УДК 621.91.01

С.О. Приступа[1], А.А. Ткачук[1], О.П. Дахнюк[2]
[1]Луцький національний технічний університет
[2]ДП Луцький ремонтний завод «МОТОР»

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВНА ЕНЕРГОЄМНІСТЬ ПРОЦЕСУ РІЗАННЯ

У статті наведено дослідження енергоємності процесу різання на токарних операціях. Запропоновано оцінку технологічного процесу різання за енергетичними критеріями. На основі даних критеріїв проведено моделювання технологічної операції різання з метою виявлення впливу технологічних факторів на рівень енергоємності технологічного процесу механічного оброблення. В результаті проведених досліджень визначено корисну складову енергетичного балансу процесу різання.

***Ключові слова**: різання, енергоємність, критерій, стружкоутворення, формоутворення, робота різання, технологічна система.*

Рис. 4. Форм. 20. Літ. 3.

С.А. Приступа, А.А. Ткачук, О.П. Дахнюк

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭНЕРГОЕМКОСТЬ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

В статье проведено исследование энергоемкости процесса резания на токарных операциях. Проведена оценка технологического процесса резки по энергетическим критериям. На основе данных критериев проведено моделирование технологической операции резания с целью выявления влияния технологических факторов на уровень энергоемкости технологического процесса механической обработки. В результате проведенных исследований установлено полезную составляющую энергетического баланса процесса резания.

***Ключевые слова:** резание, энергоемкость, критерий, стружкообразование, формообразование, работа резания, технологическая система.*

S.A. Prystupa, A.A. Tkachuk, O.P. Dakhniuk

STUDY OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON CUTTING ENERGY PROCESS

This paper studied the energy intensity of the cutting process in turning operations. The estimation process by cutting energy criteria. Based on these criteria Simulation technology cutting operations to detect the influence of technological factors on the level of energy intensity of the process machining . As a result of studies found a useful component of the energy balance of the cutting process.

***Keywords:** cutting, energy, criterion, chip formation, process of formation, work cutting, technological system.*

Вступ. Як відомо, під час виконання технологічних операцій механічного оброблення на процес різання припадають найбільші енергозатрати. Питома вага енергозатрат в структурі собівартості продукції машинобудівної промисловості складає близько 25% [3]. Водночас в умовах ринкової економіки однією з основних задач являється виготовлення високоякісної продукції з мінімальними затратами. Дослідження цих процесів дає змогу виявити взаємозв'язки технологічних факторів із затратами енергії в зоні різання. Це дозволяє встановити оптимальні технологічні режими для механічного оброблення деталей за критеріями енергетичної ефективності. Отже зниження показника енергетичних затрат в процесі механічного оброблення деталей машин являється актуальною науково-практичною задачею. Проте вирішення цієї задачі неможливе без детального дослідження роботи технологічної системи верстат-інструмент-деталь.

Основний матеріал. В процесі різання в оброблюваному матеріалі спочатку з'являються пружні деформації, з подальшим переміщенням ріжучого інструменту в глибину оброблюваного матеріалу виникають пластичні деформації, крім того під час процесу різання має місце тертя стружки об передню грань ріжучої кромки та задньої грані з оброблюваною поверхнею. Протягом кожного робочого ходу лезо інструменту здійснює певну роботу $A_{різ}$, результат якої — формування нової поверхні деталі.

Термодинамічна теорія міцності та руйнування дозволяє припустити, що для кожного матеріалу існує певна мінімальна кількість енергії E_0, якої достатньо щоб, тим чи іншим методом порушити її цілісність і отримати нові поверхні. Величина E_0 залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, початкового рівня внутрішньої енергії і геометричних розмірів (об'єму).

Роботу технологічної системи в процесі токарного оброблення можна оцінити наступними критеріями: 1) потужністю, що споживає з мережі двигун приводу головного руху і подачі металорізального верстату; 2) ККД верстату; 3) питомими енергозатратами на оброблення [2, 3].

© С.О. Приступа, А.А. Ткачук, О.П. Дахнюк

Перевагами вказаних критеріїв являється те, що вони характеризують процес оброблення безвідносно часу його перебігу.

Потужність, що споживається в процесі оброблення електродвигуном приводів верстата з електромережі, визначається як сума втрат потужності в елементах технологічної системи:

$$N_{сум} = N_e + \Delta N_{вм} + \Delta N_д, \quad (1)$$

де N_e — ефективна потужність різання; $\Delta N_{вм}$ — сумарні втрати потужності в механізмах приводу верстата; $\Delta N_д$ — втрати потужності в електродвигуні приводу.

