

Д. В. ЯНЮК

аспірант кафедри прикладної механіки та мехатроніки
Луцький національний технічний університет
ORCID: 0009-0002-9633-0620

ІНТЕГРАЛЬНА ОЦІНКА ВПЛИВУ СКОРОЧЕННЯ ОПЕРАЦІЇ ФОРМУВАННЯ ТОРЦЯ НА ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ ТОКАРНОЇ ОБРОБКИ ПРУТКОВИХ ЗАГОТОВОК

Робота присвячена виявленню впливу обробки торцевої поверхні пруткової заготовки на загальну ефективність виготовлення деталі з метою оцінки можливостей скорочення витрат. Основні результати роботи стосуються вирішення проблеми, що пов'язана з відсутністю методології, аналізу впливу обробки торцевої поверхні за системою безрозмірних індикаторів, яка лінійно транспонує технологічні зміни у відсоткові варіювання статей витрат. З цією метою проведено виявлення залежностей для формалізованого узагальненого вираження таких витрат. Проведено аналіз витрат, де складовими є вартість машинного часу, енергії, оплати праці, інструмента з урахуванням ресурсу й кількості ріжучих кромок. При цьому, розглянуто два варіанти циклу обробки деталі: зі зменшенням вдвічі припуском та без операції підрізання торця. При обчисленні часу циклу приймалися режими різання рекомендовані для інструментів та норми для верстатів з ЧПК. Враховані параметри: знос інструменту, затрати на допоміжні рухи, вартість зрізаного матеріалу, вартість роботи обладнання та оператора, накладні супутні витрати.

Отримані формалізовані вирази мають можливість масштабування від обчислення економічних параметрів одного циклу обробки до величини усієї запланованої партії деталей. Результати показали фінансову економію близько 5% при зменшенні припуску та до 20% економію при скасуванні операції. Зроблено висновок про доцільність підвищення точності осевого позиціонування заготовки, яка подається автоматична машинами для спрощення виробничого циклу в токарних верстатах масового виробництва. Дані рекомендації щодо впровадження представленої методики розрахунків у аналіз економічних витрат на інші процеси в металообробці в тому числі який виконується автоматичними системами планування.

Ключові слова: верстат, обробка різанням, системні закономірності, надійність позиціонування, проблема оптимізації, затиск у шпindelному вузлі, системний аналіз, осьове положення.

D. V. YANYUK

Postgraduate Student at the Department of Applied Mechanics
and Mechatronics
Luts'k National Technical University
ORCID: 0009-0002-9633-0620

INTEGRAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF REDUCING THE END FORMING OPERATION ON THE EFFICIENCY INDICATORS OF TURNING PROCESSING OF BAR BLANKS

The work is devoted to identifying the impact of processing the end surface of a bar blank on the overall efficiency of part manufacturing in order to assess the potential for cost reduction. The main results of the work relate to solving the problem associated with the lack of methodology, analyzing the impact of end surface machining using a system of dimensionless indicators, which linearly transposes technological changes into percentage variations in loss items. To this end, dependencies were identified for a formalized generalized expression of such costs. An analysis of costs was carried out, where the components are the cost of machine time, energy, labor, tools, taking into account the resource and the number of cutting edges. At the same time, two options for the part processing cycle were considered: with a halved allowance and without end trimming. When calculating the cycle time, the cutting modes recommended for modern tools and time standards for CNC machines were used. Parameters such as tool wear, auxiliary movement costs, the cost of cut material, the cost of equipment and operator labor, and overhead costs were taken into account.

The formalized expressions obtained can be scaled from the calculation of the economic parameters of a single machining cycle to the value of the entire planned batch of parts. The results showed financial savings of about 5% when reducing the allowance and up to 20% savings when eliminating the operation. It was concluded that it is advisable to increase the accuracy of the axial positioning of the workpiece fed by automatic machines to simplify the production cycle in mass production lathes. These recommendations are for the further use and implementation of the presented

calculation methodology in the analysis of economic costs for other processes in metalworking, including those performed by automatic planning systems.

