енергетичний критерій e визначаємо як:

$$e = \frac{e_m}{e_d} \quad (1)$$

або
$$e = \frac{e_s}{e_d}, \quad (2)$$

де e_m – питома енергія відокремлення одиниці маси оброблюваного матеріалу; e_s – питома енергія утворення одиниці площі обробленої поверхні; e_d – питома енергія диспергування одиниці маси твердого сплаву при зношуванні різальної пластини.

Основною задачею чистової токарної обробки, на відміну від чорнкової та напівчистової, є не зняття якнайбільшого припуску, а утворення якнайбільшої площі нових поверхонь деталі заданої точності та якості за одиницю часу. Тому, при формулюванні виразу для інтегрального енергетичного критерію в кінцевому вигляді краще використовувати формулу (2). Але оскільки в системі зв'язків фізичних процесів в зоні різання визначальним процесом є зняття матеріалу заготовки з перетворенням його на стружку внаслідок пластичної деформації, і саме на здійснення цієї деформації витрачається найбільша складова механічної роботи сил в зоні різання [5], то в проміжних розрахунках при формуванні

теоретичної моделі процесу різання може використовуватись формула (1). Однакова прийнятність формул (1) та (2) повинна базуватись на логічному зв'язку між процесами відокремлення матеріалу зрізаного шару та утворення внаслідок цього нової поверхні, що може бути виражений принциповою залежністю типу:

$$e_s = k \cdot e_m, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт, що встановлює співвідношення між площею утвореної поверхні та масою знятого зрізаного шару;

Величини e_m , e_s та e_d можна визначити як:

$$e_m = \frac{E_{зр}}{m}; \quad (4)$$

$$e_s = \frac{E_{утв.нов}}{S}; \quad (5)$$

$$e_d = \frac{E_{зн}}{m_d}, \quad (6)$$

де $E_{зр}$ – сумарна енергія, що витрачається на різання шару матеріалу заготовки при різанні; $E_{утв.нов}$ – сумарна енергія, що витрачається на утворення нових поверхонь при різанні; $E_{зн}$ – енергія, що витрачається на диспергування часток інструментального матеріалу при зношуванні різців; m – маса зрізаного шару, видаленого в процесі різання; S – площа нових поверхонь, утворених в результаті різання; m_d – сумарна маса часток інструментального матеріалу, диспергованих при зношуванні інструменту.

Критерій e в виразах (1) та (2) трактуємо як співвідношення «корисної» та «шкідливої» складових енергії процесу різання. «Корисна» складова енергії витрачається на утворення нової поверхні (зняття зрізаного шару), «шкідлива» – на зношування інструменту. Оптимальним умовам різання відповідає максимум e , тобто якнайбільша питома частка «корисної» складової в загальному енергетичному балансі зони різання. Згідно з (1–6)

$$e = \frac{e_s}{e_d} = \frac{k \cdot e_m}{e_d} = \frac{E_{утв.нов} \cdot m_d}{E_{зн} \cdot S} = k \cdot \frac{E_{зр} \cdot m_d}{E_{зн} \cdot m} \rightarrow \max. \quad (7)$$

Розглянемо енергетичний баланс в зоні різання при чистовому точінні сталей твердосплавним інструментом, підданим ЗЕВ. Згідно з роботою [8], закон збереження енергії в процесі різання виражається в перетворенні роботи $A_{різ}$ різання на теплову енергію Q та внутрішню енергію деформації ΔU , яка, в свою чергу, складається з набутої в результаті різання внутрішньої енергії деформованих об'ємів стружки $\Delta U_{стр}$, робочих поверхонь інструменту $\Delta U_{інстр}$ та поверхневих шарів деталі $\Delta U_{дет}$:

$$A_{різ} = Q \pm \Delta U = Q \pm (\Delta U_{стр} + \Delta U_{інстр} + \Delta U_{дет}). \quad (8)$$