Отже енергоспоживання технологічної системи протягом основного $\tau_{осн}$ і допоміжного $\tau_{доп}$ часу складається з трьох складових (рис. 1):

- $\left(N_e \cdot \tau_{осн}\right)$ — «корисна» енергія, що витрачається в зоні різання;
- $\left(\Delta N_{вм} \cdot \tau_{осн}\right)$— втрати, що виникають внаслідок навантаження елементів приводу моментами складових сил різання;
- $\left[\Delta N_д \left(\tau_{осн} + \tau_{доп}\right)\right]$ — втрати холостого ходу двигуна.

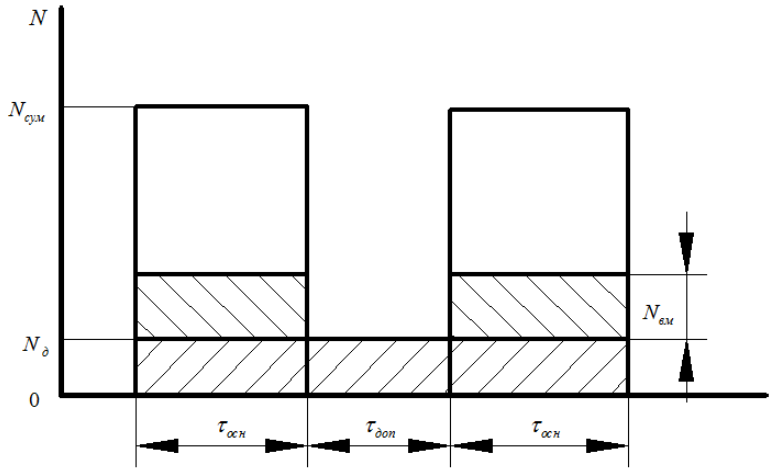

Рис. 1. **Схема енергоспоживання металорізального верстату за цикл оброблення**

Очевидно, що втрати потужності в технологічній системі умовно можна розділити на три складові:

1) втрати в механізмах приводів верстата;
2) втрати в електродвигуні приводів.
3) втрати в зоні різання;

Для теорії різання представляє інтерес третя складова. Робота в зоні різання, що здійснюється ріжучим інструментом, є визначальною для міри енергетичності технологічної операції, кількості електроенергії що споживає верстат, з електричної мережі, а також навантажувальні втрати в трансмісії. Робота різання в межах основного часу одного технологічного переходу складається з наступних енергозатрат:

- на процес стружкоутворення;
- на процес формоутворення.

Робота в зоні різання визначається як добуток потужності різання на основний технологічний час:

$$A_{різ} = N_e \tau_{осн}, \quad (2)$$

Потужність різання N_e, $Вт$, представляє собою добуток сили різання P, $Н$, на швидкість головного руху v, $м/хв$:

$$N_e = \frac{P \cdot v}{60}. \quad (3)$$

Швидкість v:

$$v = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000},\ v = \frac{L \cdot n(k+1)}{1000}, \tag{4}$$

де D — діаметр заготовки або інструменту, що здійснюють обертальний рух навколо своєї осі, *мм*; n — частота обертання, $хв^{-1}$; L — довжина ходу заготовки або інструменту, k — коефіцієнт, що рівний відношенню швидкостей робочого ходу і холостого ходів: $k = \frac{v_p}{v_x}$.

Для дослідження впливу функціональної зміни сили різання на енергетичні показники технологічної системи лезового оброблення слід встановити причини, що викликають ці зміни. На величину роботи різання впливають: властивості оброблюваного матеріалу; стан поверхневого шару заготовки; площа шару, що зрізується; вид і властивості інструментального матеріалу, геометричні параметри ріжучої частини інструменту, режими оброблення, наявність і характер ЗОР та інші параметри процесу різання, які разом утворюють сукупність керуючих факторів. Тому вирішення задачі оптимізації енергозатрат в процесі механічного оброблення слід проводити шляхом встановлення оптимальних режимів оброблення, а саме швидкості, подачі та глибини різання.

Ефективна потужність N_e в загальному випадку являється сумарною потужністю, що затрачена в процесі різання всіма складовими P_x, P_y і P_z (рис. 2) сили різання P, яка визначається за наступним виразом:

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}\ . \tag{5}$$

Потужність осьової сили різання:

$$N_{ex} = P_x n S \tag{6}$$

де n — частота обертання оброблюваної заготовки; S — поздовжня подача.

