

Володимир Тулупов¹, Сергій Онищук²

¹кандидат технічних наук, доцент кафедри інноваційних технологій і управління
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ-Тернопіль, Україна)

E-mail: wladimir.tulupov@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3951-364X>

²кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інноваційних технологій і управління
Донбаська державна машинобудівна академія (Краматорськ-Тернопіль, Україна)

E-mail: onishchuk65@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8157-6869>

**ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ
У ВАЖКОМУ МАШИНОБУДУВАННІ**

Досліджено використання енергозберігаючих технологій у важкому машинобудуванні. Для оптимізації процесу механічної обробки запропоновано використовувати кількісні показники питомої енергоємності різання. Визначено доцільність використання технологічних методів оброблення деталей машин із застосуванням електричного струму, зокрема точінні зі змінним струмом та точіння з електроімпульсним нагріванням. Доведено, що використання енергозберігаючих технологій забезпечує зменшення трудомісткості та тривалості виробничого циклу.

Ключові слова: енергоефективність; технологічний процес; питома енергоємність різання; електричний струм; точіння.

Табл.: 1. Рис.: 1. Бібл.: 7.

Актуальність теми дослідження. Конкурентоспроможність продукції сучасного машинобудування залежить від вартості енерговитрат на механічну обробку деталей машин. Питома частка вартості енерговитрат у загальній собівартості виготовлення продукції може досягати від 15 до 25 % [1]. У зв'язку з постійним зростанням вартості енергетичних ресурсів виникає необхідність використання енергозберігаючих технологій. Особливої ваги використання енергозберігаючих технологій набуває для виготовлення продукції важкого машинобудування.

Постановка проблеми. Однією з енергоємних операцій у технологічному процесі виготовлення деталей машин є термічна операція. Крім того, використання термічної обробки потребує переривання технологічного процесу, що суттєво збільшує виробничий цикл виготовлення деталей машин. Тому постає завдання дослідження енергоефективних способів механічної обробки деталей, зокрема таких, що дозволять суттєво зменшити енерговитрати на виробництво продукції.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання енергоефективності процесів механічної обробки розглядаються в роботах [2], [3] та [4]. Як критерії оптимізації процесу механічної обробки пропонується використовувати кількісні показники питомої енергоємності різання. Перевагами цих показників, що зумовлюють перспективність їх використання в оптимізаційних моделях процесів механічної обробки, є їхній чіткий фізичний зміст, універсальність, простота визначення за допомогою як теоретичних, так і експериментальних методів.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Незважаючи на достатньо високий рівень енергетичних витрат при механічній обробці в умовах важкого машинобудування енергетичні критерії оптимізації мають обмежене використання. До того ж потрібний аналіз доцільності використання методів зміцнення в технологічних процесах механічної обробки.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження використання енергозберігаючих технологій при виготовленні деталей машин у важкому машинобудуванні.

Виклад основного матеріалу. Важке машинобудування є галуззю промисловості України, яка забезпечує отримання значної частини валового національного продукту. Особливостями механічної обробки деталей важкого машинобудування, що зумовлюють великі енергетичні витрати на обробку, є такі [1]:

– великі значення потужності електродвигуна головного привода руху (ПГР) верстата, що зумовлюють високий рівень абсолютних витрат (втрат) енергії за заданого значення питомих витрат (втрат);

– великі припуски на обробку деталей, що зумовлюють високі силові навантаження в зоні різання;

– великі втрати електроенергії під час роботи електродвигуна ППР верстата на холостому ходу під час зміни різальної пластини (різцевого) блока внаслідок відмови, що відбулася.

Для підвищення енергоефективності процесів механічної обробки деталей важкого машинобудування автори роботи [1] пропонують як один із напрямів вирішення завдання зменшення витрат енергії на протікання фізичних процесів у зоні різання за рахунок оптимізації технологічних параметрів обробки.

