

НОВИКОВ Ф. В.**ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ УМОВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИСОКОТОЧНОЇ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ**

Метою дослідження є аналітичне визначення та обґрунтування умов підвищення точності механічної обробки шляхом зменшення величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі, для створення технологічних процесів високоточної лезової та абразивної обробки. Для цього отримано узагальнюючі теоретичні рішення щодо аналітичного визначення складових сили різання, енергоємності обробки, пружних переміщень у технологічній системі. Аналітично встановлено, що сила різання під час лезової обробки (точіння) завжди менше, ніж під час абразивної обробки (шліфування) завдяки зменшенню енергоємності обробки. При цьому під час лезової обробки переважає тангенціальна складова сили різання, а під час шліфування – радіальна складова сили різання, що визначає точність обробки. Аналітично встановлено, що найменший час обробки для забезпечення заданої точності обробки під час шліфування досягається за умови створення в технологічній системі певного початкового натягу, який залежить в основному від ріжучої здатності шліфувального круга. Також встановлено, що підвищити точність обробки можна застосуванням високошвидкісного різання. При цьому схеми однопрохідної та багатопрохідної обробки фактично рівнозначні. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність здійснення автоматизованого процесу круглого зовнішнього шліфування в один перехід, який включає лише перехід виходжування із створенням у технологічній системі початкового натягу, рівного або кратного величині припуску, що знімається. Визначено умови зменшення основного часу обробки за заданої точності оброблюваної поверхні, які обумовлені переходом від дискретного до безперервного характеру знімання припуску. Наведено практичні рекомендації щодо створення ефективних технологічних процесів механічної обробки.

Ключові слова: величина пружного переміщення, технологічна система, початковий натяг, сила різання, шліфування, перехід

NOVIKOV F.**THEORETICAL SUBSTITUTION OF THE CONDITIONS FOR PROVIDING HIGH-PRECISION MECHANICAL PROCESSING**

The purpose of the study is to analytically determine and substantiate the conditions for increasing the accuracy of mechanical processing by reducing the amount of elastic displacement arising in the technological system, to create technological processes of high-precision blade and abrasive processing. For this purpose, generalizing theoretical solutions were obtained for the analytical determination of the components of the cutting force, processing energy intensity, and elastic displacements in the technological system. It was analytically established that the cutting force during blade processing (turning) is always less than during abrasive processing (grinding) due to the reduction in processing energy intensity. At the same time, during blade processing, the tangential component of the cutting force prevails, and during grinding, the radial component of the cutting force, which determines the accuracy of processing. It was analytically established that the smallest processing time to ensure the specified processing accuracy during grinding is achieved under the condition of creating a certain initial tension in the technological system, which depends mainly on the cutting ability of the grinding wheel. It was also established that the machining accuracy can be increased by using high-speed cutting. In this case, the single-pass and multi-pass machining schemes are actually equivalent. The effectiveness of the automated process of circular external grinding in one pass, which includes only the transition of nursing with the creation of an initial tension in the technological system, equal to or multiple of the amount of allowance being removed, has been theoretically substantiated and experimentally confirmed. The conditions for reducing the main machining time for a given accuracy of the machined surface, which are due to the transition from discrete to continuous nature of allowance removal, have been determined. Practical recommendations for creating effective technological processes of mechanical machining are given.

Keywords: elastic displacement value, technological system, initial tension, cutting force, grinding, transition

Вступ. Сучасний розвиток машинобудування вимагає виготовлення високоточних та високоякісних деталей машин, які забезпечують створення конкурентоздатної машинобудівної продукції. Це досягається завдяки застосуванню високоефективних технологій обробки матеріалів різанням, що характеризуються найменшою енергоємністю і найбільшою продуктивністю обробки (із усього різноманіття технологій обробки матеріалів, заснованих на використанні різних видів енергії) та забезпечують високі показники якості й точності оброблюваних поверхонь. Зараз технології обробки матеріалів різанням набули широкого застосування у виробництві та у найближчі роки не втратять своєї значимості. Це пов'язано, в першу чергу, із широким застосування сучасних високооборотових металообробних верстатів із ЧПУ типу "обробний центр", ріжучих лезових твердосплавних і керамічних інструментів зі зносостійкими покриттями, високоефективних технологій фінішної абразивної обробки тощо. Тому їхній подальший розвиток має велике наукове і практичне значення, особливо, в напрямі забезпечення високої точності обробки без зниження продуктивності. У зв'язку із цим, у роботі вирішується актуальне завдання теоретичного обґрунтування умов забезпечення високоточної механічної обробки на основі аналізу та порівняння з єдиних позицій технологій лезової та абразивної обробки.

Аналіз основних досягнень та літератури. Питанням виявлення найбільш ефективних напрямів підвищення точності механічної обробки матеріалів різанням в науково-технічній літературі постійно приділяють значну увагу. У роботах [1 – 3] теоретично обґрунтовано шляхи забезпечення точності обробки лезовими та абразивними інструментами. Однак вони базуються в основному на результатах експериментальних досліджень, які обмежені діапазонами зміни параметрів режимів різання, характеристик ріжучих інструментів тощо. Крім того, окремо розглядаються процеси лезової та абразивної обробки, що не дозволяє встановити узагальнюючі теоретичні рішення щодо точності обробки та провести на їх основі порівняння різних методів обробки [4, 5]. У роботах [6, 7] наведено аналітичні рішення та обґрунтовано шляхи підвищення точності обробки під час шліфування. Це нові підходи, які відкривають значні можливості визначення оптимальних умов шліфування в широких діапазонах зміни параметрів режимів різання та

характеристик абразивних інструментів. Важливими у цьому напрямі слід розглядати також розроблені математичні моделі визначення параметрів точності в умовах лезової та абразивної обробки із урахуванням величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі, яке є визначальним в структурі формування точності обробки [8, 9]. Тому їх подальший розвиток дозволить встановити узагальнюючі теоретичні рішення, провести аналіз і оптимізацію параметрів механічної обробки за критерієм величини пружного переміщення та на цій основі розробити практичні рекомендації.

Мета дослідження, постановка проблеми. Метою дослідження є аналітичне визначення та обґрунтування умов підвищення точності механічної обробки шляхом зменшення величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі, для створення технологічних процесів високоточної лезової та абразивної обробки.

Для досягнення цієї мети необхідно:

- розробити узагальнюючий аналітичний підхід до визначення величини пружного переміщення, виникаючого під час механічної обробки, та обґрунтувати умови його зменшення для забезпечення високої точності обробки;
- провести аналіз аналітичних залежностей для визначення сили різання та обґрунтувати умови її зменшення під час лезової та абразивної обробки;
- теоретично та експериментально обґрунтувати оптимальний технологічний процес круглого шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки із урахуванням величини пружного переміщення, виникаючого в технологічній системі;
- теоретично обґрунтувати ефективність застосування пружної схеми шліфування із початковим натягом у технологічній системі та розробити практичні рекомендації щодо створення високоефективних технологічних процесів високоточної механічної обробки.