Key words: *machine tool, cutting machining, systemic regularities, positioning reliability, optimization problem, spindle unit clamping, system analysis, axial position.*

Постановка проблеми

Операції підрізання торців пруткових заготовок при токарній обробці є дуже поширеними адже виконуються на початку більшості циклів обробки, щоб забезпечити необхідне положення торцевої поверхні. Економія ресурсів та матеріалів при обробці торцевих поверхонь є особливо актуальною у серійному та масовому виробництві що зумовлюється кількістю продукції та стійкою світовою тенденцією до впровадження ощадливого виробництва. Автоматична обробка передбачає визначення положень оброблюваних поверхонь відносно системи координат верстата. Для уникнення невірної величини автоматичної подачі пруткового матеріалу зазвичай налаштовують на гарантовано більший розмір. Покращення параметрів функціонування машин автоматичної подачі та якості торця заготовки після відрізання попередньої деталі, дає можливість зменшити припуск, що знімається з наявної на початку обробки торцевої поверхні або взагалі відмовитися від даної операції. Для виявлення доцільності створення додаткових заходів по збільшенню точності осьового позиціонування торцевої поверхні прутка під час автоматичної подачі доцільно співставити дані витрати з ефектом можливої економії на операції підрізання торця. Однією з ключових проблем здійснення такої оцінки є врахування ряду різномірних факторів, що створюють бюджет витрат при формуванні торцевої поверхні. Можливість вираження оцінки витрат на формування торцевої поверхні у формальному вигляді створює передумови для покращення заходів щодо підвищення ефективності та економічності виготовлення деталей з пруткових заготовок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На момент дослідження [1] машинна обробка у США споживала 15% електроенергії тому автор класифікував основні статті витрат та наголосив на необхідності стратегій для зменшення споживання електроенергії. Стандарт [2] визначає методологічний підхід для оцінки екологічності металообробних верстатів. Для дослідження енергозатрат на процес різання у [3] розробили систему відстежування споживання головного приводу в режимі реального часу, однак як показала робота [4] допоміжні рухи верстатного комплексу можуть споживати до 80% електроенергії затраченого на процес різання. У праці [5] надано пропозиції щодо покращення умов затиску прутка, що створює передумови для покращення осьового позиціонування. У [6] виявили залежності впливу характеристик інструменту на енергозатрати при видаленні матеріалу із заготовки. Для розрахунку собівартості у дослідженні [7] використали інформацію витрат місячного циклу виробництва деталей однак не розробили методики для прогнозувати витрат на деталі іншого типу. У [8] розробили функцію розрахунку витрати на виробництво деталі токарним методом від декількох параметрів, врахували затрати на обслуговування, але не розглянули шляхів здешевлення процесу обробки. Дослідження [9] вказує на існування впливу параметрів верстату та стохастичних виробничих змінних на загальну вартість процесу виробництва одиниці продукції. Рекомендації автора зводяться до пошуку оптимальних параметрів різання. У [10] досягнуто зниження вартості виробництва деталі на 20%, через дослідження неефективних етапів циклу досліджуваного виробництва, що звужує область застосування результатів роботи.

Попри значну кількість праць, що стосуються обробки пруткового матеріалу у масовому виробництві і зокрема умов його автоматичної подачі для утворення заготовки в токарних верстатах, не виявлено цілісної методології, яка б у відносних показниках пов'язувала витрати на операцію підрізання торця з інтегральними ефектами від скорочення або її скасування. Зокрема, відсутні сценарний аналіз із розкладом за станами верстата і атрибуцією часток енергії, часу та простоїв до саме операції підрізання з узгодженою системою безрозмірних індикаторів, яка лінійно транспонує технологічні зміни у відсотковій зрушенні статей втрат (машина, інструмент, енергія, праця, матеріал). Тобто, врахування специфічних чинників як передумов відмови від підрізання торця. Отже, розробка методики інтегральної відсоткової оцінки енергетичної, матеріальної та супутніх показників ефективності, що залежить від досягнутої точності осьового позиціонування торця із зменшенням припуску або відмовою від операції торцювання є актуальним завданням.

Формулювання мети дослідження

Об'єкт дослідження - процеси формування торцевої поверхні пруткової заготовки та відповідні стани роботи верстата.

Предмет дослідження – закономірності впливу процесів формування торцевої поверхні пруткової заготовки на інтегральні показники ефективності виготовлення деталі з пруткової заготовки.

Мета – отримати формалізоване представлення структури втрат, що виникають при обробці торця пруткової заготовки.