Загальна структура математичної моделі для визначення оптимальних технологічних параметрів енергоефективних процесів механічної обробки деталей важкого машинобудування передбачає рішення оптимізаційної задачі виду [2]:

$$Q = \text{extr}\{f(x, w) | x \in D\}, \quad (1)$$

із системою обмежень виду:

$$g(x, w) \leq 0;$$

$$f(x) \leq 0;$$

$$a_i \leq x_i \leq b_i,$$

де $f(x, w)$ – цільова функція (критерій оптимізації);

x – керовані (варійовані) параметри обробки;

w – постійні параметри обробки;

D – область допустимих значень керованих параметрів x ;

$a_i = \text{const}$, $b_i = \text{const}$.

Рівень енергозатрат у зоні різання, які витрачається на знімання заданого об'єму матеріалу шару заготовки, що зрізається, найкращим чином відображається питомою енергоємністю різання [3]:

$$e = \frac{A_{\text{різ}}}{V} = \frac{N_{\text{еф}}}{\Pi_{\text{різ}}} = \frac{N}{vSt}, \quad (2)$$

де $A_{\text{різ}}$ – робота різання;

V – обсяг зрізаного шару матеріалу, що перетворюється на стружку;

$N_{\text{еф}}$ – ефективна потужність різання;

$\Pi_{\text{різ}}$ – продуктивність різання (знімання стружки в одиницю часу);

v – швидкість різання;

S – подача різця;

t – глибина різання.

Питома енергоємність різання не пов'язана з розмірами заготовки, безпосередньо не залежить від часу обробки, і отже, може використовуватися як критерій для порівняння енергетичної ефективності альтернативних процесів обробки, а також параметрів окремих операцій. Після перетворення залежності (2) на цільову функцію виду $e \rightarrow \min$ її можна використовувати як критерій оптимізації для встановлення параметрів обробки різанням, які дозволяють мінімізувати енергетичні витрати без втрати продуктивності [5].

Вирішення завдання щодо зменшення витрат енергії на протікання фізичних процесів у зоні різання здійснюється використанням додаткових джерел тепла. Вимоги до штучних джерел тепла під час вибору методу оброблення такі [6]:

- джерело тепла повинне мати високий ступінь локалізації тепла. Найбільший ступінь локалізації ($10^6 \dots 10^8 \text{ Вт/см}^2$) мають лазерне, плазмове й електричне джерела, найменший ступінь локалізації в дуги побічної дії, навіть при обтисканні її плазмотроном, а також у газового полум'я;

- джерела за виглядом поділяються на внутрішні та зовнішні. Внутрішнє джерело тепла виникає в зоні деформації металу і виходить переважно від електричних джерел за допомогою електроопору. До переваг внутрішнього джерела належить його широке застосування незалежно від форми оброблюваних заготовок, а також від виду оброблення;

- потужність. Найбільшу потужність мають електричне, лазерне та плазмове джерела;

- ККД джерел, або ефективне введення тепла в оброблювану заготовку. Найбільший ККД (0,7...0,8) має електричне і найменший (0,4...0,5) – лазерне і плазмове джерела;

- джерела за відстанню до зони деформації поділяються на ті, працюють в зоні деформації, наприклад електричні, та поза зоною деформації – плазмові й індукційні;

- швидкість нагрівання. Найбільші швидкості нагрівання у електричного, лазерного й індукційного джерел. Швидкість нагрівання може досягати 10^5 – 10^6 °C/c;

- форма джерел може змінюватися в широких межах, але найбільш поширені круглі, прямокутні, еліпсні або зони деформації, що мають форму, коли джерело виникає в цій зоні;

- за безпекою для обслуговуючого персоналу найбільш переважні внутрішні джерела, до яких застосовні звичайні заходи електробезпеки. Під час роботи із лазерними та плазмовими джерелами необхідно застосування спеціальних екранів.