Матеріали дослідження. Для досягнення поставленої мети встановлено аналітичні залежності для розрахунку тангенціальної P_z і радіальної P_y складових сили різання, умовного напруження різання σ та коефіцієнта різання $K_{pi3} = P_z / P_y$ під час лезової обробки (точіння) і шліфування [8, 9]:

$$P_z = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm}}{K_{pi3}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right) = a \cdot b \cdot \sigma_{cm} \cdot \left[\operatorname{tg}(\psi - \gamma) + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\psi - \gamma) + 1} \right]; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{a \cdot b \cdot \sigma_{cm}}{K_{pi3}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right) = a \cdot b \cdot \sigma_{cm} \cdot \operatorname{tg}(\psi - \gamma) \cdot \left[\operatorname{tg}(\psi - \gamma) + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\psi - \gamma) + 1} \right]; \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_{cm}}{K_{pi3}} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{pi3}^2}\right) = \sigma_{cm} \cdot \left[\operatorname{tg}(\psi - \gamma) + \sqrt{\operatorname{tg}^2(\psi - \gamma) + 1} \right]; \quad (3)$$

$$K_{pi3} = \operatorname{ctg}(\psi - \gamma) = \frac{1 + f \cdot \operatorname{tg} \gamma}{f - \operatorname{tg} \gamma}, \quad (4)$$

де a, b – товщина і ширина зрізу, м; σ_{cm} – межа міцності на стискання оброблюваного матеріалу, Н/м²; ψ – умовний кут тертя на передній поверхні ріжучого інструмента ($\operatorname{tg} \psi = f$ – коефіцієнт тертя); γ – передній кут ріжучого інструмента.

Із залежностей (1) і (2) випливає, що за умови $K_{pi3} = 1$ складові сили різання P_z і P_y рівні між собою, а за умов $K_{pi3} < 1$ і $K_{pi3} > 1$ справедливі, відповідно, умови $P_z < P_y$ і $P_z > P_y$. Як відомо, умова $K_{pi3} < 1$ реалізується під час абразивної обробки, а умова $K_{pi3} > 1$ – під час лезової обробки. Отже, під час абразивної обробки найбільше впливає на технологічні параметри процесу радіальна P_y складова сили різання, а під час лезової обробки – тангенціальна P_z складова сили різання. При цьому складові сили різання під час лезової обробки ($K_{pi3} > 1$) менше, ніж під час абразивної обробки ($K_{pi3} < 1$), що обумовлено меншими значеннями умовного напруження різання σ (енергоємності обробки), яке за умови $K_{pi3} \rightarrow \infty$ прагне прийняти значення σ_{cm} (рис. 1). У цьому випадку умови стружкоутворення відповідають умовам руйнування прямолінійного зразка під час його стискання.

Як впливає із наведених залежностей, лезова обробка реалізується за умови $\omega = \psi - \gamma < 45^\circ$, а абразивна обробка – за умови $\omega = \psi - \gamma > 45^\circ$ (із урахуванням негативного значення кута γ – за умови $\omega = \psi + \gamma > 45^\circ$), де ω – кут дії. Із залежності (4) випливає, що умова $K_{pi3} \rightarrow \infty$ (або $\sigma \rightarrow \sigma_{cm}$) виконується для кута $\omega = \psi - \gamma \rightarrow 0$ (або за умови $f = \operatorname{tg} \gamma$). Найбільш просто цю умову можна реалізувати під час обробки алмазним інструментом,

оскільки алмаз характеризується найменшим коефіцієнтом тертя f із оброблюваним матеріалом. Цим пояснюється можливість суттєвого зменшення сили різання під час алмазного точіння, що спостерігається на практиці. За умови $(\psi + \gamma) \rightarrow 90^\circ$ умовне напруження різання приймає нескінченне значення $\sigma \rightarrow \infty$. У цьому випадку процес різання (стружкоутворення) не реалізується, може мати місце лише пружно-пластичне деформування оброблюваного матеріалу без утворення стружки. Отже, процес різання лезовими та абразивними інструментами.

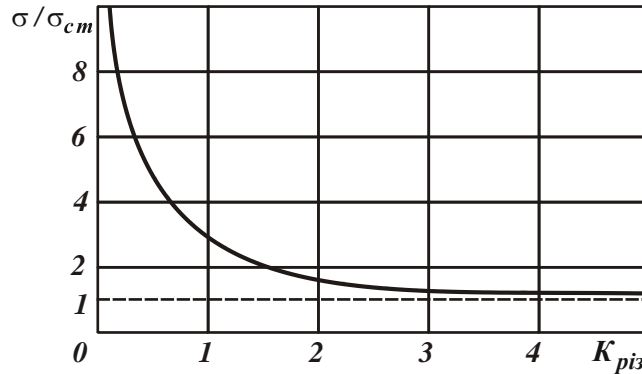


Рис. 1 – Залежність відношення σ/σ_{cm} від коефіцієнта різання K_{piz}

На основі наведених залежностей (1–4) виконано розрахунок величини пружного переміщення, що виникає в технологічній системі та визначає похибку обробки. Зважаючи на те, що формування параметрів точності обробки відбувається, як правило, на фінішних операціях абразивної обробки, отримано аналітичну залежність для визначення величини пружного переміщення y під час круглого поздовжнього шліфування за жорсткою схемою (рис. 2):

$$y = y_{cm} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \tag{5}$$

де $y_{cm} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}}$ – стале значення пружного переміщення y , м; $K_{ш} = K_{piz} = P_z / P_y$; c – наведена жорсткість технологічної системи, Н/м; $Q_{ном} = S \cdot V_{дет} \cdot t$ – номінальна продуктивність обробки, м³/с; S – поздовжня подача, м/об.; $V_{дет}$ – швидкість обертання деталі, м/с; t – номінальна глибина шліфування, м; $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с; $\varepsilon = 1 + \frac{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр} \cdot t}{\sigma \cdot Q_{ном}}$ – уточнення на проході круга; n – кількість проходів круга.

Як впливає із рис. 2, зі збільшенням кількості проходів круга n величина пружного переміщення y збільшується, асимптотично наближаючись до сталого значення y_{cm} . У цьому випадку фактична глибина шліфування наближається до номінальної глибини шліфування t . Очевидно, чим більше ε , тим коротший за часом перехідний процес, протягом якого величина y досягає найбільшого значення y_{cm} .

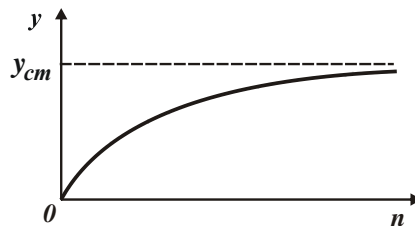


Рис. 2 – Залежність величини y від кількості проходів круга n

Щоб виключити перехідний процес і підвищити ефективність обробки, необхідно створити в технологічній системі початковий натяг, який дорівнює величині y_{cm} . Тоді залежність (5) набуде вигляду:

$$y \approx y_{cm} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{ш} \cdot c \cdot V_{кр}}. \tag{6}$$

Зменшити величину y та, відповідно, похибку обробки без зменшення номінальної продуктивності обробки $Q_{ном}$ можна зменшенням умовного напруження різання σ та збільшенням параметрів $K_{ш}$, c і $V_{кр}$. Це

досягається, в першу чергу, забезпеченням високої ріжучої здатності шліфувального круга, тобто зменшенням відношення $\sigma / K_{ш}$, що входить у залежність (6):

$$\frac{\sigma}{K_{ш}} = \frac{\sigma_p}{K_{ш.p}} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{P_{y.mp}}{P_y}\right)}, \quad (7)$$

де σ_p , $K_{ш.p}$ – складові величин σ і $K_{ш}$, які обумовлено процесом "чистого різання" абразивними зернами круга без урахування тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом; $P_{y.mp}$ – радіальна складова сили різання, яка обумовлена тертям зв'язки круга із оброблюваним матеріалом ($P_{y.mp} < P_y$), Н.