Представимо $A_{різ}$ як суму роботи $A_{деф}$ деформації зсуву при стружкоутворенні, роботи $A_{м.н}$ сили тертя по передній поверхні та роботи $A_{м.з}$ сили тертя по задній поверхні. Оскільки початковий енергетичний стан зони різання залежатиме, окрім іншого, і від внутрішньої енергії контактних шарів інструменту та заготовки, пропонуємо доповнити ліву частину рівняння (8) наявними на початок різання значеннями внутрішньої енергії поверхневого шару інструменту $U_{інстр}$ та заготовки $U_{заг} = const$. Для інструменту, підданого ЗЕВ, $U_{інстр}$ дорівнює сумі початкової внутрішньої енергії $U_{інстрп}$ поверхневого шару інструменту до ЗЕВ (прийmemo, що $U_{інстрп} = const$) та прирощення внутрішньої енергії $\Delta U_{інстрЗЕВ}$ за рахунок зовнішнього потоку енергії при зміцненні або нанесенні покриття. Теплову енергію Q представимо як суму теплових енергій деформації ($Q_{деф}$), тертя по передній поверхні ($Q_{м.н}$), тертя по задній поверхні ($Q_{м.з}$) та диспергування ($Q_{дисп}$). Енергія $Q_{деф}$ розподіляється між тепловими потоками, що надходять відповідно до стружки ($Q_{дефстр}$) та до обробленої деталі ($Q_{дефдет}$), $Q_{м.н}$ – між потоками, що надходять до стружки ($Q_{м.нстр}$) та до інструменту ($Q_{м.нінстр}$), а $Q_{м.з}$ – між потоками, що надходять до обробленої деталі ($Q_{м.здет}$) та до інструменту ($Q_{м.зінстр}$). Значення $\Delta U_{інстр}$ та $\Delta U_{дет}$ трактуємо як прирощення величин $U_{інстр}$ та $U_{заг}$ при різанні.

З урахуванням вищеперерахованого, рівняння (8) має вигляд:

$$A_{деф} + A_{м.з} + A_{м.н} + U_{інстрп} + \Delta U_{інстрЗЕВ} + U_{заг} =$$

$$\begin{aligned}
&= Q_{\text{деф}_{\text{стр}}} + Q_{\text{деф}_{\text{дет}}} + Q_{m.n_{\text{стр}}} + Q_{m.n_{\text{інстр}}} + \\
&+ Q_{m.z_{\text{дет}}} + Q_{m.z_{\text{інстр}}} + Q_{\text{дисп}} \pm (\Delta U_{\text{стр}} + \Delta U_{\text{інстр}} + \Delta U_{\text{дет}}).
\end{aligned} \tag{9}$$

Наведений вигляд рівняння враховує всі енергетичні чинники процесу різання різної фізичної природи. Для всебічного аналізу системи зв'язків інтегрального енергетичного критерію e з режимами різання та ЗЕВ потрібно вирішити дві задачі:

1) аналіз зв'язків складових енергії, утвореної при різанні, з величинами $E_{\text{зр}}$, $E_{\text{утв.нов}}$, $E_{\text{зн}}$, і відтак, – з величиною e .

2) аналіз зв'язків вхідних параметрів (режимів різання та ЗЕВ) зі складовими енергії, що надходить до зони різання.

Першу задачу пропонується в загальному плані вирішувати виділенням в кожній зі складових правої частини рівняння (9) «корисної» та «шкідливої» частин, що можна відобразити як:

$$\begin{aligned}
&Q_{\text{деф}_{\text{стр}}} + Q_{\text{деф}_{\text{дет}}} + Q_{m.n_{\text{стр}}} + Q_{m.n_{\text{інстр}}} + \\
&+ Q_{m.z_{\text{дет}}} + Q_{m.z_{\text{інстр}}} + Q_{\text{дисп}} \pm (\Delta U_{\text{стр}} + \Delta U_{\text{інстр}} + \Delta U_{\text{дет}}) = \\
&= \sum_{i=1}^n Q_{\text{корі}} + \sum_{i=1}^n Q_{\text{шк}_i} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{\text{кор}_j} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{\text{шк}_j},
\end{aligned} \tag{10}$$

де $Q_{\text{корі}}$, $\Delta U_{\text{кор}_j}$ – «корисні» частини складових теплової енергії та прирощення внутрішньої енергії; $Q_{\text{шк}_i}$, $\Delta U_{\text{шк}_j}$ – «шкідливі» частини складових теплової енергії та прирощення внутрішньої енергії; n , m – кількість відповідно «корисних» та «шкідливих» частин складових енергетичного балансу.

