

**Новіков Ф. В.** (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна)

**Новіков Д. Ф.** (Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, м. Харків, Україна)

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УМОВ ЗМЕНШЕННЯ СОБІВАРТОСТІ МЕТАЛООБРОБНОГО ВИРОБНИЦТВА

***Анотація.** Розроблено математичну модель собівартості металообробного виробництва. Встановлено існування мінімуму собівартості обробки зі збільшенням швидкості різання. Показано, що оптимальна стійкість різального інструменту, яка визначає мінімальну собівартість обробки, визначається лише економічними параметрами. Це вказує на ефективність застосування високопродуктивної високошвидкісної обробки інструментами зі зносостійкими покриттями на верстатах з числовим програмним керуванням (ЧПК) типу «обробний центр».*

***Abstract.** A mathematical model of the cost of metalworking production has been developed. The existence of a minimum cost of processing with increasing cutting speed has been established. It has been shown that the optimal tool life of the cutting tool, which determines the minimum cost of processing, is determined only by economic parameters. This indicates the effectiveness of the use of high-performance high-speed processing with tools with wear-resistant coatings on numerically controlled (NC) machines of the “machining center” type.*

**Постановка проблеми та її зв'язок з науковими і практичними роботами.** Обробка матеріалів різанням є основним методом в металообробному виробництві. Розвитку цього методу весь час приділяють значну увагу. Так, за останні роки відбулися кардинальні зміни в забезпеченні металообробного виробництва сучасним обладнанням і ріжучими інструментами. На зміну застарілим конструкціям універсальних металорізальних верстатів прийшли сучасні верстати із числовим програмним керуванням (ЧПК) типу «обробний центр», які дозволили автоматизувати технологічні процеси механічної обробки та суттєво (до 10 разів і більше) підвищити продуктивність і зменшити собівартість обробки із забезпеченням високих показників якості та точності. В досягненні таких високих показників обробки значну роль відіграють сучасні високопродуктивні ріжучі лезові твердосплавні та керамічні інструменти зі зносостійкими покриттями, які реалізують високошвидкісне різання – прогресивний метод обробки матеріалів різанням. Разом з тим, як показує практичний досвід, у зв'язку з високою вартістю цих верстатів та ріжучих інструментів (виробництва провідних верстатострументальних компаній світу) різко зростає собівартість обробки, і застосування нових технологій високошвидкісної обробки у ряді випадків стає економічно недоцільним. Тому для вирішення задачі ефективної механічної обробки деталей машин важливо визначити умови зменшення собівартості обробки, які

визначають, головним чином, собівартість машинобудівної продукції. Це дозволить науково обґрунтовано підійти до вибору раціональних режимів різання та характеристик прогресивних лезових різальних інструментів під час обробки деталей машин на високооберткових верстатах з ЧПК. У зв'язку з цим у роботі запропоновано нову математичну модель собівартості механічної обробки та встановлено умови її суттєвого зменшення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз собівартості виготовлення машинобудівної продукції на машинобудівних підприємствах України показав, що найбільшими є статті витрат, пов'язані із заробітною платою виробничих робітників і витратами на сировину та матеріали, що в середньому становлять до 25 % [1]. Тому зменшити собівартість машинобудівної продукції можна насамперед завдяки збільшенню продуктивності праці шляхом застосування досконаліших технологій, обладнання та інструментів. Важливу роль у цьому відіграє ріжучий інструмент. Як показав аналіз фінансово-економічної діяльності численних машинобудівних підприємств, стаття витрат, пов'язана з витратою інструментів, становить 3 ... 5 % собівартості виготовлення виробу. Причому, цей відсоток фактично не змінюється при використанні нових сучасних ріжучих інструментів, які пропонують провідні зарубіжні верстатострументальні фірми та які в 10 – 100 разів дорожчі за вітчизняні інструменти. Це пов'язано з тим, що їх працездатність пропорційна підвищенню ціни. Однак, застосування даних інструментів дозволяє збільшити продуктивність праці та вирішити проблему зменшення собівартості виготовлення машинобудівної продукції [2].

У роботі [1] також показано, що зменшення ціни ріжучого інструменту на 20 % відповідає зменшенню собівартості виробу лише на 0,6 %. Збільшення вдвічі терміну служби ріжучого інструменту також призводить до невеликого зменшення собівартості виробу – лише на 1,5 %. Збільшення ж продуктивності обробки завдяки застосуванню ефективного інструменту на 20 % призводить до зменшення собівартості виробу на 15 %. Це відбувається завдяки застосуванню прогресивнішого інструменту і зменшенню статті витрат, пов'язаної із заробітною платою робітників. Тому надзвичайно важливим завданням обґрунтування напрямів розвитку промислових підприємств є завдання теоретичного аналізу умов зменшення собівартості та збільшення продуктивності праці [3, 4]. Цього можна досягти на основі проведення оптимізації собівартості виробу з урахуванням двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робітника та витратою на інструменти.