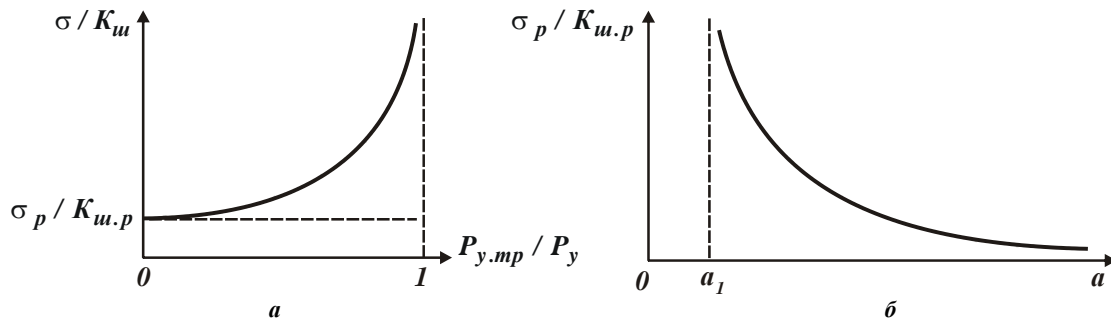


Рис. 3 – Залежності $\sigma / K_{ш}$ від $P_{y.mp} / P_y$ (а) та $\sigma_p / K_{ш.p}$ від α (б)

Із залежності (7) випливає, що чим більше відношення $P_{y.mp} / P_y$, тим більше відношення $\sigma / K_{ш}$, яке може суттєво перевищувати значення $\sigma_p / K_{ш.p}$ (рис. 3,а). Це підтверджується експериментальними даними, згідно яким відношення $\sigma / K_{ш}$ може до 100 разів перевищувати відношення $\sigma_p / K_{ш.p}$, наприклад, під час шліфування алмазними кругами на міцних металевих зв'язках, які в процесі шліфування втрачають ріжучу здатність. Тому, щоб зменшити відношення $\sigma / K_{ш}$ до значення $\sigma_p / K_{ш.p}$, необхідно в процесі шліфування постійно підтримувати високу ріжучу здатність круга, використовуючи ефективні методи правлення (механічні та електрофізикохімічні) [10]. Це дозволить фактично виключити тертя зв'язки круга із оброблюваним матеріалом, а також вчасно видаляти з робочої поверхні круга затуплені зерна. Інакше, щоб зменшити величину σ , відповідно залежності (6), необхідно зменшувати відношення $\sigma_p / K_{ш.p}$, що описується аналітичною залежністю:

$$\frac{\sigma_p}{K_{piз}} = \frac{\sigma_{cm}}{K_{piз}^2} \cdot \left(1 + \sqrt{1 + K_{piз}^2}\right) = \frac{\sigma_{cm}}{2} \cdot \left[\frac{1}{\operatorname{tg}^2\left(45^\circ - \frac{\omega}{2}\right)} - 1 \right]. \quad (8)$$

Розраховані за залежністю (8) значення безрозмірної величини $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$ наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Розрахункові значення безрозмірної величини $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$

$\omega = \psi + \gamma$, град.	0	10	30	45	60	80	90
$\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$	0	0,21	1	2,56	6,5	65	∞

Як випливає із табл. 1, зі збільшенням кута дії ω відношення $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$ необмежено збільшується. Отже, зменшити відношення $\sigma_p / \sigma_{cm} \cdot K_{piз}$ можна винятково зменшенням кута дії $\omega = \psi + \gamma$ шляхом застосування в якості абразивних матеріалів синтетичні надтверді матеріали (алмаз, ельбор тощо), які внаслідок високої гостроти ріжучих кромок і невеликих коефіцієнтів тертя із оброблюваними матеріалами дозволяють зменшити кути ψ та γ .

Розглядаючи ріжуче зерно у формі сфери радіусом R , визначено коефіцієнт $K_{ш.р} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - f$, умовне напруження різання $\sigma_p = \frac{\sigma_{см}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \frac{f}{2}\right)}$ та відношення $\sigma_p = \frac{\sigma_{см}}{\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \frac{f}{2}\right)}$. Як видно, відношення $\sigma_p / K_{ш.р}$ тим

менше, чим більше відношення a/R і менше коефіцієнт тертя f . За умови $\left(\sqrt{\frac{a}{2 \cdot R}} - \frac{f}{2}\right) < 0$ процес різання (стружкоутворення) нездійснений, можливий лише процес пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу. У цьому випадку $\sigma_p / K_{ш.р} \rightarrow \infty$. Отже, процес різання починається зі значення $a/R > f^2/2$. Наприклад, за умови $f = 0,2$ граничне значення $a/R = 0,02$, за умови $f = 0,3$, відповідно, $a/R = 0,045$, а за умови $f = 0,4$ граничне значення $a/R = 0,08$. Це погодиться із відомими експериментальними даними [3].

На рис. 3,б показано характер зміни відношення $\sigma_p / K_{ш.р}$ від товщини зрізу a . Гранична товщина зрізу a_1 , за якою процес пружно-пластичного деформування оброблюваного матеріалу переходить у процес різання (стружкоутворення) визначається: $a_1 = 0,5 \cdot R \cdot f^2$. Таким чином, встановлено, що домогтися високої точності обробки (як під час абразивної, так і під час лезової обробки) можна шляхом застосування високошвидкісного різання [1, 5]. Це витікає із перетвореної (щодо процесу точіння) залежності (6):

$$y = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{K_{різ} \cdot c \cdot V}, \tag{9}$$

де $Q_{ном} = S \cdot V \cdot t$ – номінальна продуктивність обробки, м³/с; S – подача, м/об.; V – швидкість різання, м/с.

Як видно, зменшити величину пружного переміщення y за заданою номінальною продуктивністю обробки $Q_{ном}$ можна, в першу чергу, шляхом збільшення швидкості різання V . Сталість значення $Q_{ном}$ досягається завдяки зменшенню подачі S та глибини різання t . Із іншого боку, збільшити $Q_{ном}$ за заданим значенням y також можна завдяки збільшенню швидкості різання V , тобто застосовуючи високошвидкісне різання. Для більш загального подання та аналізу величини пружного переміщення y , що визначає похибку обробки, залежність (5) слід подати у вигляді:

$$y = B_{баз} \cdot \Pi \cdot \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{1}{B_{баз} \cdot n}\right)^n} \right], \tag{10}$$

де $B_{баз} = \frac{\sigma \cdot Q_{ном}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot \Pi}$ – безрозмірний параметр; Π – припуск, що знімається, м.