Викладення основного матеріалу дослідження

Економічний ефект від зменшення припуску підрізання торця або відмови від даної технологічної операції можна виявити на різних рівнях аналізу джерел споживання енергії та втрат. Використану енергію можна

варіант зменшення припуску на $\Delta a_p=0,3$ мм. Для об'єму шару який знімається $V=A a_p$ [мм³] при густині $\rho=7,85 \times 10^{-3}$ г/мм³ його маса (маса стружки) визначається як $m=\rho V$ [г]. Енергія різання: $E=uV$ [Дж], де u – питома енергія різання (сталі: $u \approx 2,5-4,0$ Дж/мм³) а у ват-годинах: $E_{wh}=E/3600$.

Час підрізання торця (якщо операція виконується) затрачається на радіальний прохід від $R=D/2=20$ мм до 0 при подачі f_r [мм/об] і частоті n [об/хв],

$$t_{face} = \frac{R}{f_r n} 60 \text{ с.}$$

Відповідно до рекомендацій виробника інструменту [11] можна прийняти подачу $f_r = 0,15$ мм / об , та при сталій рекомендованій швидкості різання для максимального діаметру обробки торця $v_c = 100 - 250$ м/хв частота обертання :

$$n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D} \approx 800 - 1600 \text{ об / хв.}$$

Тоді при наших умовах $t_{face} = 5 - 10$ с , а допоміжний час підходу та відводу різця додається окремо і може становити $t_{aux}=0,4-0,8$ с.

При повній відмові від підрізання торця, коли базовий припуск $a_{p0}=0,6$ мм не знімається, досягається економія ряду ресурсів: об'єму $V_0=A \cdot a_{p0}$ й маси $m_0=\rho V_0$ матеріалу. Економія енергії різання $E_0=uV_0$ та часу $t_{face}+t_{aux}$ на деталь. Об'єм який не перетворюють у стружку $V_0=754$ мм³, $m_0=5,915$ г, $E_0=1885-3016$ Дж (0,524–0,838 Wh).

Для випадку S2, коли підрізання лишається, але припуск зменшено на $\Delta a_p=0,3$ мм стружки утворюється менше звідки впливає економія об'єму $\Delta V=A \Delta a_p$ й маси $\Delta m=\rho \Delta V$, економія енергії $\Delta E=u \Delta V$. Економія часу обробки є незначною оскільки при сталих f_r, n та повному радіальному проході не залежить від осрової товщини припуску. При $\Delta a_p=0,3$ мм, $\Delta V=377$ мм³, $\Delta m=2,957$ г, $\Delta E=942-1508$ Дж (0,262–0,419 Wh) (табл. 1).

Таблиця 1

Результати економії на один цикл обробки

Випадок	Ефект по припуску, мм	Зекономлений об'єм (V), мм ³	Маса (m), г	Спожита енергія на різання (E), Wh	Економія часу, с.
№ 1 Повністю без підрізання	$a_{p0}=0,6$ мм	$A \cdot 0,6=754$	5,915	0,524 – 0,838	5-10
№ 2 Підрізання лишається, припуск – 0,3 мм	$\Delta a_p=0,3$ мм	$A \cdot 0,3=377$	2,957	0,262 – 0,419	≈ 0

Припущення та інтерпретація. При підрізанні здійснюється повний прохід по всьому радіусу а тому t_{face} майже не залежить від a_p . u прийнято усередненим для сталей а реальні значення змінюються з маркою, геометрією різця, товщиною стружки та змащенням. Електроспоживання верстата може визначатися як $E_{et}=E/\eta$ з ефективністю $\eta \approx 0,5-0,7$, або ж завдяки інтегрованим в електричних щитах ватметрам [7].

Для визначення економії в межах партії величиною Q можна здійснювати масштабування ефектів з одного циклу обробки (1 деталь) шляхом домноження отриманих величин на Q . Для партії величиною $Q=10^6$ варіант № 1 дає економію матеріалу 5,915т та 524–838 кВт·год різальної енергії і приблизно 1389-2778 годин машинного часу. Для варіанту S2 економія 2,957т матеріалу та 262–419 кВт·год енергії.