**Формулювання невирішених частин загальної проблеми.** До невирішених частин загальної проблеми зменшення собівартості металообробного виробництва слід віднести недостатньо повний її теоретичний аналіз, пов'язаний із необхідністю проведення оптимізаційних розрахунків та обґрунтування ефективного застосування сучасних високоефективних різальних інструментів зі зносостійкими покриттями та високошвидкісних металорізальних верстатів із ЧПК.

**Цілі статті та постановка задачі.** Метою роботи є теоретичний аналіз і обґрунтування собівартості металообробного виробництва, визначення умов її зменшення на основі застосування сучасних високоефективних різальних інструментів зі зносостійкими покриттями та металорізальних верстатів з ЧПК.

Задачі дослідження:

- 1) розроблення математичної моделі визначення собівартості металообробного виробництва із урахуванням двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робочого і витратами на інструменти;
- 2) теоретичне обґрунтування собівартості металообробного виробництва та встановлення умов її зменшення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для вирішення поставленої задачі слід розглянути теоретичне рішення щодо визначення собівартості обробки із урахуванням двох змінних статей витрат, пов'язаних із заробітною платою робочого і витратами на різальні інструменти, яке наведено в роботах [5, 6]:

$$C = N \cdot t_0 \cdot S_{\text{зод}} \cdot k + N \cdot \frac{t_0}{T} \cdot \text{Ц}, \quad (1)$$

де  $N$  – кількість оброблюваних деталей;  $t_0$  – основний технологічний час обробки, хв;  $S_{\text{зод}}$  – тарифна ставка робітника, грн/хв;  $k$  – коефіцієнт, що враховує різні нарахування на тарифну ставку робітника;  $T = n \cdot t_0$  – стійкість ріжучого інструменту, хв;  $n$  – кількість деталей, оброблених одним ріжучим інструментом;  $\text{Ц}$  – ціна ріжучого інструменту, грн.

Технологічний час обробки  $t_0$  та стійкість ріжучого інструменту для поздовжнього точіння визначаються такими залежностями:  $t_0 = i \cdot \frac{l}{S_{\text{нозд}}} = \frac{\pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot \Pi \cdot l}{V \cdot t \cdot S}$ ;  $T = \frac{C_4}{V^{m_1} \cdot t^q \cdot S^p}$ , де  $i = \Pi / t$  – кількість поздовжніх ходів інструменту;  $\Pi$  – припуск, що знімається, м;  $t$  – глибина різання, м;  $l$  – довжина ходу інструменту, м;  $S_{\text{нозд}} = V \cdot S / (\pi \cdot D_{\text{дем}})$  – швидкість поздовжньої подачі, м/хв;  $V$  – швидкість різання, м/хв;  $S$  – подача, м/оберт;  $D_{\text{дем}}$  – діаметр оброблюваної деталі, м;  $C_4, m_1, q, p$  – постійні для заданих умов обробки.

Після перетворень залежність (1) набуває вигляду:

$$C = \mathcal{G}_{\text{сум}} \cdot \left( \frac{S_{\text{зод}} \cdot k}{V \cdot t \cdot S} + \frac{\text{Ц}}{C_4} \cdot \frac{V^{m_1-1}}{t^{1-q} \cdot S^{1-p}} \right), \quad (2)$$

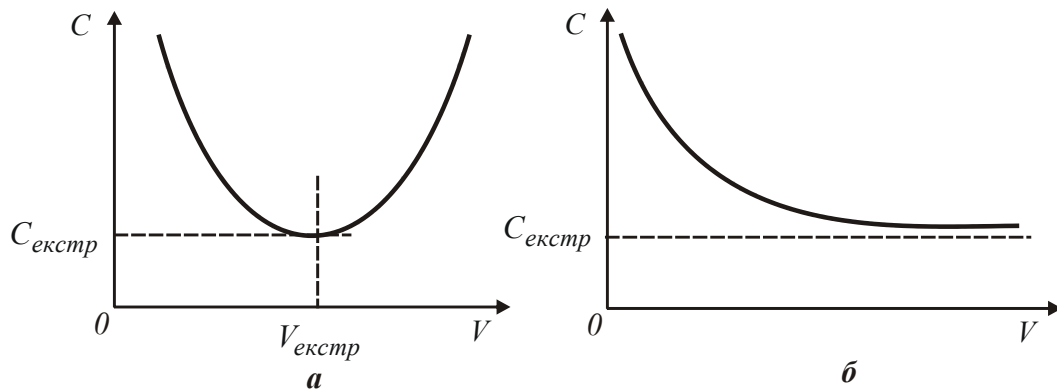
де  $\mathcal{G}_{\text{сум}} = \pi \cdot D_{\text{дем}} \cdot \Pi \cdot l \cdot N$  – сумарний об'єм матеріалу, що видаляється з усіх оброблюваних деталей, м<sup>3</sup>.