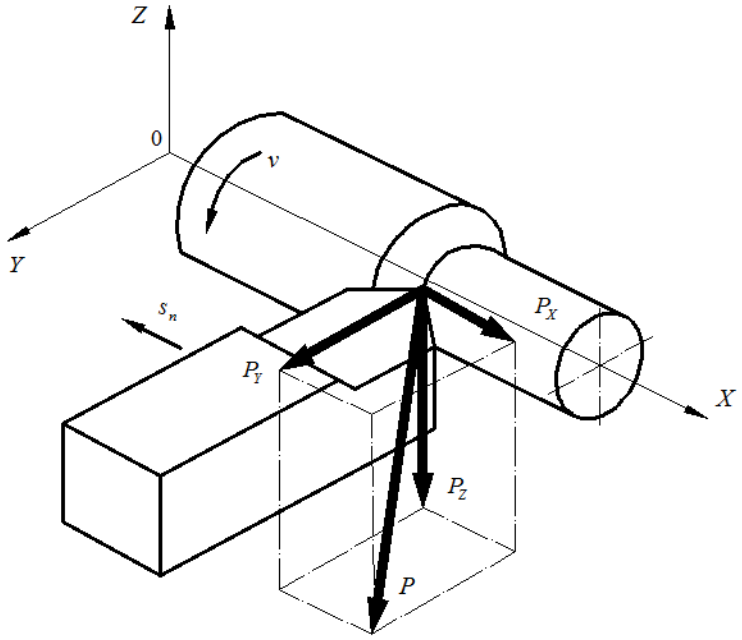

Рис. 2. **Складові сили різання**

Потужність радіальної складової сили різання визначається як:

$$N_{ey} = P_y v \cos\alpha\ , \tag{7}$$

оскільки вектор $\overline{P}_y$ перпендикулярний вектору $\overline{v}$.

Потужність вертикальної складової P_z, напрям якої співпадає з напрямом швидкості різання, визначається рівнянням:

$$N_{ez} = P_z v\ . \tag{8}$$

Відповідно, ефективна потужність з використанням рівнянь (6), (7), (8) визначається як:

$$N_e = N_{ex} + N_{ey} + N_{ez} = P_x nS + P_z v \quad (9)$$

Швидкість подачі виражена добутком nS, приблизно на два порядки менша швидкості різання v. Тому потужність N_{ex} складає 1…2% всієї затраченої ефективної потужності [1]. В зв'язку з цим силу різання P можна замінити її основною складовою P_z.

На рис 3. показана схема сил прикладених до ріжучої кромки інструменту. В точці *M* до передньої поверхні леза різця прикладена приведена нормальна сила Q, перпендикулярна передній поверхні різця, і приведена сила тертя f_1Q, що виникає із за переміщення стружки по передній поверхні (f_1 — коефіцієнт тертя ковзання оброблюваного та інструментального матеріалів). В точці O до задньої поверхні різця прикладені приведена сила R, перпендикулярна напряму головного руху різця зі швидкістю v, і приведена сила тертя f_1R, яка має напрям протилежний руху різця. З умови рівноваги слідує, що сила P рівна сумі проекцій всіх сил, прикладених до леза різця на пряму *А-А*, здовж якої діє сила P. Проектуючи розглянуті сили на горизонтальну лінію *А-А*, отримаємо наступну рівність:

$$P = Q\cos\gamma + f_1 Q\sin\gamma + f_1 R. \quad (10)$$

Використовуючи принцип рівноваги і проектуючи вище розглянуті сили на вертикальну лінію *Б-Б*, отримуємо наступну рівність:

