

УДК 621.822

**Заблоцький В.Ю.**, к.т.н., доц.\*, **Приступа С.О.**, асп.\*, **Дахнюк О.П.**\*\*

\* Луцький національний технічний університет

\*\* ДП Луцький ремонтний завод «МОТОР»

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ОПЕРАЦІЙ МЕХАНІЧНОГО ОБРОБЛЕННЯ

*В статті проведено аналіз різноманітних критеріїв оптимальності технологічних операцій механічного оброблення, які умовно можна розділити на економічні та фізичні. Наведено переваги та недоліки відомих на сьогоднішній день критеріїв. Запропоновано два нових критерії які базуються на принципі мінімуму енергії та відповідати наступним вимогам: можуть оперативнo корегувати режими оброблення; проводити комплексну економіко-технологічну оптимізацію; мають можливість застосування для будь-яких типів виробництва; простота застосування і мінімум вхідної інформації.*

Механооброблення, оптимізація, критерій ефективності, економічні критерії, фізичні критерії, енергетичні критерії.

Основною задачею машинобудування в умовах ринкової економіки являється виготовлення продукції високої якості з найменшими енергозатратами.

В процесі проектування конкретної технологічної операції механооброблення необхідно призначити конструкцію і геометричні параметри ріжучого інструменту, тип і модель верстата, параметри технологічних режимів оброблення, оснащення, ЗОР тощо. Від вибору перерахованих факторів залежить якість і ціна майбутнього виробу. Науково обґрунтований підхід до вибору цих чинників може бути забезпечений процедурою оптимізації, в процесі якої призначення параметрів оброблення відбувається у відповідності з прийнятим критерієм оптимальності та з виконанням заданих обмежень. В цьому випадку критерій оптимальності визначає ціль оптимізації, а технологічні обмеження — реалізацію необхідних вимог до процесу механооброблення.

З математичної точки зору задача оптимізації є варіаційною, вирішення якої заключається в пошуку експериментального значення цільової функції,  $f(x)$  змінні  $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  повинні належати деякій області  $S$  допустимих значень ( $x \in S$ ). Тому ефективність управління процесом різання залежить від якості теоретичної моделі механооброблення і прийнятого критерію оптимальності.

На сьогоднішній день для розрахунків оптимальних режимів різання застосовують наступні критерії: площа оброблюваної поверхні за період стійкості інструменту, технологічна собівартість операції, прибуток підприємства, продуктивність праці.

Порівняльний аналіз різноманітних критеріїв оптимальності виконаний в роботі [1]. Вважається, що критерій оптимальності “приведені затрати” більш повно відображає всі витрати роботи, а технологічна собівартість операції, являється похідним критерієм від приведених затрат і включає в себе змінні фактори оброблення. Технологічна собівартість як критерій оптимальності процесу різання в багатьох методиках являється основним критерієм в задачах оптимізації.

Для більшості практичних випадків в залежності від технологічних обмежень, що накладаються на оптимальний режим різання, вибір критеріїв оптимальності повинен проводитись з врахування особливостей виробництва: характеру, типу та стану обладнання, оснащення, інструменту.

В умовах ринкової економіки також знайшли застосування економічні критерії оцінки ефективності технологічних процесів в цілому та механообробних операцій зокрема. До переваг таких критеріїв оптимальності можна віднести достатньо повний облік економічних аспектів оптимізації процесу різання, екстремальний характер їх зміни від факторів оброблення. Остання перевага, однак, не завжди, реалізується на практиці, якщо задані жорсткі вимоги до продуктивності і якості оброблення, коли екстремум критерію виходить за межі області оптимізації.

До недоліків економічних критеріїв можна віднести труднощі формалізації експлуатаційних показників. Точність оцінки економічних критеріїв залежить від точності розрахунків

стійкості інструменту, що вимагає розробки високоточних стійкісних моделей. Також слід відмітити, що економічні критерії оптимальності прямим чином не враховують якість оброблення: точність, шорсткість оброблюваної поверхні і властивості поверхневого шару деталі, що сильно звужує діапазон їх ефективного використання.