Ідеальне штучне джерело тепла, що застосовується у технологічному методі поверхневого зміцнення, повинно забезпечувати швидкісне нагрівання металу, піддаватися контролю та регулюванню в строго нормованих дозах в одиницю часу, забезпечувати широкий діапазон температур. Під час вибору методу оброблення велике значення мають питомі витрати енергії на нагрівання одиниці об'єму металу (рис. 1) [6]. Питома енергоємність є універсальним критерієм, величина якого залежить від властивостей оброблюваного матеріалу, параметрів інструменту та режиму оброблення і не залежить від характеру виробництв, на відміну від економічних критеріїв.

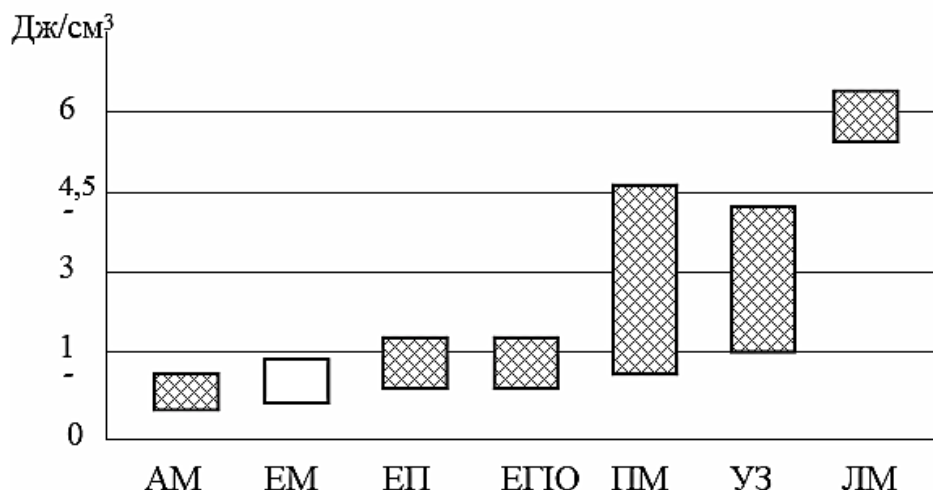


Рис. 1. Питомі витрати енергії на нагрівання об'єму металу технологічних методів:

1 – анодно-механічне оброблення (АМО); 2 – електромеханічне оброблення (ЕМО);

3 – електронно-променево оброблення (ЕПО); 4 – електрогідропульсне оброблення

(ЕГПО); 5 – плазмово-механічне оброблення (ПМО); 6 – ультразвукове оброблення

(УЗО); 7 – лазерно-механічне оброблення (ЛМО)

Найменші витрати енергії (питома енергоємність різання) спостерігаються при застосуванні електричних джерел тепла, а найбільші – плазмово-механічних і лазерно-механічних.

У зв'язку з вищезазначеними вимогами авторами запропоновано використання електричного струму як джерела тепла [7]. Реалізацією є два технологічних способи – електромеханічне точіння та чистове точіння з електроімпульсним нагріванням.

Перший спосіб заснований на використанні електричного струму при точінні, що супроводжується одночасним силовим та тепловим впливом на оброблювану поверхню. Особливістю способу є те, що в зону різання вводиться змінний електричний струм, що пропускається через головну задню поверхню різальної кромки з нульовим заднім кутом, що значно збільшує пластичну зону. Живлення відбувається від джерела змінного струму при робочій напрузі 3-6 В та силі струму $I = 150-200$ А.

Другий спосіб чистового точіння заснований на пропусканні імпульсного струму через головну задню поверхню різальної кромки. У результаті утворюється регулярна дискретна структура у вигляді зміцнених фрагментів. Розташування зміцнених фрагментів залежить від частоти та тривалості імпульсів струму, а також режимів механічного оброблення (повздовжньої подачі та частоти обертання шпинделя). Живлення відбувається від генератора імпульсного струму. Основними характеристиками генератора імпульсного струму є: частота імпульсного струму 20...8000 Гц, шпаруватість 20...80%, максимальна робоча напруга 10 В, вихідний імпульсний струм прямокутної форми.