Отримана залежність погоджує величину пружного переміщення y із кількістю поздовжніх ходів ріжучого інструмента n за заданою номінальною продуктивністю обробки $Q_{ном}$. Розрахунками встановлено, що зі збільшенням кількості поздовжніх ходів ріжучого інструмента n величина пружного переміщення y залишається майже постійною (рис. 4). Отже, фактично із однаковою ефективністю (точністю і продуктивністю обробки) знімання заданого припуску Π можна виконувати як за один, так і за декілька проходів ріжучого інструмента, тобто схеми однопрохідної та багатопрохідної обробки в цьому випадку фактично рівнозначні.

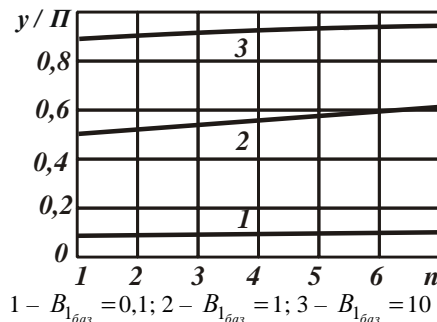


Рис. 4 – Залежність величини y/Π від кількості проходів круга n .

Із цього витікає доцільність знімання всього припуску, наприклад, під час розточування отвору за один прохід ріжучого інструмента, а під час внутрішнього шліфування за жорсткою схемою – за декілька проходів круга (у зв'язку із більш високими значеннями відношення $\sigma/K_{ш}$), що погодиться із практичними даними [5].

Розглянемо процес круглого шліфування, який здійснюється за два переходи (чорнове шліфування і виходжування), та аналітично визначимо основний час обробки τ на цих двох переходах. Потім, приймаючи обмеження задану точність обробки, обумовлену величиною пружного переміщення y_0 на переході виходжування, встановимо найменший основний час обробки за два переходи, розглядаючи його критерієм оптимізації. У результаті виконаних розрахунків отримано залежність для визначення основного часу обробки за два переходи:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left\{ \frac{g}{y_1} + \pi \cdot D_{дем} \cdot l \cdot n_2 \cdot \left[\left(\frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right] \right\}, \quad (11)$$

де τ_1 , $x = \Pi / y_{cm1}$ – основний час обробки, відповідно, на переходах чорнового шліфування та виходжування, с; y_1 , y_0 – величини пружного переміщення, що виникають у технологічній системі, відповідно, на переходах чорнового шліфування та виходжування, м; $g = \pi \cdot D_{дем} \cdot l \cdot \Pi$ – об'єм металу, що знімається із оброблюваної деталі, м³; $D_{дем}$, l – діаметр і довжина оброблюваної деталі, м; Π – величина припуску, що знімається, м; n_2 – кількість поздовжніх ходів круга на переході виходжування.

Із залежності (11) випливає, що основний час обробки τ неоднозначно залежить від двох змінних величин y_1 і n_2 . Причому, величина y_1 входить у два доданки залежності (11), а величина n_2 – лише в другий доданок, який визначає основний час обробки на переході виходжування. Отже, ці дві величини – y_1 і n_2 – необхідно розглядати як параметри оптимізації (змінні величини). Для визначення екстремального значення часу обробки τ , що визначається залежністю (11), слід підкорити час обробки τ необхідній умові екстремуму $\tau'_{y_1} = 0$;

$\tau'_{n_2} = 0$. Тоді отримано: $y_{1експ} = \Pi^{\frac{n_2}{1+n_2}} \cdot y_0^{\frac{1}{1+n_2}}$; $\left(\frac{y_1}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} \cdot \left(1 - \frac{\ln y_1}{n_2} \right) = 1$. Як показали розрахунки, другі похідні $P_{y,2}$ і $P_{n,2}$ у точках екстремумів позитивні. Отже, мають місце мінімуми основного часу обробки τ (рис. 5).

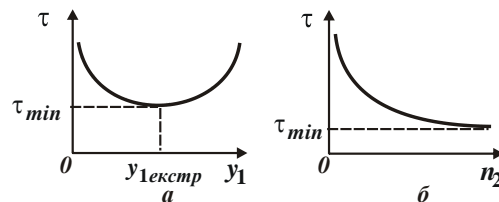


Рис. 5 – Залежність часу обробки τ від y_1 (а) і n_2 (б)

За умови $n_2 \rightarrow \infty$ маємо $y_{1експ} = \Pi$. Отже, на переході чорнового шліфування знімання оброблюваного матеріалу відсутнє, оскільки величина пружного переміщення, що виникає в технологічній системі, дорівнює величині припуску Π . Знімання металу та формування заданої точності обробки відбувається на переході виходжування. Тому, щоб суттєво зменшити основний час обробки на переході чорнового шліфування, необхідно даний перехід здійснювати із прискореною радіальною подачею, створюючи в технологічній системі початковий натяг, який дорівнює величині припуску Π . У цьому випадку $\tau_1 \approx 0$, тоді мінімальний основний час обробки розглянутого процесу круглого шліфування визначається залежністю:

$$\tau_{min} \approx \tau_2 = \frac{\pi \cdot D_{дем} \cdot l \cdot \sigma \cdot n_2}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \left[\left(\frac{\Pi}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right]. \quad (12)$$

Підкоряючи залежність (12) правилу Лопітала, отримано:

$$\tau_{min} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \lim_{n_2 \rightarrow \infty} \frac{\left[\left(\frac{\Pi}{y_0} \right)^{\frac{1}{n_2}} - 1 \right]_{n_2}}{\left(\frac{1}{n_2} \right)_{n_2}} = \frac{\pi \cdot D_{dem} \cdot l \cdot \sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \left(\frac{\Pi}{y_0} \right). \quad (13)$$

Як видно, у залежності (12) переважає множник, укладений у квадратні дужки. Зі збільшенням n_2 це приводить до зменшення основного часу обробки τ_{min} . Збільшення $n_2 \rightarrow \infty$ припускає збільшення швидкості обертання деталі $V_{dem} \rightarrow \infty$. Очевидно, у реальних умовах шліфування збільшення $V_{dem} \rightarrow \infty$ обмежено технічними можливостями круглошліфувального верстата. Тому параметр n_2 буде приймати не нескінченні, а кінцеві значення. Це указує на неповне використання технологічних можливостей процесу круглого зовнішнього шліфування, оскільки основний час обробки τ_{min} буде приймати значення, відповідно, більші значень, розрахованих за залежністю (13). Збільшити швидкість поздовжньої подачі $S_m = V_{dem} \cdot S / (\pi \cdot D_{dem})$ можна встановленням максимальних значень швидкості обертання деталі V_{dem} і поздовжньої подачі S (м/об).