Повний облік економічних аспектів являється суттєвим недоліком цих критеріїв з точки зору продуктивності процесу. Економічні критерії в якості вихідних даних для розрахунку використовують затрати на інструмент, вартість матеріалу заготовки, верстатний час, заробітну плату працівників і період стійкості інструменту. Всі перераховані параметри напряму пов'язані з економічною ситуацією в країні.

Багато машинобудівних підприємств використовують імпортований ріжучий інструмент. Його вартість пов'язана з курсом валют. Рівень інфляції впливає на заробітну плату працівників. На теперішній час спостерігається постійний ріст цін на енергетичні ресурси, в зв'язку з чим постійно зростає собівартість оброблення, а зниження швидкості різання з метою підвищення стійкості інструменту призводить до зростання вартості виробництва деталей, оскільки збільшується машинний час оброблення заготовок.

Для випуску конкурентоспроможної продукції виробник повинен забезпечити її високу якість і виготовлення в найкоротший термін з мінімальними затратами. В процесі призначення режимів різання спираючись на економічні критерії оцінки виконати дані вимоги не можливо. Призначаючи швидкість різання, виходячи з максимальної стійкості інструменту продуктивність обладнання знижується, внаслідок чого збільшується час технологічного процесу.

У зв'язку з цим, можна зробити висновок, що економічні критерії не відображають реальну ефективність режимів різання, оскільки основні параметри розрахунку постійно змінюються. Режими різання призначені на основі економічних критеріїв не дозволяють повністю використовувати ресурс обладнання та інструменту, тому в реальному виробництві призначення режимів різання за даним критерієм є недоцільним.

Необхідним, для забезпечення повноти картини є врахування механічної складової, тобто технологічних режимів оброблення. Оптимізація режимів різання на основі характеристик стійкості інструмента розглянута в роботах С.Е. Бельського, Р.Л. Тофпенца [2]. Суть такої оптимізації полягає в призначенні швидкості різання, за якої розмірна стійкість інструменту максимальна. В основі даного критерію оптимізації лежать емпіричні залежності, що являють собою систему лінійних алгебраїчних рівнянь і нерівностей, які описують період стійкості інструменту, а також силу і потужність різання. Основним недоліком такого критерію являється складність розрахунків. Для різних умов оброблення різанням необхідно змінювати параметри систем рівнянь і проводити розрахунки заново, а це потребує значних затрат часу. Даний критерій ефективно застосовувати для крупносерійного та масового виробництва, де зміна номенклатури оброблюваних деталей змінюється дуже рідко.

Перевагою даного критерію є скорочення простою обладнання внаслідок поломки інструменту, а також зниження браку викликаного зносом інструменту.

Оптимізація режимів різання за термічним критерієм забезпечує призначення оптимальної швидкості різання для визначеної температури. Суть цього критерію полягає в управлінні термічним режимом процесу механічної обробки, тобто підтримання визначеної температури в зоні різання, якій відповідає мінімальна інтенсивність розмірного зносу інструмента [3].

На сьогоднішній день вимірювання температури в зоні різання складний і дорогий процес. В багатьох випадках вона визначається експериментальним методом або за емпіричними залежностями, тому значення температури в зоні різання коливається в значних межах. Варто відзначити, що в процесі зносу інструмента зростає сила різання, і як наслідок змінюється температура в зоні різання. Зміна швидкості подачі і глибини різання також впливає на зміну температури в зоні різання. Таким чином на температуру здійснює вплив багато факторів, і щоб їх врахувати потрібно виводити складні математичні моделі. Застосування даного критерію оцінки у виробництві мало ефективно, оскільки, він відображає тільки термічну сторону процесу різання і не враховує якості поверхні, точність розмірів а також є досить трудомістким.