Індекс зношування кромки різця Λ – безрозмірний відносний показник внеску конкретної операції у знос інструмента. Для швидкої оцінки приймають $\Lambda \sim E_{cut}$ енергія різання цієї операції. Тоді вилучення операції дає $\Lambda =0$. Зменшення припуску вдвічі дає $\Lambda =0,5$. Енергія різання для операції

$$E_{cut} = \int P_{cut}(t) dt \approx uV ,$$

де u – питома енергія різання, V – об'єм знятого матеріалу, потужність різання P_{cut} та час контакту t . Індекс зношування кромки,

$$\Lambda = \frac{E_{cut}}{E_{cut}^{base}} ,$$

відносно базового режиму (припуску) для тієї самої операції, інструмента й матеріалу. Тобто, за фіксованих v_c, f , геометрії й ЗОР питома енергія u слабо змінюється, тож Λ лінійно масштабується з об'ємом V . Сумарний знос за цикл є сумою внесків усіх операцій, кожна з власним Λ_i .

Грошовий ефект від зменшення припуску підрізання торця або відмови від операції оцінюється через відсоткові зміни складових собівартості, що прив'язані до зменшення об'єму стружки, енергії процесу і машинного часу. Формалізація відсоткового вираження економії виражається через декомпозицію собівартості на статті витрат і безрозмірні індикатори, що прив'язують кожну статтю до зменшення часу, енергії, інструменту та матеріалу від операції підрізання.

Повна собівартість одиниці продукції,

$$C_{tot} = C_{mach} + C_{op} + C_{OH} + C_{en} + C_{tool} + C_{mat}.$$

Ваги статей як частки у відсотках, що сумарно дають 1,

$$w_i = C_i / C_{tot}; \sum w_i = 1,$$

де $i \in \{mach, op, OH, en, tool, mat\}$;

C_{mach} – машинний час × ставка (амортизація, ремонт, обслуговування, енергія базових систем, без врахування оплати оператора).

C_{op} – оплата праці, що масштабується з тривалістю циклу.

C_{OH} – накладні витрати (постійні) але у масовому потоці також ефективно масштабується з часом завантаження.

C_{en} – електроенергія процесу (за цикл).

C_{tool} – інструмент і його переточки/заміни, пропорційні навантаженню і часу різання.

C_{mat} – вартість заготовки; тут нас цікавить лише частка, що йшла у стружку підрізанням торця.

У відсотковій оцінці кожна стаття зменшується на частку, що відповідає вилученому внеску операції підрізання.

Безрозмірні індикатори β є зв'язуючою ланкою між технологічною зміною і статтями витрат. Часовий індикатор,

$$\beta_t = \frac{t_{face} + t_{aux}}{t_{cyc}},$$

де t_{cyc} – час повного цикл обробки деталі. β_t – відносна частка циклу, що зникає при відмові від підрізання, при зменшенні припуску $\beta \approx 0$ (радіальний прохід залишається).

Енергетичний індикатор:

$$\beta_E = \frac{E_{face}}{E_{MT}},$$

де E_{MT} – повна електроенергія верстата за цикл; E_{face} – енерговнесок операції підрізання. У мінімальній моделі

$$E_{face} = \frac{u A a_{p0}}{3600}$$

Індикатор інструмента:

$$\beta_{tool} = \frac{E_{face}}{E_{cut,tot}},$$

де $E_{cut,tot}$ – сумарна енергія різання за всі операції циклу. Ця залежність збільшує частку зносу й витрат на інструмент, що припадає саме на підрізання, при збільшенні кількості циклів.

Індикатор зрізаного матеріалу торця β_{mat} як відносна частка грошей у C_{tot} , які витрачались саме на зрізаний операцією підрізання торця об'єм матеріалу,

$$\beta_{mat} = \frac{\rho A a_{p0} c_m}{C_{tot}},$$

де c_m – ціна матеріалу [грн/кг].