«Корисною» частиною енергетичного балансу вважатимемо постійний для заданої пари «твердий слав – оброблювана сталь» мінімум теплової енергії чи будь-якого прирощення внутрішньої енергії, необхідний та достатній для утворення обробленої поверхні при знятті шару матеріалу з заданим перетином зрізу. Надлишок складової енергії, що перевищує цей мінімум, вважатимемо «шкідливою» частиною, яка витрачається на інтенсифікацію контактних процесів, і, відповідно, – на зношування інструменту. При виділенні «корисних» та «шкідливих» частин складових енергетичного балансу потрібно дотримуватись наступних правил:

- теплові потоки $Q_{m.n_{instr}}$ та $Q_{m.z_{instr}}$ належать до «шкідливих» частин, оскільки знижують механічні властивості твердого сплаву та інтенсифікують зношування інструменту;
- кожен з теплових потоків $Q_{def_{cnp}}$, $Q_{def_{det}}$, $Q_{m.n_{cnp}}$, $Q_{m.z_{det}}$ розподіляється на «корисну» та «шкідливу» частини за принципом: $Q_{кор} = Q_{кр}$; $Q_{шк} = Q - Q_{кр}$, де Q – теплова енергія потоку, що розглядається; $Q_{кр}$ – критичний рівень теплової енергії даного потоку, досягнення якого спричиняє початок дифузійного зношування контактного майданчику інструменту;
- прирощення ΔU_{instr} внутрішньої енергії при різанні розподіляється на «корисну» та «шкідливу» частини за принципом: $\Delta U_{instr_{кор}} = \Delta U_{instr_{кр}}$; $\Delta U_{instr_{шк}} = \Delta U_{instr} - \Delta U_{instr_{кр}}$, де $\Delta U_{instr_{кр}}$ – критичний рівень прирощення ΔU_{instr} , досягнення якого викликає початок знеміцнення поверхневого шару інструменту;
- прирощення внутрішніх енергій ΔU_{cnp} та ΔU_{det} розподіляються на «корисну» та «шкідливу» частину за принципом: $\Delta U_{шк} = \Delta U_{кр}$, $\Delta U_{кор} = \Delta U - \Delta U_{кр}$, де $\Delta U_{кр}$ – критичний рівень прирощення внутрішньої енергії стружки або поверхневого шару деталі, після досягнення якого починається їхнє знеміцнення (це визначення приймається для випадків, коли окремо не оговорюються вимоги до зміцнення поверхневого шару деталі).

З урахуванням вищевикладеного приймаємо, що:

$$E_{зр} = E_{утв.нов} = \sum_{i=1}^n Q_{корі} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{корj}, \quad (11)$$

$$E_{зн} = \sum_{i=1}^n Q_{шкi} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{шкj}. \quad (12)$$

Друга задача вирішується встановленням залежності складових лівої частини рівняння (9) від режимів різання та ЗЕВ. Для цього вводимо поняття енергетичних функцій (ЕФ) режимів різання та ЗЕВ:

- *ЕФ режимів різання* – сумарна кількість енергії, що надходить до зони різання в результаті роботи $A_{різ} = A_{def} + A_{m.z} + A_{m.n}$, і залежить від режимів різання (згідно з моделлю роботи [10] – оптимізовуваних

параметрів 1-ої групи $x_i^{(1)}$, а також прийнятої як константа глибини різання t): $e_{p.pіз} = A_{деф} + A_{m.з} + A_{m.n} = f(x_1^{(1)}, \dots, x_i^{(1)}, \dots, x_n^{(1)}) = f(v, S, t)$;

– *ЕФ режимів ЗЕВ* – енергія, що надходить до об'єму твердого сплаву при дії ЗЕВ: $e_{p.ЗЕВ} = \Delta U_{інстрЗЕВ} = k_{емр} \cdot E_{ЗЕВ} = f(x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$, де $E_{ЗЕВ}$ – енергія ЗЕВ, $k_{емр}$ – коефіцієнт, який враховує втрати енергії ЗЕВ, що не надійшла до поверхневого шару твердого сплаву під час його зміцнення або нанесення зносостійкого покриття, $x_i^{(2)}$ – режими ЗЕВ (згідно з моделлю роботи [10] – оптимізовані параметри 2-ої групи $x_i^{(2)}$).

Можливий перехресний вплив режимів різання та ЗЕВ на $A_{pіз}$ в разі потреби може бути врахований за допомогою спеціальної функції $F(v, S, t, x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)})$, логіка введення якої базується на зміні $A_{pіз}$ в результаті зміни фізико-механічних властивостей поверхневого шару твердого сплаву після ЗЕВ.