Як видно, зі збільшенням параметрів режиму різання  $t$  і  $S$  собівартість обробки  $C$  зменшується, а зі збільшенням швидкості різання  $V$  – змінюється за екстремальною залежністю. Тому екстремальні значення  $V$  і  $C$  визначаються з необхідної умови екстремуму  $C'_V = 0$ :

$$V_{екстр} = \left[ \frac{S_{зод} \cdot k \cdot C_4}{(m_1 - 1) \cdot \Pi \cdot t^q \cdot S^p} \right]^{\frac{1}{m_1}}. \quad (3)$$

Розрахунками встановлено, що друга похідна  $C''_V$  у точці екстремуму – позитивна величина, тому має місце мінімум функції  $C = f(V)$  (рис. 1):

$$C_{екстр} = \mathcal{G}_{сум} \cdot m_1 \cdot \left( \frac{S_{зод} \cdot k}{m_1 - 1} \right)^{1 - \frac{1}{m_1}} \cdot \left( \frac{\Pi}{C_4} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot \frac{1}{t^{\frac{1-q}{m_1}} \cdot S^{\frac{1-p}{m_1}}}. \quad (4)$$



**Рис. 1.** Залежності собівартості обробки  $C$  від швидкості різання  $V$  за умов  $m_1 > 1$  (а) і  $m_1 = 1$  (б)

Із залежностей (3) і (4) випливає, що з погляду забезпечення заданої собівартості обробки  $C_{екстр}$  (рис. 1,а) збільшення швидкості різання  $V_{екстр}$  обмежено. Отже, застосування високошвидкісного різання вимагає «переміщення» точки екстремуму в область більших значень  $V_{екстр}$ . Це може бути досягнуто, виходячи із залежності (3), зменшенням ціни інструменту  $\Pi$  і підвищенням його властивостей міцності, узагальнено визначених параметром  $C_4$ . Однак навіть зі значною зміною зазначених параметрів це не призведе до помітного збільшення  $V_{екстр}$ , оскільки вони входять у залежність (3) із ступенем менше одиниці (за умови  $m_1 > 1$ ). Набагато більшого ефекту в цьому випадку можна досягти за рахунок зменшення параметра  $m_1 \rightarrow 1$ . Тоді, виходячи із залежності (3), екстремальне значення швидкості різання  $V_{екстр} \rightarrow \infty$ , а собівартість обробки  $C_{екстр}$ , що описується залежністю (4) з урахуванням  $m_1 > p > q$ , набуває вигляду:

$$C_{екстр} = \frac{\mathcal{G}_{сум} \cdot \Pi}{C_4 \cdot S \cdot t}. \quad (5)$$

Залежність (1) після перетворень з урахуванням  $m_1 \rightarrow 1$  опишеться:

$$C = \frac{\mathcal{G}_{сум} \cdot S_{зод} \cdot k}{V \cdot S \cdot t} + \frac{\mathcal{G}_{сум} \cdot \Pi}{C_4 \cdot S \cdot t}. \quad (6)$$

Як видно, зі збільшенням швидкості різання  $V$  собівартість обробки  $C$  безперервно зменшується, асимптотично наближаючись до значення  $C_{екстр}$  (рис. 1,б), що визначається залежністю (5). Отже, після перевищення певного значення  $V$  собівартість обробки  $C$  залишається майже незмінною, тоді як продуктивність обробки  $Q = V \cdot t \cdot S$  необмежено збільшується. Це, власне, і визначає ефект високошвидкісної обробки (що досягається за умови  $m_1 \rightarrow 1$ ).