$$R = Q\sin\gamma - f_1 Q\cos\gamma. \quad (11)$$

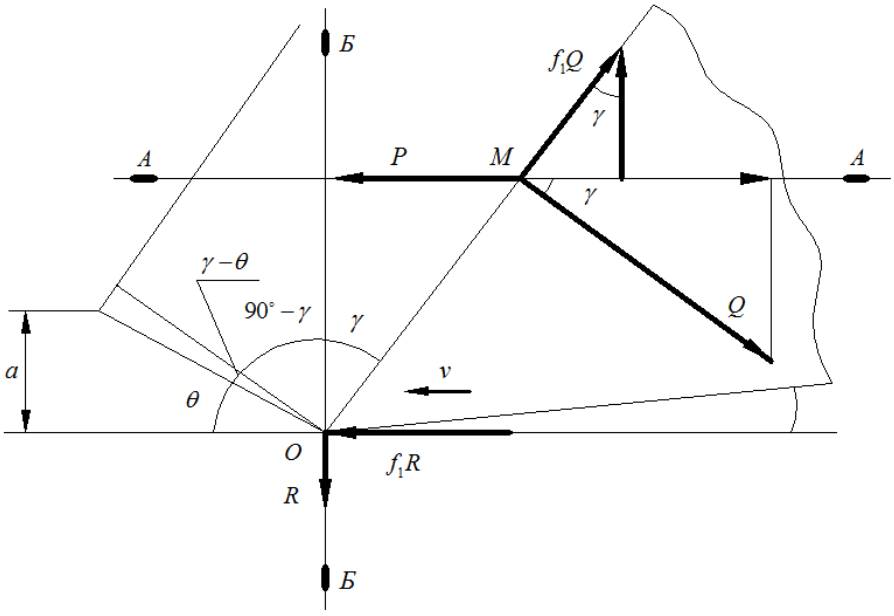

Рис. 3. **Схема збалансованих сил, що діють на лезо різця**

Підставивши отримане з рівняння (10) значення сили R в рівняння (11), отримаємо:

$$P = Q\cos\gamma + \sin\gamma + f_1 Q\sin\gamma - f_1^2 Q\cos\gamma, \quad (12)$$

або

$$P = Q\left[\left(1 - f_1^2\right)\cos\gamma + 2f_1\sin\gamma\right]. \quad (13)$$

В рівнянні (13) сила Q визначає опір металу пластичній деформації стружкоутворення. В розглянутій схемі стружкоутворення пластична деформація умовно відбувається тільки в площинні зрізання.

Розглядаючи систему сил, які діють в зоні стружкоутворення опір пластичній деформації можна представити трьома приведеними силами:

- нормальною силою N;

- силою внутрішнього тертя f_2N, де f_2 — коефіцієнт внутрішнього тертя в пластично деформованому металі;
- силою F, яку створюють дотичні напруження в площині різання.

Напрям нормальної сили N співпадає з лінією *B-B*, перпендикулярній площині різання. Площина різання утворює кут θ з напрямом головного руху і кут $(\gamma-\theta)$ з лінією *E-E*, перпендикулярний передній поверхні леза, загостреного під кутом γ.

На рис. 2 сили Q і f_1Q розглядалися прикладеними до різця. На рис. 3 ті ж сили розглядаються прикладеними до стружки, тому вони діють в протилежному напрямку. Проектуючи на лінію B-B діючі в цій зоні сили, з умови рівноваги отримаємо:

$$N = f_1Q\cos(\gamma-\theta) - Q\sin(\gamma-\theta). \tag{14}$$

Тоді сила внутрішнього тертя металу в площині різання дорівнює:

$$f_2N = f_1f_2Q\cos(\gamma-\theta) - f_2Q\sin(\gamma-\theta). \tag{15}$$

В площині різання по всій її площині виникають дотичні напруження σ. Ці напруження представлені силою:

$$F = \frac{ab\sigma}{\sin\theta} \tag{16}$$

де a – товщина шару, що зрізується, b – ширина шару, що зрізується.

Також, сила F виражається шляхом проектування діючої на метал в зоні стружкоутворення системи сил на лінію площини різання:

$$F = Q\cos(\gamma-\theta) - f_1Q\sin(\gamma-\theta) - f_1f_2Q\cos(\gamma-\theta) + f_2Q\sin(\gamma-\theta). \tag{17}$$