Із залежності (13) випливає, що зменшити основний час обробки τ_{min} можна зменшенням параметрів D_{dem} , l , Π , σ і збільшенням c , $K_{ш}$, $V_{кр}$, y_0 . Зважаючи на те, що змінними параметрами є σ та $K_{ш}$, зменшити основний час обробки τ_{min} можна, головним чином, шляхом підвищення ріжучої здатності шліфувального круга. Таким чином, теоретично обґрунтовано ефективність здійснення автоматизованого процесу круглого зовнішнього шліфування в один перехід, який включає лише перехід виходжування із створенням у технологічній системі початкового натягу, рівного або кратного величині припуску, що знімається, і застосуванням високочастотних осцилюючих поздовжніх рухів стола верстата (або шліфувального круга). При цьому швидкість обертання деталі необхідно встановлювати максимально можливою, виходячи із технічних характеристик круглошліфувального верстата. Такий режим шліфування забезпечить одержання необхідних показників точності та якості обробленої поверхні за найменшим основним часом процесу круглого зовнішнього поздовжнього шліфування. Отримане теоретичне рішення дозволяє уточнити відоме рішення, відповідно до якого застосовуваний на практиці автоматизований процес круглого шліфування виконується за декілька переходів, включаючи чорнове (чистове) шліфування та виходжування [3]. Як встановлено теоретично, цей процес менш продуктивний порівняно із запропонованим процесом шліфування.

Для перевірки правильності отриманих теоретичних рішень проведено експериментальні дослідження. Для цього здійснювали обробку отворів діаметром 100 мм і висотою 150 мм в деталях із сталі 18ХГН2МФБ твердістю HRC 57 ... 63 із застосуванням абразивного круга 1A1 100×20×62 25A 25 СМ1 8 із режимом шліфування: $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{dem} = 30$ м/хв; швидкість поздовжньої подачі $S_{позд} = 1,5$ м/хв; тривалість поздовжнього ходу круга 7 с. Експериментально встановлено (рис. 6), що утворення пружних переміщень у технологічній системі під час шліфування узгоджується з аналітичними залежностями. Встановлено, що під час внутрішнього шліфування за жорсткою схемою у зв'язку з відносно низькою жорсткістю технологічної системи ($c = 2,6 \cdot 10^6$ Н/м) величина пружного переміщення із часом обробки необмежено збільшується. Це вимагає здійснення періодичного виходжування, що різко зменшує продуктивність обробки. Тому в цих умовах весь припуск доцільно знімати за пружною схемою шліфування з початковим натягом (рис. 7), рівним або кратним величині припуску, що знімається (тобто за схемою виходжування із відключеною радіальною подачею).

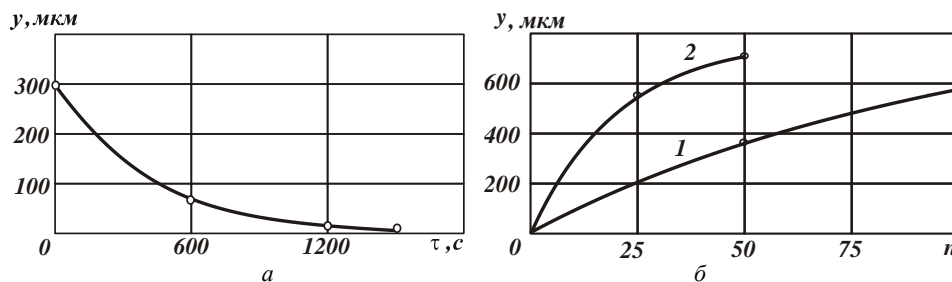


Рис. 6 – Залежності пружного переміщення у від часу обробки τ в умовах виходжування (а) та від кількості проходів круга n в умовах шліфування за жорсткою схемою (б): 1 – $t = 0,01$ мм; 2 – $t = 0,02$ мм

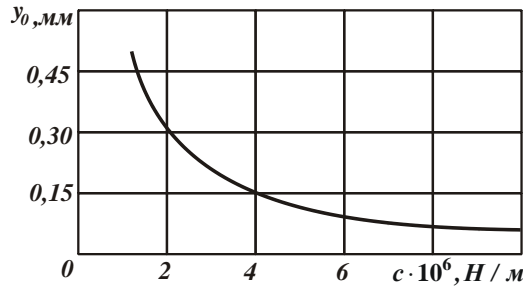


Рис. 7 – Залежність граничних значень початкових натягів y_0 від жорсткості технологічної системи c

Експериментально встановлено, що під час знімання припуску 0,5 мм на сторону обробку ефективно виконувати за 3 переходи за пружною схемою шліфування із створенням в технологічній системі початкових натягів на кожному переході, рівних, відповідно: 0,25 мм, 0,25 мм, 0,02 мм. У цьому випадку продуктивність обробки збільшується до 2 разів і забезпечуються вимоги за точністю розміру (у межах 10 мкм) і шорсткістю ($R_a < 0,63$ мкм) оброблюваної поверхні, фактично виключаються коливання в технологічній системі. На оброблених поверхнях відсутні припідкання та мікротріщини. На 30 % знижуються витрати абразивних кругів у зв'язку зі зменшенням їх зношування. Експериментально встановлено, що застосування цього способу обробки дозволяє до 2 разів зменшити час охолодження оброблюваної деталі після шліфування (яке здійснюється без знімання нагрітої деталі з верстата) з метою усунення її термопружних деформацій і підвищення точності обробки [11]. Це пов'язано з тим, що кількість тепла $Q_{вих}$ (рис. 8), яке виділяється під час шліфування за схемою виходжування, до 3-х разів менше, ніж під час внутрішнього шліфування за жорсткою схемою ($Q_{впіз}$).

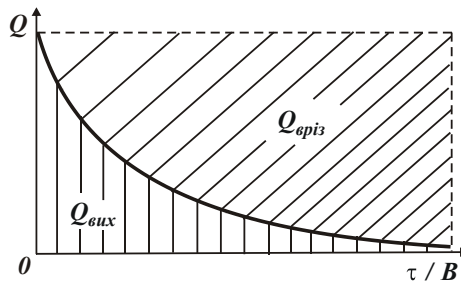


Рис. 8 – Залежність $Q_{вих}$ і $Q_{впіз}$ від відносної величини τ / B

Величина $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$ – постійна часу утворення пружного переміщення в технологічній системі, с;

F – площа поперечного перетину оброблюваної деталі, м².

Аналітично визначимо умови підвищення точності та продуктивності обробки для спрощеної схеми шліфування деталі, яка рухається за нормаллю до робочої поверхні круга із постійною швидкістю V_0 .

Використовуючи рівняння балансу переміщень у технологічній системі $V_0 \cdot \tau = \int_0^\tau V(\tau) \cdot d\tau + y$, яке можна записати

диференціальним рівнянням $B \cdot V'(\tau) + V(\tau) = V_0$, і розв'язуючи його для початкової умови $y(\tau=0) = y_0$, визначено величину пружного переміщення y :

$$y = y_{cm} + (y_0 - y_{cm}) \cdot e^{-\frac{\Pi}{y_{cm}}} = y_{cm} + (y_0 - y_{cm}) \cdot e^{-\frac{1}{B} \cdot \tau}, \quad (14)$$

де $V(\tau)$ – лінійна швидкість знімання припуску, м/с; τ – час обробки, с; y_0 – початковий натяг у технологічній системі, м; число $e \approx 2,72$; Π – припуск, що знімається, м; $y_{cm} = B \cdot V_0$ – величина пружного переміщення у сталому процесі шліфування, м.