Із фізичного погляду випадок  $m_1 = 1$  означає те, що стійкість різального інструменту не залежить від швидкості різання  $V$ , тобто температурний чинник не є визначальним у зношуванні інструменту. Зношування відбувається в основному від дії механічного чинника. Дана закономірність може мати місце при різанні алмазними інструментами, які забезпечують інтенсивне відведення тепла із зони різання та суттєве зменшення температури різання. У результаті інструмент під час обробки знаходиться фактично в холодному стані, що сприяє підвищенню його стійкості. Отже, стійкість різального інструмента визначає, головним чином, рівень собівартості обробки  $C$ . Виключення переважаючої ролі температурного чинника у формуванні показника стійкості ріжучого інструменту є основною умовою зменшення собівартості обробки та значного збільшення швидкості різання  $V_{екстр}$ , що дозволяє реалізувати високошвидкісну обробку на сучасних верстатах з ЧПК ( $n = 20000$  об./хв і більше). Прикладом здійснення даної умови може бути застосування тврдосплавних інструментів зі зносостійкими покриттями, які зберігають свої експлуатаційні властивості за високої температури різання.

Продуктивність обробки  $Q_{екстр}$  та стійкість інструменту  $T$  в точці мінімуму функції  $C$  визначаються залежностями:

$$Q_{екстр} = \left( \frac{C_4 \cdot S_{200} \cdot k}{(m_1 - 1) \cdot C} \right)^{\frac{1}{m_1}} \cdot t^{1 - \frac{q}{m_1}} \cdot S^{1 - \frac{p}{m_1}}; \quad (7)$$

$$T = \frac{(m_1 - 1) \cdot C}{S_{200} \cdot k}. \quad (8)$$

Забезпечити зменшення собівартості обробки  $C$  при одночасному збільшенні продуктивності обробки  $Q_{екстр}$  можна збільшенням параметрів  $t$  і  $S$ , а також зменшенням  $V_{екстр}$  відповідно до залежності (3). Оптимальна стійкість інструменту  $T$  не залежить від параметрів режимів різання, а визначається економічними параметрами  $S_{200}$ ,  $k$ ,  $C$ . Оскільки параметри  $S_{200}$  і  $k$  впливають на собівартість обробки  $C$  та стійкість інструменту  $T$ , то між  $C$  і  $T$  не існує цілком однозначного зв'язку. Параметр може змінюватися у більших межах, ніж параметри  $S_{200}$  і  $k$ . Виходячи з цього, завдяки зниженню  $C$  можна зменшувати параметри  $C$  і  $T$ , тобто економічно ефективно працювати з мінімально можливими значеннями  $T$ . Зменшення параметра  $C$  призводить до збільшення

параметрів  $Q$  і  $V_{екстр}$ . Оскільки  $q < p$ , то глибина різання входить у залежність (7) з більшим ступенем, ніж подача  $S$ . У зв'язку з цим доцільно, насамперед, збільшувати глибину різання  $t$  до величини припуску  $\Pi$ , що знімається, тобто обробку проводити за один прохід інструменту.

Залежність (4) з урахуванням залежності (7) набуває вигляду:

$$C_{екстр} = \vartheta_{сум} \cdot \frac{S_{год} \cdot k}{Q_{екстр}} \cdot \frac{m_1}{(m_1 - 1)}. \quad (9)$$

За суттю, отримано залежність (2), в якій другий доданок виражений через перший доданок. Зменшити собівартість обробки  $C_{екстр}$  можна збільшенням продуктивності обробки  $Q_{екстр}$  шляхом збільшення параметрів  $t$ ,  $S$  і зменшення  $\Pi$  за залежністю (7). Це вказує на важливість вирішення технологічних завдань щодо визначення оптимальних варіантів обробки деталей з використанням економічних методів [5, 6].

Проведений аналіз собівартості обробки дозволяє визначити економію із заробітної плати робочих-верстатників та витрати різального інструменту, яка, виходячи із залежності (1), виражається:

$$\Delta C = C_{нов} - C_{баз} = N \cdot (t_{0_{нов}} - t_{0_{баз}}) \cdot S_{год} \cdot k + N \cdot \left( \frac{t_{0_{нов}} \cdot \Pi_{нов}}{T_{нов}} - \frac{t_{0_{баз}} \cdot \Pi_{баз}}{T_{баз}} \right). \quad (10)$$

У залежності (10) параметри  $C_{баз}$ ,  $t_{0_{баз}}$ ,  $T_{баз}$ ,  $\Pi_{баз}$  визначають базовий варіант обробки, а параметри  $C_{нов}$ ,  $t_{0_{нов}}$ ,  $T_{нов}$ ,  $\Pi_{нов}$  – новий варіант обробки. Як видно, величина  $\Delta C$  тим більше, чим більше різниця  $(t_{0_{нов}} - t_{0_{баз}})$  і другий доданок залежності, який виражає складний неоднозначний зв'язок між параметрами, що входять до залежності. Це зумовлено екстремальністю залежності (1). Якщо значення  $C_{баз}$  і  $C_{нов}$  належать лівій гілці залежності (рис. 1,а), то матиме місце однозначне збільшення величини  $\Delta C$  під час переходу від базового до нового варіанту обробки. Якщо значення  $C_{баз}$  і  $C_{нов}$  належать різним гілкам залежності (рис. 1,а), то величина  $\Delta C$  може приймати як позитивні, так і негативні значення. В останньому випадку економії  $\Delta C$  не буде досягнуто.