Довжина зміцнених фрагментів l_ϕ забезпечується тривалістю імпульсу τ_i , яка визначається за формулою [7]:

$$\tau_i = \frac{60l_\phi}{\pi D_{\text{дет}} n} K, \quad (3)$$

де l_ϕ – довжина зміцненого фрагмента, мм;

$D_{\text{дет}}$ – діаметр поверхні оброблюваної деталі, мм;

n – кількість обертів шпинделя, хв^{-1} ;

K – коефіцієнт, який залежить від матеріалу оброблювальної заготовки, щільності струму при пропусканні його через зону різання та швидкості різання.

Зміцнення поверхонь деталей шляхом пропускання імпульсу струму при механічній обробці сприяє утворенню незміцнених проміжків серед зміцнених фрагментів, тобто змащувальних кишень. Наявність регулярного мікрорельєфу створює умови для рідинного режиму тертя при експлуатації деталі, що підвищує їхні експлуатаційні властивості та термін служби.

Виконані експериментальні дослідження технологічних можливостей способу чистового точіння з електроімпульсним нагріванням. Металографічні дослідження зразків зі сталі 40ХН, що були виконані після обробки, показали формування в поверхневому шарі дрібнозернистої мартенситної структури та «білого» шару товщиною до 0,1 мм. Мікротвердість світлої зони поверхневого шару разом із мартенситом становить $H_\mu = 5900$ МПа. Дослідження зносостійкості зразків, що загартовані СВЧ та тих, що пройшли механічне оброблення з імпульсним струмом, на машині тертя СМЦ-2 довели, що зношення менше у зразків, що оброблені з імпульсним струмом.

Дослідження якості поверхні після чистового точіння з електроімпульсним нагріванням свідчать про те, що при швидкості різання $v = 100$ м/хв, подачі $s = 0,23$ мм/об, глибині різання $t = 0,35$ мм, силі струму $I = 150$ А та шпаруватості $q = 65\%$ шорсткість поверхні становить $Ra = 0,8 - 1$ мкм.

Використання електричного струму в зоні різання призводить до покращення умов різання за рахунок збільшення пластичної зони та, як наслідок, зменшення сили різання. Проведені експериментальні дослідження складових сил різання з використан-

ням універсального трикомпонентного динамометра свідчать про зменшення їх величини на 20-30 % залежно від оброблюваного матеріалу та режимів різання. У результаті зменшується потужність різання $N_{\text{эф}}$, та відповідно й питома енергоємність різання, що визначається за формулою (2).

Технологічна операція чистового точіння з електроімпульсним нагріванням використовується в технологічному процесі виготовлення ступінчастих валів номенклатури ПрАТ «СМЗ». Матеріал валу – сталь 40ХН. Габаритні розміри валу – максимальний діаметр – 200 мм, довжина – 1020 мм.

На відміну від базового технологічного процесу використання точіння з електроімпульсним нагріванням має декілька переваг: можливість зміцнювання поверхневого шару деталі диференційно її зносу (для деталей, що нерівномірно зношуються); обробка на одному технологічному обладнанні; скорочення кількості технологічних операцій; низькі витрати на устаткування.

У запропонованому технологічному процесі замість чотирьох операцій (токарної, двох круглошліфувальних та термічної) запропонована одна – операція електроімпульсного точіння. Енергоспоживання за двома варіантами технологічного процесу наведено в таблиці [7].

Використання способів обробки з використанням електричного струму дозволяє зменшити витрати енергії на виготовлення деталей машин, зменшити тривалість виробничого циклу за рахунок зменшення кількості технологічних операцій, однією з яких є термічна обробка. Дані таблиці 1 свідчать про те, що кількість енергії, що витрачається на виконання чотирьох операцій може бути зменшена при заміні на операцію точіння з електроімпульсним нагріванням на 80 %.