Залежність (14) за умови $y_0 = 0$ є основою для визначення найменшого основного часу обробки τ із урахуванням обмеження за точністю розміру оброблюваної поверхні на операції шліфування із дискретно змінюваною за переходами швидкістю переміщення деталі. Під час шліфування у два переходи час обробки τ обчислюється:

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{y_1}{V_2} = B \cdot \left(\frac{\Pi}{y_{cm1}} + \frac{y_1}{y_{cm2}} \right), \quad (15)$$

де $\tau_1; \tau_2; V_1; V_2; y_{cm1} = B \cdot V_1; y_{cm2} = B \cdot V_2; y_1$ – відповідно, основний час обробки поверхні деталі (с), швидкість переміщення деталі (м/с), пружні переміщення (м) на першому (1) і на другому (2) переходах.

Застосовуючи уточнення на першому і другому переходах $\varepsilon_1 = \frac{\Pi}{y_1} = \frac{\tau_1}{B \cdot (1 - e^{-\tau_1/B})}; \varepsilon_2 = \frac{y_1}{y_2} = \frac{\tau_2}{B \cdot (1 - e^{-\tau_2/B})}$, із урахуванням сумарного уточнення $\varepsilon_{сум} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$ і залежності (15), отримано рівняння для визначення основного часу обробки τ :

$$\varepsilon_{сум} \cdot \left[1 - e^{-\frac{(\tau - \tau_1)}{B}} - e^{-\frac{\tau_1}{B}} + e^{-\frac{\tau}{B}} \right] = \frac{1}{B^2} \cdot (\tau \cdot \tau_1 - \tau_1^2), \quad (16)$$

де y_2 – пружне переміщення, яке виникає в технологічній системі на 2-му переході та визначає точність розміру оброблюваної поверхні, м.

За наявності екстремуму (мінімуму) функції $\tau = f(\tau_1)$ залежність (16) набуває вигляду:

$$\varepsilon_{сум} \cdot \left[-e^{-\frac{(\tau - \tau_1)}{B}} + e^{-\frac{\tau_1}{B}} \right] = \frac{1}{B} \cdot (\tau - 2 \cdot \tau_1). \quad (17)$$

Маємо рішення: $\tau = 2 \cdot \tau_1$, тоді $\tau_1 = \tau_2$. Звідки $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$, $\varepsilon_{сум} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = \varepsilon^2$ і рівняння (17) набуде вигляду:

$$\varepsilon_{сум} = \frac{\tau_1^2}{B^2 \cdot (1 - e^{-\tau_1/B})^2}. \quad (18)$$

Для $\varepsilon_{сум} = 5,376$ і, відповідно, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon = 2,319$ із залежності (18) визначено екстремальні (мінімальні) значення відносних величин: $\tau_1/B = \tau_2/B = 2$; $\tau/B = 4$, а із залежності (15) – екстремальне значення відношення $\Pi/y_{cm1} = 2$ (рис. 9,а).

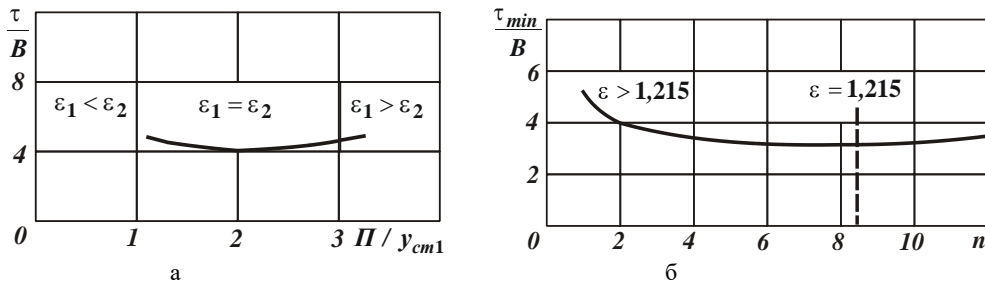


Рис. 9 – Залежності відносної величини τ/B від відношення Π/y_{cm1} (а) та відносної величини τ_{min}/B від кількості переходів n (б)

Також визначено відносну величину τ/B під час шліфування в три та більше переходів. Загальним рішенням є те, що мінімум відносної величини τ/B досягається за однієї й тієї ж тривалості переходів і одних значеннях уточнення на кожному переході, тобто $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = \varepsilon_n = \varepsilon$; $\varepsilon_{сум} = \varepsilon_1^n = \varepsilon^n$. Зі збільшенням кількості переходів n відносна величина τ_1/B зменшується, а відносна величина τ/B змінюється за екстремальною залежністю, досягаючи мінімального значення за умови $n = 8$ ($\varepsilon_{сум} = 5,376$, рис. 9,б, табл. 2).

Таблиця 2 – Розрахункові значення ε , τ_1/B і τ/B

n	1	2	3	4	5	6	8	10	12
ε	5,376	2,319	1,75	1,52	1,4	1,32	1,235	1,18	1,15
τ_1/B	5,3	2	1,25	0,91	0,72	0,58	0,435	0,35	0,3
τ/B	5,3	4	3,75	3,64	3,6	3,48	3,47	3,5	3,6

Найменший основний час обробки τ_{min} під час шліфування в n переходів із урахуванням залежності (14) для $y_0 = 0$ та $y_1 = y$; $x = \Pi/y_{cm1}$ обчислюється за залежністю:

$$\tau_{min} = B \cdot n \cdot \frac{\Pi}{y_{cm1}} = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \frac{\Pi}{y_1}} \cdot \frac{\Pi}{y_{cm1}} = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \left[\frac{x}{(1-e^{-x})} \right]} \cdot x. \quad (19)$$

Величина x неоднозначно впливає на τ_{min} . Після визначення екстремуму функції τ_{min} від величини x , отримано рівняння: $\ln \left[\frac{x}{(1-e^{-x})} \right] = 1 - \frac{x \cdot e^{-x}}{(1-e^{-x})}$. Розрахунками встановлено: $x = \Pi / y_{cm1} = 0,4$; $y_1 / y_{cm1} = 0,329$.

Оптимальне уточнення на переході дорівнює $\varepsilon = \Pi / y_1 = 1,215$, а сумарне уточнення дорівнює $\varepsilon_{cym} = 1,215^n$.

Встановлено, що для сумарного уточнення $\varepsilon_{cym} = 5,376$ мінімум $\tau_{min} = 0,4 \cdot n \cdot B = 3,2 \cdot B$, де $n = \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \varepsilon} = \frac{\ln 5,376}{\ln 1,215} = \frac{0,68}{0,2} = 8,4$. Значення $\tau_{min} = 3,2 \cdot B$ несуттєво відрізняється від значення $\tau_{min} = 4 \cdot B$, яке отримано для $n = 2$ і $\varepsilon = 2,32$ (рис. 9,б). Отже, майже з однаковою продуктивністю обробки можна шліфування здійснювати в діапазоні $n = 2 \dots 8$, тобто зі зміною уточнення ε в межах $1,215 \dots 2,32$.