Перехід від означень індикатором β до вираження відсоткової економії за статтями. Для сценарію при повній відмові від підрізання (S1):

часові статті зменшуються на β_t : $\Delta C_{mach} / C_{tot} = w_{mach} \beta_t$, аналогічно для w_{op} , w_{OH} ; енергія: $\Delta C_{en} / C_{tot} = w_{en} \beta_E$; інструмент: $\Delta C_{tool} / C_{tot} = w_{tool} \beta_{tool}$; матеріал торця: $\Delta C_{mat} / C_{tot} = \beta_{mat}$. Звідси сумарна відсоткова економія:

$$\% \Delta C_{tot} = 100 [(w_{mach} + w_{op} + w_{OH}) \beta_t + w_{en} \beta_E + w_{tool} \beta_{tool} + \beta_{mat}].$$

Сценарій при якому операція залишається але припуск зменшено на Δa_p (S2) що провокує зменшення витрат енергії, інструменту, матеріалу лінійно з об'ємом за коефіцієнтом $\Delta a_p / a_{p0}$, однак не передбачає зменшення часових витрат:

$$\% \Delta C_{tot} = 100 [w_{en} \beta_E \Delta a_p / a_{p0} + w_{tool} \beta_{tool} \Delta a_p / a_{p0} + \beta_{mat} \Delta a_p / a_{p0}]$$

Припущення і валідність даних розрахунків пояснюється наступним. Лінійність залежності витрат енергія та зносу інструменту від об'єм зрізаного матеріалу коректна за сталих v_c, f , геометрії і ЗОР а при зміні режимів потрібна корекція. Накладні C_{OH} у масовому потоці обґрунтовано ототожнювати з часозалежними, якщо їх розподіляють на одиницю продукції через завантаження обладнання. Для сценарію S2 часовий ефект нульовий, оскільки підрізання передбачає повний радіальний прохід. Тобто величини $w\{\}$ та $\beta\{\}$ означають відповідно базові ваги витрат та другі відносні ключі перетворення технологічної зміни на відсоткове здешевлення по кожній статті й загалом.

Тлумачення складових отриманої формули може бути наступним. $(w_{mach} + w_{op} + w_{OH}) \beta_t$ вказує на відсоток, на який зменшуються машинна складова, оплата праці та постійні витрати, оскільки вони лінійно прив'язані до часу

циклу. $w_{en}\beta_E$ – це частка енергії циклу, що припадає на підрізання. $w_{tool}\beta_{tool}$ виражає внесок цієї операції у витрати на інструмент протягом одного циклу (добре апроксимується пропорційно енергії/часу різання). β_{mat} є відносною часткою грошей на матеріал, що використовується для частки торця яку потрібно зрізати у повній собівартості. Для сценарію де лишається підрізання торця S2 усі «енерго-матеріально-інструментальні» ефекти масштабуються коефіцієнтом $\Delta a_p/a_{p0}$, але часові втрати – ні.

Розрахунок зменшення втрат, відповідно до припущення про структуру витрат і часові частки циклу

Вихідні ваги статей витрат можуть бути представлені як вектори часток повної собівартості тому їхня повна сума завжди буде рівна 1 (100%). Приймаючи до розрахунку виробничі параметри описані вище орієнтовні ваги можуть бути наступними: $w_{mach}=0,42$ – машинний час; $w_{tool}=0,38$ – інструмент; $w_{op}=0,12$ – оплата праці; $w_{en}=0,08$ – електроенергія; $w_{OH}=0$ – окремо не виділяються; матеріал торця входить через β_{mat} .

Часові параметри та β_i можуть бути прийнятими наступними: час підрізання $t_{face}=4,0$ с, допоміжний $t_{aux}=0,6$ с. Для прикладу можна розглянути два варіанта: серійний цикл $t_{cyc}=20$ с $\Rightarrow \beta_i=0,23$; довгий цикл $t_{cyc}=40$ с $\Rightarrow \beta_i=0,115$. Такі значення відображають частину повного часу яку займає саме підрізання з підведенням інструменту, тобто чим більше часу займають інші операції обробки тим менша частка часу циклу йде на обробку торця.

Енергетичний індикатор β_E виражається через енергію підрізання E_{face} ділиться на повну енергію циклу верстата E_{MT} . Для орієнтиру доцільно взяти взято $E_{MT}\approx 8-12$ Вт·год/дет. За типовим E_{face} це дає $\beta_E\approx 4-10\%$. Тобто, таким чином оцінюється частка електроенергії, яка припадає на підрізання в енергобалансі циклу.

Інструментальний індикатор β_{tool} виражає апроксимацію частки витрат інструмента, що спричинена саме підрізанням в якій $t_{cut,tot}$ – сумарний час чистого різання в циклі. Орієнтовне значення для двох сценаріїв навантаження інструмента може бути $\beta_{tool}=0,20$ та $0,35$. Таким чином відображається чутливість підсумку до того, яку частку зносу (вартості) інструмента створює саме підрізання. Два варіанта t_{cyc} і β_{tool} відображають діапазон результатів для різної насиченості циклу різанням і різної ролі підрізання у зносі. Короткий цикл підсилює вагу β_i ; високий β_{tool} підсилює інструментальну складову. Це дає можливість означити загальний рівень чутливості аналізу.