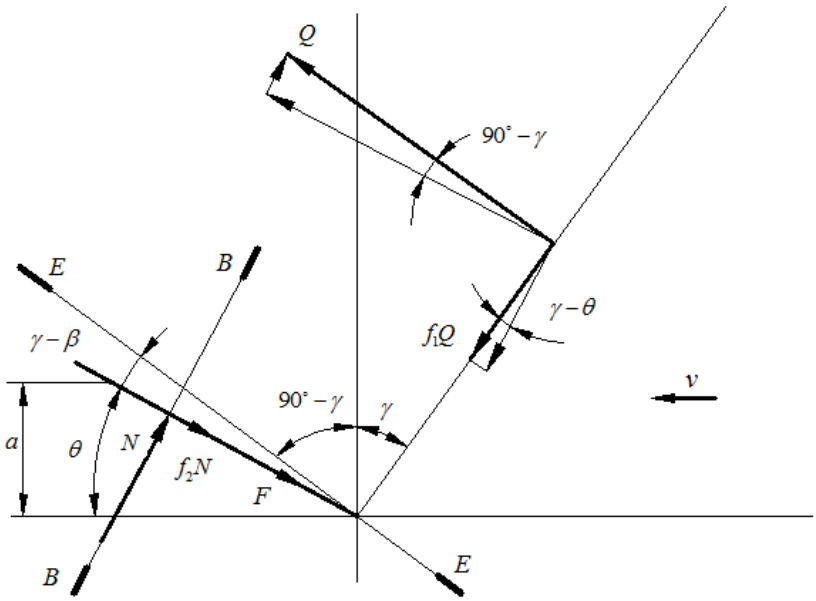

Рис. 4. **Схема збалансованих сил опору металу пластичній деформації і руйнуванню під час**

Враховуючи рівняння (16) (17) сила, перпендикулярна до передньої поверхні різця Q дорівнює:

$$Q = \frac{ab\sigma}{\sin\theta\left[(1-f_1f_2)\cos(\gamma-\theta) + (f_1+f_2)\sin(\gamma-\theta)\right]} \tag{18}$$

Підставивши отримане значення сили Q в рівняння (9) отримуємо теоретичне рівняння сили різання:

$$P = \frac{ab\sigma\left[\left(1-f_1^2\right)\cos\gamma + 2f_1\sin\gamma\right]}{\sin\theta\left[\left(1-f_1f_2\right)\cos\left(\gamma-\theta\right)+\left(f_1+f_2\right)\sin(\gamma-\theta)\right]} \quad (19)$$

Тоді вираз для визначення роботи в зоні різання з врахуванням (3), (4) і (14) матиме вигляд:

$$A_{різ} = \frac{ab\sigma\left[\left(1-f_1^2\right)\cos\gamma + 2f_1\sin\gamma\right]\left[Ln\left(k+1\right)\right]}{6\sin\theta\left[\left(1-f_1f_2\right)\cos\left(\gamma-\theta\right)+\left(f_1+f_2\right)\sin(\gamma-\theta)\right]}\tau_{осн}\cdot 10^{-4} \quad (20)$$

Термодинамічна теорія міцності та руйнування дозволяє припустити, що для кожного матеріалу існує мінімальна кількість енергії ΔE_0, якої достатньо щоб, тим чи іншим методом порушити її цілісність і отримати нові поверхні. Величина ΔE_0 залежить від фізико-механічних властивостей матеріалу, початкового рівня внутрішньої енергії і геометричних розмірів (об'єму) деталі або заготовки. Якщо змінюється об’єм матеріалу ΔV_0, що піддається руйнуванню, то змінюється і мінімальна кількість енергії руйнування:Величина ΔE_0 – питима робота руйнування, і характеризує безпосередньо матеріал [2].

Висновок. Величина ΔE_0 являється корисною складовою енергетичного балансу процесу різання. А оскільки, енергія, що передається заготовці, витрачається на пружно-пластичне деформування, тертя стружки під час контакту з передньою гранню інструменту і тертя поверхні різання під час контакту із задньою гранню інструменту, то робота різання $A_{різ}$ завжди перевищує ΔE_0.

Таким чином, виконання умови $A_{різ} \to \Delta E_0$ свідчить про ефективність роботи різання, а також максимальну продуктивність технологічного процесу механічного оброблення.

Мірою енергетичності оброблення металів різанням можуть служити питомі енергозатрати, що приведені до одиниці об’єму або маси.

$$e = \frac{A_{різ}}{V}$$

Величина e – об’ємна продуктивність стружкоутворення, тобто не залежить ні від часу оброблення, ні від геометричних розмірів заготовки. По значенню e можна порівняти енергетичну ефективність альтернативних маршрутів оброблення і параметрів окремих операцій. Показники e і K_e, перетворивши їх в цільові функції виду $e \to \min$ $K_e \to 1$ можна використовувати в якості критеріїв оптимальності, в процесі встановлення параметрів енергоекономічного оброблення різанням.

1. Грановский Г.И., Грановский В.Г. Резание метал лов М.: Высш. шк. , 1985. – 304 с., ил. Учебник для вузов.
2. Старков В.К. Физика и оптимизациярезанияметаллов// М.: Машиностроение 2009г. – 640 с.
3. Якубов Ф.Я. Энергетическиесоотношенияпроцессамеханическойобработкиматериалов. Ташкент: Фан, 1985. – 104 с.

Стаття надійшла до редакції 02.01.2014.

© С.О. Приступа, А.А. Ткачук, О.П. Дахнюк