Для сумарного уточнення $\varepsilon_{cym} = 100$ екстремальна кількість переходів дорівнює $n = \frac{\ln \varepsilon_{cym}}{\ln \varepsilon} = \frac{\ln 100}{\ln 1,215} = 23$, а $\tau_{min} = 0,4 \cdot 23 \cdot B = 9,2 \cdot B$. Розрахунками встановлено, що для $n = 4 \dots 23$ відносна величина τ / B змінюється несуттєво (у межах $9,2 \dots 12$). Тому фактично з мінімальним основним часом обробки можна здійснювати шліфування із $n = 4 \dots 5$ (тобто із $\varepsilon = 2,5 \dots 3,15$), оскільки подальше збільшення n не надає відчутного ефекту зменшення τ / B . Таким чином, враховуючи нелінійність функції $V(\tau)$ в залежності $y = B \cdot V(\tau)$, виконано уточнений розрахунок найменшого основного часу обробки із урахуванням обмеження за точністю розміру оброблюваної поверхні деталі під час урізного шліфування за жорсткою схемою з дискретно змінюваним в часі характером контакту круга з деталлю.

Для порівняння отримано аналогічні рішення відносно урізного шліфування за жорсткою схемою з постійним контактом круга з деталлю. Основний час обробки τ на операції шліфування у два переходи (рис. 10) під час знімання припусків Π_1 і Π_2 визначається залежністю:

$$\tau = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2} = B \cdot \left(\frac{\Pi_1}{y_{cm1}} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right). \quad (20)$$

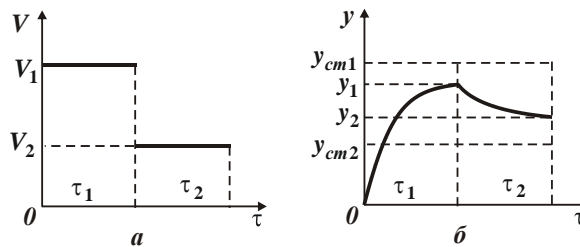


Рис. 10 – Характер зміни швидкості V (а) і пружного переміщення y (б) із часом обробки τ

У даному випадку параметри V_1, V_2 та, відповідно, $y_{cm1} = B \cdot V_1, y_{cm2} = B \cdot V_2$ – невідомі. Тому слід виразити залежність (20) відносно y_{cm1} та підставити отриманий вираз у залежність (14), приймаючи на першому переході $y = y_1; y_0 = 0; y_{cm} = y_{cm1}$:

$$y_1 = \frac{\Pi_1}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \right]. \quad (21)$$

Потім після підстановки залежності (21) у залежність (14), приймаючи на другому переході $y = y_2; y_0 = y_1; y_{cm} = y_{cm2}$, маємо:

$$y_2 = y_{cm2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Pi_2}{y_{cm2}}} \right) + \frac{\Pi_1}{\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \cdot \left[1 - e^{-\left(\frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \right] \cdot e^{-\frac{\Pi_2}{y_{cm2}}}. \quad (22)$$

Рівняння (21) і (22) містять лише дві невідомі величини y_{cm2} і τ/B , оскільки параметри y_1 і y_{cm1} визначають на основі залежності (14), розглядаючи $y = y_1$; $y_0 = 0$; $y_{cm} = y_{cm1}$ (рис. 11,а, б). За заданими значеннями y_2 , Π , Π_1 і $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$, на основі рівнянь (21) і (22) встановлено значення y_{cm2} і τ/B (рис. 11,в,г). Як видно, зі збільшенням Π_1 відносна величина τ/B зменшується, досягаючи мінімального значення за умови $\Pi_1 = \Pi$, тобто коли знімання припуску та формування точності обробки відбувається на другому переході. Перший перехід необхідний лише для створення в технологічній системі пружного переміщення (початкового натягу) величиною $y_1 = \Pi$. Це указує на ефективність застосування пружної схеми шліфування із початковим натягом у технологічній системі, рівним (схема 1 на рис. 12) або кратним (схема 2 на рис. 12) величині припуску, що знімається.

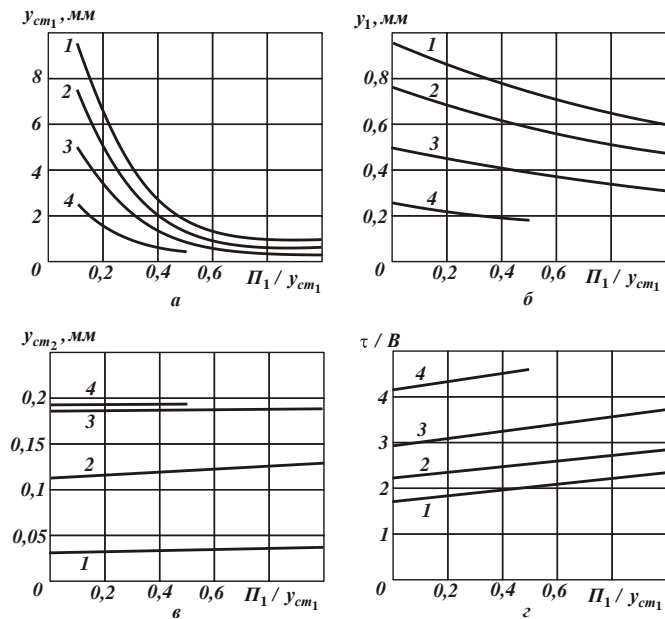


Рис. 11 – Залежності параметрів y_{cm1} (а), y_1 (б), y_{cm2} (в) і τ/B (г) від відношення Π_1 / y_{cm1} : 1 – $\Pi_1 = 0,95$ мм; $\Pi_2 = 0,05$ мм; 2 – $\Pi_1 = 0,75$ мм; $\Pi_2 = 0,25$ мм; 3 – $\Pi_1 = \Pi_2 = 0,5$ мм; 4 – $\Pi_1 = 0,25$ мм; $\Pi_2 = 0,75$ мм ($\Pi = 1$ мм і $y_2 = 0,186$ мм)

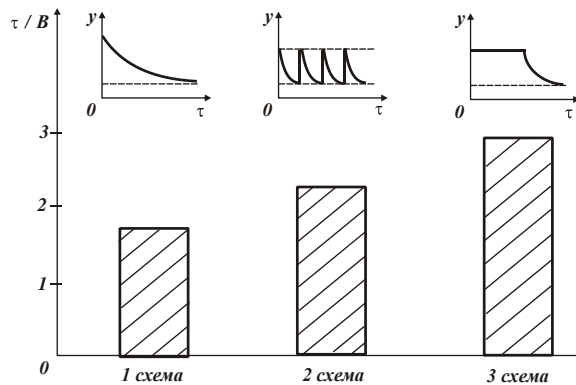


Рис. 12 – Діаграма розподілу значень відносної величини τ/B для трьох схем шліфування