Порівняльний аналіз відомих критеріїв точності та якості поверхні був виконаний Л.С. Мурашкіним і А.М. Гільманом, і показав, що зниження або підвищення швидкості різання в порівнянні з оптимальною призводить до значного збільшення інтенсивності зносу інструменту, що здійснює суттєвий вплив на параметри якості поверхневого шару і точність оброблення [2].

Процес оптимізації за стійкісними характеристиками інструменту полягає в призначенні швидкості різання, за якої ресурс інструменту є максимальним. Стійкість інструменту визначається емпіричними залежностями, це часто призводить до того, що розрахункова стійкість інструменту виявляється завищеною.

Недоліком даного критерію являється висока ймовірність помилки в процесі визначення стійкості інструменту, а це призводить до призначення неправильних режимів різання. Тому розглянутий критерій оцінки режимів різання не підходить для застосування у виробничих умовах.

Головним недоліком критеріїв заснованих на емпіричних залежностях являється те що вони не враховують взаємозв'язки різноманітних факторів процесу різання. Фактори, що впливають на процес різання, розглядаються окремо один від одного хоча їх вплив у багатьох випадках проявляється спільно або у визначених комбінаціях.

Якість розрахункового режиму суттєво залежить від точності визначення емпіричної залежності. Проте, точність цих залежностей на сьогоднішній день не достатня. Вони в тій чи іншій мірі містять в собі похибки, припущення що спрощують їх апроксимацію.

З вище сказаного можна зробити висновок, що на сьогоднішній день немає критерію оцінки ефективності механічного оброблення, який би враховував ряд перелічених складових. Отже розробка нового ефективного критерію оптимізації є актуальною науково-практичною проблемою.

В умовах сучасного виробництва критерій оцінки ефективності механооброблення повинен базуватися на принципі мінімуму енергії та відповідати наступним вимогам: оперативно корегувати режими; проводити комплексну економіко-технологічну оптимізацію; можливість застосування для будь-яких типів виробництва; простота застосування і мінімум вхідної інформації [4].

Застосування енергетичних критеріїв оптимальності повинно бути реалізовано для практичних задач оптимального призначення технологічних умов різання заготовок, що виготовляються з важкооброблюваних матеріалів, або мають складні поверхні.

Під час механічного оброблення відбувається трансформація енергії в зоні різання. Дана енергія передається оброблюваному матеріалу і витрачається на пластичну деформацію зони різання та безпосереднє формування нових поверхонь (рис.1).

В якості показника енергетичної ефективності механічного оброблення приймають питому роботу різання  $e$ , роботу, що витрачається на зняття одиниці об'єму матеріалу:

$$e = \frac{A_{\text{різ}}}{V} = \frac{\dot{W}}{\dot{Y}} \quad (1)$$

де  $A_{\text{різ}}$  – робота різання;  $V$  – об'єм матеріалу, що перетворився в стружку;  $\dot{W}$ ,  $\dot{Y}$  – потужність та продуктивність процесу механічного оброблення.

Питома робота різання  $e$  не залежить ні від часу оброблення, ні від розмірів і об'єму заготовки. За значенням  $e$  можна порівнювати енергетичну ефективність альтернативних маршрутів оброблення і параметрів окремих операцій.

Будь-які технічні системи, в яких під час функціонування відбувається перетворення енергії та діють закони термодинаміки характеризуються коефіцієнтом корисної дії. Таким чином ефективність технологічних операцій механічного оброблення деталі також можна охарактеризувати даним коефіцієнтом і застосувати його в якості критерію оптимізації для встановлення оптимальних режимів оброблення. Так величина  $\Delta U_{\kappa}$  характеризує потенційну енергоємність процесу різання. Енергія, що передається, заготовці витрачається на пружнопластичне деформування її поверхневого шару, диспергування, тертя стружки під час контакту з передньою гранню та тертя поверхні різання під час контакту із задньою гранню інструменту. В цьому зв'язку робота різання  $A_{\text{різ}}$  завжди перевищує  $\Delta U_{\kappa}$ , внаслідок чого коефіцієнт корисної дії виражається наступним співвідношенням:

$$K_{\eta} = \frac{\Delta U_{\kappa}}{A_{\text{різ}}} < 1 \quad (2)$$



Рис 1. Структурна модель трансформації енергії в зоні різання.