Враховуючи неоднозначність рішень на основі залежності (10), оцінювання економії  $\Delta C$  двох варіантів доцільно проводити на основі порівняння мінімумів собівартості обробки  $C$  відповідно до залежності (9). У цьому випадку величина  $C_{екстр}$  однозначно визначається продуктивністю обробки  $Q_{екстр}$ , що полегшує вирішення оптимізаційних завдань. Очевидно, чим більше  $Q_{екстр}$ , тим менше  $C_{екстр}$ . Отже, зі збільшенням швидкості різання  $V_{екстр}$  збільшується величина  $Q_{екстр}$  і зменшується величина  $C_{екстр}$ . Збільшити швидкість різання  $V_{екстр}$ , згідно із залежністю (3), можна, перш за все, збільшенням параметра  $C_4$  (тобто стійкості різального інструменту) та зменшенням ціни інструменту  $\Pi$ .

При пропорційному збільшенні параметрів  $C_4$  і  $C$  швидкість різання  $V_{екстр}$ , а відповідно і параметри  $Q_{екстр}$ ,  $C_{екстр}$  залишаються незмінними і здавалося б, що ефект обробки досягатися не буде. Однак при цьому необхідно враховувати, що збільшення  $C_4$  передбачає зменшення параметра  $m_1 \rightarrow 1$  (підвищення фізико-механічних властивостей інструментального матеріалу). Це приводить до збільшення швидкості різання  $V_{екстр}$ , відповідно до залежності (3), та зменшення собівартості обробки  $C$  до значення  $C_{екстр}$  (рис. 1,б). Як показано вище, дана закономірність є основою для застосування високошвидкісної обробки деталей машин, що забезпечує суттєву економію від зменшення заробітної плати робітника-верстатника та витрати ріжучого інструменту. Таким чином, у роботі економічно обґрунтовано науковий підхід до вибору оптимального варіанту механічної обробки та металорізального верстата з ЧПК.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Проведено теоретичний аналіз собівартості обробки деталей машин та визначено умови її зменшення. Доведено існування мінімуму собівартості обробки зі збільшенням швидкості різання, який набуває найменших значень при використанні сучасних високоєфективних ріжучих інструментів зі зносостійкими покриттями та високооберткових металорізальних верстатів з ЧПК типу «обробний центр». Перспективами подальших досліджень є теоретико-економічне обґрунтування напрямів ефективного застосування верстатів із ЧПК та інструментів зі зносостійкими покриттями в сучасних умовах переходу від великосерійного до одиничного виробництва.

## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

1. Жовтобрюх В. О. Підвищення ефективності механічної обробки деталей гідравлічних систем шляхом вибору раціональних параметрів операцій за критерієм собівартості: дис. ... канд. техн. наук; 05.02.08 "Технологія машинобудування". Маріуполь: ПДТУ, 2012. 233 с.
2. Кленов О. С. Визначення технологічних можливостей сучасних ріжучих інструментів та методів механічної обробки. Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Краматорськ, 2017. Вип. № 40. С. 66–72.
3. Shtal T. V, Bondarenko L. M, Ukubassova G. S, Amirbekuly Y., Toiboldinova Z.G. The time factor during the formation of the company's entrance to the external market strategy. *Espacios*, 39(12), 23 (2018).
4. Ястремська О. М., Ястремська О. О. Управління розвитком підприємств: уточнення теоретичних положень. *Проблеми економіки*, 2020. 1 (43). С. 214–226.
5. Техніко-економічне обґрунтування сучасних технологій виробництва : навчальний посібник / Ф. В. Новіков, Д. Ф. Новіков, О. А. Єрмоленко, В. О. Жовтобрюх. Дніпро: ЛІРА, 2022. 256 с. <http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/28117>
6. Новіков Ф. В. Оптимальні рішення в металообробці : монографія / Ф. В. Новіков, В. О. Жовтобрюх, Г. В. Новіков. Д.: ЛІРА, 2017. 476 с. <http://www.repository.hneu.edu.ua/jspui/handle/123456789/18360>