Матеріальний індикатор β_{mat} відображає грошовий еквівалент частки матеріалу, що перетворювався у стружку при базовому припуску. Її підставляють у формулу як додачу матеріальної економії.

При відмові від підрізання торця (S1).

Якщо $t_{cyc}=20$ с, $\beta_i=0,23$, $\beta_E=0,07$, $\beta_{tool}=0,2$:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[(0,42+0,12) \cdot 0,23 + 0,08 \cdot 0,07 + 0,38 \cdot 0,2 + \beta_{mat}] \approx 100[0,124 + 0,006 + 0,076 + \beta_{mat}] = 20,6\% + 100\beta_{mat}.$$

Якщо $t_{cyc}=40$ с, $\beta_i=0,115$, $\beta_E=0,05$, $\beta_{tool}=0,35$, тоді:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[0,061 + 0,04 + 0,133 + \beta_{mat}] = 19,8\% + 100\beta_{mat}.$$

При наявності підрізання торця (S2) з припуском $\Delta a_p=0,3$ мм. Тоді, $\Delta a_p/a_{p0}=0,5 \Rightarrow \theta_E=0,5\beta_E$, $\theta_{tool}=0,5\beta_{tool}$, $\theta_{mat}=0,5\beta_{mat}$, $\theta_i \approx 0$. Для $\beta_E=0,07$, $\beta_{tool}=0,2$:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[0,08 \cdot 0,035 + 0,38 \cdot 0,1 + 0,5\beta_{mat}] = 4\% + 50\beta_{mat}.$$

Для $\beta_E=0,05$, $\beta_{tool}=0,35$:

$$\% \Delta C_{tot} \approx 100[0,08 \cdot 0,025 + 0,38 \cdot 0,175 + 0,5\beta_{mat}] = 7,1\% + 50\beta_{mat}$$

Варто відзначити, що відсоткові ефекти чутливі до β_i , β_E , β_{tool} . Вони визначаються виміром енергопрофілю та розкладом часу за станами циклу конкретного верстата. Для варіанту з уникненням операції підрізання торця потрібно забезпечити відповідно до підвищених вимог сукупність параметрів функціонування машини автоматичної подачі прутка, інакше економія часу може бути нівельована додатковими операціями контролю або відшкодуванням утвореного браку. Значення β_{mat} залежить від частки вартості матеріалу у собівартості. Такий розрахунок дає вставний, відтворюваний у відсотках вираз позитивного ефекту для обох сценаріїв де потрібно вказати поточні параметри $w\{\}$, β -параметри, c_m і C_{tot} , отримані з вимірюного циклу та обліку.

Висновки

Результат досліджень дають можливість формального представлення економічної моделі підрахунку витрат на обробку торцевої поверхні деталі методом точіння. Після аналізу її компонентів та розрахунків на основі рекомендаційних даних виробників інструментів про режими різання, отримано відсоткові показники витрат на операцію підрізання торця враховуючи різні параметри циклу. Результати розрахунків вказують на можливість економії до 20% ресурсів за рахунок скасування операції підрізання торця. Цього можна досягнути шляхом підвищення точності осьового позиціонування заготовки при її формуванні методом автоматичної подачі довгомірного пруткового матеріалу.

Результати розрахунків демонструють економічність доцільність подальших розробок присвячених дослідженню та підвищенню точності машин для автоматичної подачі прутків у токарні верстати. Універсальність отриманих залежностей вказує на можливість та доречність інтеграції розрахункової моделі витрат на обробку торцевої поверхні у різні форми токарної обробки з метою покращення умов визначення ключових витрат та розробки методів їх скорочення.