Під час шліфування у два переходи, що включає перехід шліфування за жорсткою схемою та перехід шліфування за пружною схемою із початковим натягом у технологічній системі, значно меншим величини знятого припуску (схема 3 на рис. 12), відносна величина τ/B та основний час обробки τ приймають більші значення. Значення τ/B під час шліфування з постійним у часі контактом круга з деталлю (рис. 12) менше, ніж в умовах дискретного контакту (рис. 9). Таким чином, теоретично обґрунтовано закономірності формування похибок обробки поверхонь для різних схем шліфування, включаючи жорстку і пружну схеми та схему виходжування за дискретним і безперервним у часі характером знімання припуску. Визначено умови зменшення основного часу обробки за заданої точності оброблюваної поверхні, які обумовлені переходом від дискретного до безперервного характеру знімання припуску [8]. Встановлено мінімальний основний час обробки залежно від кількості переходів під час шліфування з дискретним характером знімання припуску. При

цьому доведено незначність зміни основного часу обробки в широкому діапазоні зміни уточнення ($\varepsilon = 1,215 \dots 3,150$), внаслідок чого можна виконувати шліфування за чотири або п'ять переходів, зменшуючи трудомісткість обробки із забезпеченням необхідної (заданої) точності оброблюваної поверхні.

Висновки. У роботі отримано узагальнюючі теоретичні рішення щодо аналітичного визначення складових сили різання, енергоємності обробки, пружних переміщень у технологічній системі та обґрунтовано умови їх зменшення, які покладено в основу розроблення технологічних процесів високоточної механічної обробки, включаючи лезову та абразивну обробки. Аналітично встановлено, що сила різання під час лезової обробки (точіння) завжди менше, ніж під час абразивної обробки (шліфування) завдяки зменшенню енергоємності обробки: зменшенню кута дії. При цьому під час лезової обробки переважає тангенціальна складова сили різання, а під час шліфування – радіальна складова сили різання. Тому основною умовою високоточної механічної обробки, особливо на операціях абразивної обробки (шліфування), є зменшення радіальної складової сили різання та величини пружного переміщення. Аналітично встановлено, що найменший час обробки для забезпечення заданої точності обробки під час шліфування досягається за умови створення в технологічній системі певного початкового натягу, який залежить в основному від ріжучої здатності шліфувального круга. Також встановлено, що підвищити точність обробки можна застосуванням високошвидкісного різання. При цьому схеми однопрохідної та багатопрохідної обробки фактично рівнозначні. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність здійснення автоматизованого процесу круглого зовнішнього шліфування в один перехід, який включає лише перехід виходжування із створенням у технологічній системі початкового натягу, рівного або кратного величині припуску, що знімається. Визначено умови зменшення основного часу обробки за заданої точності оброблюваної поверхні, які обумовлені переходом від дискретного до безперервного характеру знімання припуску. Наведено практичні рекомендації щодо створення ефективних технологічних процесів механічної обробки.

Список літератури:

1. Технологія машинобудування : підручник / О. В. Якимов, В. М. Царюк, О. О. Якимов, Г. О. Оборський, В. П. Ларшин, О. В. Самойленко. – Одеса: Астропринт, 2001. 608 с.
2. Маталин А. А. Технологія машиностроєння : учебник. – Л.: Машиностроєння, 1985. 496 с.
3. Лурье Г. Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования. – Л.: Машиностроєння, 1984. 103 с.
4. Зубарь В. П., Тимчук А. Г., Чопенко М. В. Замена шлифования точением // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я : міжнар. наук.-практ. конф., 18–19 травня 2006 р., тези докладів. Харків: Вид-во "Курсор", 2006. С. 73–74.
5. Линчевский П. А., Дзугурян Т. Г., Оргиян А. А. Обработка деталей на отделочно-расточных станках. Киев: Техника, 2001. 300 с.
6. Новоселов Ю. К. Динамика формообразования поверхностей при абразивной обработке. Саратов, 1979. 232 с.
7. Сизый Ю. А., Сталинский Д. В. Динамика и теплофизика шлифования. Харьков: ГП "УкрНТЦ "Энергосталь", 2016. 448 с.
8. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки. Днепр: ЛИРА, 2018. 400 с.
9. Новиков Ф. В. Технологічне забезпечення високоякісної та високоточної механічної обробки : монографія. Дніпро : ЛІРА, 2024. 460 с.
10. Лавриненко В. И., Солод В. Ю. Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки : монография. Каменское: ДГТУ, 2016. 529 с.
11. Технологические процессы формирования поверхностного слоя зубчатых колес тяжелых токарных станков с ЧПУ / А. А. Клочко, Е. В. Мироненко, О. А. Анциферова и др. // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наукових праць. Краматорськ, 2015. Вип. № 37. С. 105–111.

Bibliography (transliterated):

1. Mechanical engineering technology: textbook / O. V. Yakimov, V. M. Tsaryuk, O. O. Yakimov, G. O. Oborsky, V. P. Larshin, O. V. Samoilenko (2001). – Odesa: Astroprint. 608.
2. Matalin A. A. (1985) Mechanical engineering technology: textbook. – L.: Mechanical engineering. 496.
3. Lurye G. B. (1984) Progressive methods of cylindrical external grinding. L.: Mechanical Engineering. 103.
4. Zubar V. P., Timchuk A. G., Chopenko M. V. (2006) Replacing grinding with turning // Information technologies: science, technology, technology, lighting, health: international. scientific-practical Conf., May 18–19, 2006, abstracts. Kharkiv: View "Cursor", 2006. pp. 73–74.
5. Linchevsky P. A., Dzhuguryan T. G., Orgiyan A. A. (2001) Processing of parts on finishing and boring machines. Kyiv: Tekhnika, 2001. – 300.
6. Novoselov Yu. K. (1979) Dynamics of surface shaping during abrasive processing. Saratov. 232 p.
7. Sizy Yu. A., Stalinskiy D. V. (2016) Dynamics and thermal physics of grinding. Kharkov: State Enterprise "UkrNTC" Energostal ", 2016. 448.
8. Novikov F. V. (2018) Fundamentals of Mathematical Modeling of Technological Processes of Mechanical Processing. Dnepr: LIRA. 400.
9. Novikov F. V. (2024) Technological support for high-quality and high-precision mechanical processing: monograph. Dnipro: LIRA. 460.
10. Lavrinenko V. I., Solod V. Yu. (2016) Tools from superhard materials in technologies of abrasive and physical-technical processing: monograph. Kamenskoye: DSTU. 529.
11. Technological processes of formation of the surface layer of gear wheels of heavy CNC lathes / A. A. Klochko, E. V. Mironenko, O. A. Antsiferova, etc. (2015). Tool reliability and optimization of technological systems. Collection of scientific works. Kramatorsk. No. 37. 105–111.

Надійшла (received) 02.02.2025

Відомості про авторів / About the Authors

Новіков Федір Васильович (Novikov Fedir) – доктор технічних наук, професор кафедри "Здорового способу життя, технологій і безпеки життєдіяльності" Харківського національного економічного університету імені Семена Кузнеця, м. Харків; тел.: +38-067-68-90-342; e-mail: novikovfv@i.ua ORCID: 0000-0001-6996-3356