Таблиця – Енергоспоживання для базового й нового варіанта технологічного процесу

Номер операції	Назва операції	Потужність, кВт	Енергія, кВт/год
Базовий варіант			
035	Токарно-гвинторізна мод. 16К30	0,51	0,12
040	Термічна ТО гарт ТВЧ	250	2,5
050	Круглошліфувальна мод. 3А172	0,65	0,14
055	Круглошліфувальна мод. 3А172	0,4	0,03
Всього		3,56	2,8
Новий варіант			
035	точіння з ЕІН 16К30	3,65	0,60

Висновки. У роботі досліджено використання енергозберігаючих технологій при виготовленні деталей машин у важкому машинобудуванні. Визначено, що найменші витрати енергії (питома енергоємність різання) спостерігаються при застосуванні електричних джерел тепла. Використання чистового точіння з електроімпульсним нагріванням дозволяє отримати регулярну дискретну структуру поверхневого шару деталі у вигляді зміцнених фрагментів. Наявність такої структури створює умови для рідинного режиму тертя при експлуатації деталі, що підвищує їх експлуатаційні властивості та термін служби. Визначено, що запровадження методів обробки з використанням електричного струму, зокрема, точіння з електроімпульсним нагріванням, дозволяє зменшити тривалість виробничого циклу виготовлення деталей важкого машинобудування за рахунок зменшення кількості технологічних операцій. Кількість енергії, що витрачається при цьому, може бути зменшена на 80 %.

Список використаних джерел

1. Мироненко Е. В. Общая структура математической модели для определения энергоэффективных технологических параметров токарной обработки деталей тяжелого машиностроения / Е. В. Мироненко, Г. П. Клименко, В. В. Калиниченко // *Резание и инструмент в технологических системах*. – 2015. – Вып. 85. – С. 202–210.
2. Старков В. К. Физика и оптимизация резания материалов / В. К. Старков. – М. : Машиностроение, 2009. – 640 с.
3. Карпов А. В. К вопросу управления процессом резания на основе энергетических закономерностей деформации и разрушения твердых тел / А. В. Карпов // *Машиностроение и безопасность жизнедеятельности*. – 2011. – № 1 (8). – С. 37–49.
4. Адаменко В. М. Энергоэффективность процесса резания поверхностей заготовок деталей на основе анализа энергопотребляющих показателей технологического оборудования / В. М. Адаменко, Ж. А. Мрочек // *Наука и техника*. – 2012. – № 4. – С. 3–6.
5. Яровой Ю. В. Распределение припуска по условию минимума удельной работы резания / Ю. В. Яровой, И. А. Яровая // *Сучасні технології в машинобудуванні*. – 2015. – Вип. 10. – С. 80–85.
6. Алифанов А. Я. Основные принципы классификации электрофизических, электро-механических и комбинированных методов обработки / А. Я. Алифанов // *Вестник машиностроения*. – 1993. – № 5–6. – С. 41–44.
7. Ковалевський С. В. Спеціальні методи оброблення робочих поверхонь деталей машин : монографія / С. В. Ковалевський, В. І. Тулупов. – Краматорськ : ДДМА, 2012. – 100 с.