Список використаної літератури

1. Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy / G. Y. Zhao та ін. *Energy*. 2017. Т. 133. С. 142–157. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.110>.
2. ISO 14955:2020. Machine tools – Environmental evaluation of machine tools – Part 3: Principles for testing metal-cutting machine tools with respect to energy efficiency.
3. Al-Sulaiman F. A., Baseer M. A., Sheikh A. K. Use of electrical power for online monitoring of tool condition. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Т. 166, № 3. С. 364–371. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.104>.
4. Energy efficient process planning for CNC machining / S. T. Newman та ін. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2012. Т. 5, № 2. С. 127–136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.007>.
5. Кузнецов Ю.М., Придальний Б.І. Приводи затискних механізмів металообробних верстатів: монографія. – Луцьк: Вежа Друк, 2016. – 352 с.
6. Vijayaraghavan A., Dornfeld D. Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals*. 2010. Т. 59, № 1. С. 21–24. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.042>.
7. Fit manufacturing: mapping product cost requirements using relational database design / Ebrahim, Z., Anawar, S., Cheah, A.C. 2015. URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73614513>.
8. Cost optimization of the AISI-1018 turning process under sustainable manufacturing / M. Cesén та ін. *Materials today: proceedings*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.473>.
9. Impact of stochastic industrial variables on the cost optimization of AISI 52100 hardened-steel turning process / A. F. Torres та ін. *The international journal of advanced manufacturing technology*. 2019. Т. 104, № 9-12. С. 4331–4340. URL: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04273-1>.
10. Al Ghifary H., Sukanta S., Suseno A. Perhitungan Ongkos Operasi pada Produk Inner Tube Berdasarkan Distribusi Beban Ongkos. *Akuntansi Dewantara*, 2021, vol. 5, no. 2, pp. 1–6. DOI: 10.26460/ad.v5i2.8278.
11. Каталог Sandvik Coromant. *polidecktech.com*. URL: <https://polidecktech.com/all-catalogs/catalog-sandvik-coromant> (дата звернення: 07.11.2025).

References

1. Zhao, G. Y., Liu, Z. Y., He, Y., Cao, H. J., & Guo, Y. B. (2017). Energy consumption in machining: Classification, prediction, and reduction strategy. *Energy*, 133, 142–157. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.110>
2. International Organization for Standardization. (2020). ISO 14955:2020 Machine tools – Environmental evaluation of machine tools – Part 3: Principles for testing metal-cutting machine tools with respect to energy efficiency.
3. Al-Sulaiman, F. A., Abdul Baseer, M., & Sheikh, A. K. (2005). Use of electrical power for online monitoring of tool condition. *Journal of Materials Processing Technology*, 166(3), 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.07.104>
4. Newman, S. T., Nassehi, A., Imani-Asrai, R., & Dhokia, V. (2012). Energy efficient process planning for CNC machining. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 5(2), 127–136. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2012.03.007>
5. Кузнецов, Ю. М., & Придальний, Б. І. (2016). *Приводи затискних механізмів металообробних верстатів*. Луцьк: Вежа Друк.
6. Vijayaraghavan, A., & Dornfeld, D. (2010). Automated energy monitoring of machine tools. *CIRP Annals*, 59(1), 21–24. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.042>
7. Ebrahim, Z., Anawar, S. & Cheah, A. (2015). FIT MANUFACTURING: MAPPING PRODUCT COST REQUIREMENTS USING RELATIONAL DATABASE DESIGN. *Journal of Advanced Manufacturing Technology (JAMT)*, 9(1). URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:73614513>
8. Cesén, M., Vila, C., Ayabaca, C., Zambrano, I., Valverde, J., & Fuentes, P. (2022). Cost optimization of the AISI-1018 turning process under sustainable manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, 49(1), 58–63. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.473>
9. Torres, A. F., de Almeida, F. A., de Paiva, A. P., et al. (2019). Impact of stochastic industrial variables on the cost optimization of AISI 52100 hardened-steel turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104, 4331–4340. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04273-1>
10. Al Ghifary, H., Sukanta, S., & Suseno, A. (2021). Perhitungan Ongkos Operasi pada Produk Inner Tube Berdasarkan Distribusi Beban Ongkos. *AKUNTANSI DEWANTARA*, 5(2), 1–6. <https://doi.org/10.26460/ad.v5i2.8278>
11. Каталог Sandvik Coromant. (2020). Токарні інструменти polidecktech.com. <https://polidecktech.com/all-catalogs/catalog-sandvik-coromant>

Дата першого надходження рукопису до видання: 21.11.2025
 Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 17.12.2025
 Дата публікації: 31.12.2025