З урахуванням вищевикладеного приймаємо, що:

$$\begin{aligned} & A_{деф} + A_{m.з} + A_{m.n} + U_{інстрп} + \Delta U_{інстрЗЕВ} + U_{заг} = \\ & = e_{p.pіз} + e_{p.ЗЕВ} + F(v, S, t, x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)}) + U_{інстрп} + U_{заг}. \end{aligned} \quad (13)$$

Згідно з (1–13), в загальному плані інтегральний енергетичний критерій e процесу різання буде виражатись як:

$$\begin{aligned} e &= k \cdot \frac{m_d}{m} \cdot \frac{E_{зп}}{E_{зн}} = k \cdot \frac{m_d}{m} \cdot \frac{(E - E_{зн})}{E_{зн}} = k \cdot \frac{m_d}{m} \times \\ & \times \frac{\left(e_{p.pіз} + e_{p.ЗЕВ} + F(v, S, t, x_1^{(2)}, \dots, x_i^{(2)}, \dots, x_n^{(2)}) + U_{інстрп} + U_{заг} - \sum_{i=1}^n Q_{шкi} - \sum_{j=1}^m \Delta U_{шкj} \right)}{\sum_{i=1}^n Q_{шкi} + \sum_{j=1}^m \Delta U_{шкj}}. \end{aligned}$$

Отриманий вираз може бути в подальшому використаний для розробки функціональних залежностей інтегрального енергетичного критерію процесу різання від ЕФ режимів різання та ЗЕВ типу $e = f(e_{p.pіз}, e_{p.ЗЕВ})$ і, відповідно, залежностей e від режимів різання та ЗЕВ.

Висновки

В статті на основі аналізу енергетичних перетворень при чистовому точінні сталей різцями з твердосплавними різальними пластинами зі зміцненням або зносостійким покриттям була сформульована система зв'язків інтегрального енергетичного критерію процесу різання з режимами різання та зміцнюючого енергетичного впливу (ЗЕВ). Ця система базується на принципах:

– представлення величини e як співвідношення питомих енергій утворення одиниці площі поверхні деталі та диспергування одиниці маси твердого сплаву при зношуванні різальної пластини;

– врахування в енергетичному балансі різання внутрішньої енергії контактних шарів інструменту і заготовки та прирощення внутрішньої енергії інструменту, деталі, стружки при різанні;

– представлення роботи різання як енергетичної функції режимів різання, а внутрішньої енергії поверхневого шару інструменту, підданого ЗЕВ, – як енергетичної функції ЗЕВ;

– вираження енергії, що витрачається на утворення нових поверхонь при різанні, та енергії, що витрачається на диспергування часток твердого сплаву при зношуванні різців, через спеціально виділені «корисні» та «шкідливі» частини в тепловій та нетепловій складових енергії, утвореної при різанні.

Перелік літератури: 1. *Кабалдин, Ю. Г.* Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания режущего инструмента / Ю. Г. Кабалдин // Вестник машиностроения, 1990. – № 12. – С. 62–68. 2. *Кушнер, В. С.* Термомеханическая теория процесса непрерывного резания пластичных материалов / В. С. Кушнер. – Иркутск : Изд-во Иркут. ун-та, 1982. – 196 с. 3. *Макаров, А. Д.* Оптимизация процессов резания / А. Д. Макаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 278 с. 4. *Силин, С. С.* Метод подобия при резании материалов / С. С. Силин. – М. : Машиностроение, 1979. – 152 с. 5. *Старков, В. К.* Дислокационные представления о резании металлов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 1979. – 158 с. 6. *Тахман, С. И.* Развитие теории изнашивания твердосплавных инструментов на основе термомеханики поведения их поверхностей при резании пластичных материалов. Автореферат дис... докт. техн. наук: 05.03.01. – ГОУ ВПО «Российский университет дружбы народов». – Москва, 2009. – 36 с. 7. *Шустер, Л. Ш.* Адгезионное взаимодействие режущего инструмента с обрабатываемым материалом / Л. Ш. Шустер. – М. : Машиностроение, 1988. – 96 с. 8. *Якубов, Ф. Я.* Энергетические соотношения процесса механической обработки материалов / Ф. Я. Якубов. – Ташкент : «Фан», 1985. – 104 с. 9. *Мироненко, Є. В.* Методологические принципы создания моделей для выбора режимов резания при чистовом точении сталей резцами с твердосплавными пластинами, подвергнутыми упрочняющему воздействию / Є. В. Мироненко, В. В. Калиниченко // Резание и инструмент в технологических системах : Междунар. науч.-техн. сб. – Харьков : НТУ «ХПИ», 2008. – Вып. 75. – С. 256–267. 10. *Мироненко, Є. В.* Загальні принципи розробки моделей для вибору оптимальних режимів різання при чистовому точінні сталей на основі використання енергетичного критерію / Є. В. Мироненко, В. В. Калініченко, В. Ф. Колесник // Сучасні технології в машинобудуванні [Текст] : зб. наук. праць. – Вип. 2. Редкол. : А. І. Грабченко (голова) [та ін.]. Харків : НТУ «ХП», 2008. – С. 48–57.