References

1. Mironenko, E.V., Klimenko, G.P., Kalinichenko, V.V. (2015). Obshchaia struktura matematicheskoi modeli dlia opredeleniia energoeffektivnykh tekhnologicheskikh parametrov tokarnoi obrabotki detalei tiazhelogo mashinostroeniia [The general structure of the mathematical model for determining the energy-efficient technological parameters of turning heavy engineering parts]. *Rezanie i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and tooling in technological systems*, (85), 202–210.
2. Starkov, V.K. (2009). *Fizika i optimizatsiia rezaniia materialov [Physics and optimization of cutting materials]*. Mashynostroenie.
3. Karpov, A.V. (2011). K voprosu upravleniia protsessom rezaniia na osnove energeticheskikh zakonomernostei deformatcii i razrusheniia tverdykh tel [On the issue of cutting process control based on the energy laws of deformation and destruction of solids]. *Mashinostroenie i bezopasnost zhiznedeiatel'nosti – Mechanical engineering and life safety*, (1(8)), 37–49.
4. Adamenko, V.M., Mrochek, Zh.A. (2012). Energoeffektivnost protcessa rezaniia poverkhnostei zagotovok detalei na osnove analiza energopotrebliaiushchikh pokazatelei tekhnologicheskogo oborudovaniia [Energy efficiency of the process of cutting the surfaces of workpieces based on the analysis of energy-consuming indicators of process equipment]. *Nauka i tekhnika – Science and technology*, (4), 3–6.
5. Iarovoi, Iu.V., Iarovaia, I.A. (2015). Raspredelenie pripuska po usloviu minimuma udelnoi raboty rezaniia [Allowance distribution according to the condition of minimum specific cutting work]. *Suchasni tekhnologii v mashynobuduvanni – Modern technologies in mechanical engineering*, (10), 80–85.
6. Alifanov, A.Ia. (1993). Osnovnye printcipy klassifikatsii elektrofizicheskikh, elektromekhanicheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki [Basic principles for the classification of electrophysical, electromechanical and combined processing methods]. *Vestnik mashinostroeniia – Herald of machine-building*, (5–6), 41–44.
7. Kovalevskiy, S.V., Tulupov, V.I. (2012). *Spetsialni metody obrobлення robochykh poverkhon detalei mashyn [Special methods of processing working surfaces of machine parts]*. DSEA.

Отримано 15.12.2022

Volodimir Tulupov¹, Serhii Onyshchuk²

¹PhD in Technical science, Associate Professor of Innovative Technologies and Management Department
Donbas State Engineering Academy (Kramatorsk-Ternopil, Ukraine)

E-mail: vladimir.tulupov@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-3951-364X>

²PhD in Technical science, Associate Professor of Innovative Technologies and Management Department
Donbas State Engineering Academy (Kramatorsk-Ternopil, Ukraine)

E-mail: onishchuk65@gmail.com. **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8157-6869>

USE OF ENERGY SAVING TECHNOLOGIES IN HEAVY ENGINEERING

Modern mechanical engineering is characterized by high energy consumption, which specific share of cost can reach from 15 to 25 %. The task is to research energy-efficient technological methods of mechanical processing, which will reduce the cost and duration of the production cycle.

As a criterion for optimizing the machining process, it is proposed to use quantitative indicators of the specific energy intensity of cutting. The feasibility of using energy-efficient strengthening methods in the technological process of manufacturing parts in heavy engineering needs to be studied.

The purpose of the work is to study the use of energy-saving technologies in the manufacture of machine parts in heavy engineering.

It is proposed to use a mathematical model to determine the optimal technological parameters of energy-efficient processes of mechanical processing of heavy engineering parts. The level of energy consumption in the cutting zone, which is spent on removing a given volume of material from the layer of the workpiece being cut, is best reflected by the specific energy intensity of cutting.

To ensure the operational properties of machine parts, it is proposed to use methods of surface strengthening with the use of electric current.

The use of finishing turning with electric pulse heating in the manufacturing process of the shaft allows to replace four operations - turning, heat treatment, two circular grinding operations - with one operation.

Clean turning with electric pulse heating has such advantages as: the possibility of strengthening the surface layer of the part by differentially wearing it (for parts that wear unevenly); processing on one technological equipment; reducing the number of technological operations; low equipment costs.

It was determined that the introduction of processing methods using electric current, in particular, turning with electric pulse heating, allows to significantly reduce the duration of the production cycle of manufacturing parts of heavy engineering. The amount of energy consumed can be reduced by 80 %.

Keywords: energy efficiency; technological process; specific energy intensity of cutting; electric current; turning

Tabl.: 1. Fig.: 1. References: 7.