Оскільки  $\Delta U_{\kappa}$  характеризує потенційну енергоємність процесу різання, а  $A_{різ}$  – фактичну, то показник  $K_{\eta}$  показує енергетичну оцінку ефективності механічного оброблення. Розділивши чисельник і знаменник на об'єм  $V$ , переходимо до питомих значень енергозатрат.

$$K_{\eta} = \frac{\Delta U_{\kappa}}{A_{різ}} = \frac{\Delta u}{e} < 1 \quad (3)$$

де –  $\Delta u$  питома енергія руйнування одиниці об'єму металу.

Оскільки  $K_{\eta}$  показує енергетичний ККД процесу різання, слід встановити, які складові енергетичного балансу механічного оброблення прийняти за корисну роботу  $\Delta U_{\kappa}$ . Згідно структурної моделі (рис 1) робота різання  $A_{різ}$ , що затрачається на пружнопластичну деформацію шару металу, який зрізується і утворення поверхонь розподілу в заготовці, трансформується в тепло  $Q$  і у внутрішню енергію  $\Delta U_B$  ( інструменту  $\Delta U_{B1}$ , деталі  $\Delta U_{B2}$  і стружки  $\Delta U_{B3}$ ). Енергію  $\Delta U_{\kappa}$  приймаємо рівною критичній питомій роботі деформації  $e_{деф}$ , що являє добуток дотичних напружень різання в площинах зсуву на величину відносної деформації:  $e_{деф} = \tau \cdot \varepsilon$ . Якщо  $\varepsilon = \varepsilon_i \approx 2,5$  дотичне напруження  $\tau$  досягають межі міцності на зсув  $\tau = \tau_p$ , тому:

$$\Delta U_{\kappa} = e_{деф} = \tau_p \cdot \varepsilon_i \left( 1 - \frac{T_0}{T_S} \right), \quad (4)$$

де  $T_S$  – температура плавлення металу, що обробляється;  $\left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right)$  множник введений для врахування зменшення міцності з підвищенням початкової температури  $T_0$ . Якщо попередній нагрів відсутній, то  $\left(1 - \frac{T_0}{T_S}\right) \approx 1$ .

Рівність (3) з урахуванням (4) і виконанням деяких математичних операцій набуде вигляду:

$$K_\eta = \frac{\tau_p \cdot \varepsilon_i \cdot (T_S - T_0)}{A_{\text{різ}} T_S} \quad (5)$$

Таким чином, КПД процесу механічного оброблення показує, яка частка від загальної потужності йде безпосередньо на руйнування матеріалу деталі.

Перевагами оцінки енергоємності процесу за технологічними характеристиками чорнового та чистового оброблення є наступне:

- питома енергоємність служить фізичним показником ефективності, та визначає умови роботи ріжучого інструменту;
- за допомогою такого критерію оптимізуються фізичні умови різання, а відповідно і економічна складова;

даний критерій є залежним лише від властивостей оброблюваного матеріалу та перебігу технологічного процесу.

Підсумовуючи, проаналізовані характеристики критеріїв енергоефективності, можна зробити висновок про те, що енергетичні критерії являються найбільш зручними для оцінки енергетичної ефективності процесів механічного оброблення і дозволяють співставити механообробні операції, які є різними за своєю фізичною природою та встановити оптимально структуру технологічного процесу виготовлення деталі.

1. Великанов К. М., Новожилов В. И. Экономические режимы резания металлов. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.

2. Жмурин В. В. Энергетический критерий оценки эффективности режимов резания / В. В. Жмурин, В.С. Сальников, // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – Орел, № 2. – 2010. – С. 114-120с.

3. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. М.: Машиностроение, 1976.— 278 с.

4. Старков В.К. Физика и оптимизация резания металлов// М.: Машиностроение, 2009. – 640 с.