

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ РЕДУКТОРІВ**

**Новіков Ф.В.**, докт. техн. наук, проф., **Новіков Д.Ф.**, студент  
(Харківський національний економічний університет)

**Бережний Р.А.**

(ВАТ Харківський машинобудівний завод “Світло шахтаря”)

**Вступ та постановка задачі.** Створення сучасних високонадійних машин і систем вимагає застосування ефективних технологій механічної обробки деталей, які забезпечують необхідну точність, якість і продуктивність їх обробки [1]. Особливо це стосується фінішної обробки внутрішніх циліндричних поверхонь деталей редукторів шахтних конвеєрів, умови експлуатації яких дуже важкі. Це потребує забезпечення високих вимог до точності виготовлення деталей редукторів, зокрема зубчатих коліс. Накопичений досвід показує, що основною причиною низької ефективності при шліфуванні внутрішніх циліндричних поверхонь деталей є значні пружні переміщення у технологічній системі. Застосування абразивних кругів з підвищеною ріжучою здатністю не вирішує проблему низької ефективності обробки внутрішніх циліндричних поверхонь деталей. Перспективним напрямком розв’язання цієї проблеми є оптимізація пружних переміщень під час внутрішнього шліфування [2]. Для цього необхідно виявити і аналітично описати закономірності зміни пружних переміщень у часі й на цій основі провести оптимізацію структури й параметрів внутрішнього шліфування за критерієм найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні, що допоможе обґрунтовано визначити оптимальні умови шліфування й забезпечити підвищення якості й продуктивності обробки.

**Мета роботи** – підвищення якості й продуктивності обробки внутрішніх циліндричних поверхонь деталей редукторів на фінішних операціях за рахунок оптимізації їхньої структури й параметрів.

**Результати досліджень.** Аналіз опублікованих у науково-технічній літературі результатів показав, що на поточний час склалося досить повне уявлення про технологічні можливості й шляхи зменшення пружних переміщень у технологічній системі й відповідно похибок обробки. При цьому теоретичні рішення базуються на спрощеному (лінійному) поданні пружних переміщень залежно від часу обробки, тоді як дана закономірність підкоряється більш складній нелінійній залежності. Тому урахування нелінійності

залежності пружних переміщень від часу обробки в балансі переміщень у технологічній системі дає можливість по-новому підійти до встановлення закономірностей виникнення й умов усунення коливань у технологічній системі, зменшуючи похибки обробки й збільшуючи продуктивність процесу. В зв'язку з цим аналітично визначені умови підвищення точності й продуктивності обробки для спрощеної схеми шліфування деталі, яка рухається по нормалі до робочої поверхні круга з постійною швидкістю  $V_0$ . За основу рішення прийнято теоретичні розробки [3] по визначенню величини пружного переміщення  $y$ , яке виникає в технологічній системі.

Використовуючи рівняння балансу переміщень у 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  $y$ :

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

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

шліфування, м;  $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$  – постійна часу утворення пружного

переміщення в технологічній системі, с;  $\sigma$  – умовне напруження різання, Н/м<sup>2</sup>;  $K_{ш} = P_z / P_y$  – коефіцієнт шліфування;  $P_z, P_y$  – тангенціальна й радіальна складові сили різання, Н;  $c$  – жорсткість технологічної системи в радіальному напрямку, Н/м;  $V_{кр}$  – швидкість обертання круга, м/с;  $F$  – площа поперечного перерізу оброблюваної деталі, м<sup>2</sup>.

Залежність (1) для  $y_0 = 0$  є основою для визначення найменшого основного часу обробки  $\tau$  з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні на операції шліфування з дискретно змінюваною по переходах швидкістю переміщення деталі. При шліфуванні у два переходи  $\tau$  обчислюється

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 = \frac{\Pi}{V_1} + \frac{y_1}{V_2} = B \cdot \left( \frac{\Pi}{y_{cm1}} + \frac{y_1}{y_{cm2}} \right), \quad (2)$$

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) та на другому (2) переходах.

Застосовуючи уточнення на 1-ому переході  $\varepsilon_1 = \frac{\Pi}{y_1} = \frac{\tau_1}{B \cdot (1 - e^{-\tau_1/B})}$  і на

2-ому переході  $\varepsilon_2 = \frac{y_1}{y_2} = \frac{\tau_2}{B \cdot (1 - e^{-\tau_2/B})}$ , з урахуванням сумарного уточнення

$\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2$  і залежності (2), отримано рівняння для визначення основного часу обробки  $\tau$ :

$$\varepsilon_{\text{сум}} \cdot \left[ 1 - e^{-\frac{(\tau-\tau_1)}{B}} - e^{-\frac{\tau_1}{B}} + e^{-\frac{\tau}{B}} \right] = \frac{1}{B^2} \cdot (\tau \cdot \tau_1 - \tau_1^2), \quad (3)$$

де  $y_2$  – пружне переміщення, яке виникає в технологічній системі на другому переході й визначає точність розміру оброблюваної поверхні, м.

При наявності екстремуму (мінімуму) функції  $\tau = f(\tau_1)$  залежність (3) набуває вигляду:

$$\varepsilon_{\text{сум}} \cdot \left[ -e^{-\frac{(\tau-\tau_1)}{B}} + e^{-\frac{\tau_1}{B}} \right] = \frac{1}{B} \cdot (\tau - 2 \cdot \tau_1). \quad (4)$$

Маємо рішення:  $\tau = 2 \cdot \tau_1$ , відповідно  $\tau_1 = \tau_2$ . Звідки  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ ,  $\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2 = \varepsilon^2$  і рівняння (4) приймає вид

$$\varepsilon_{\text{сум}} = \frac{\tau_1^2}{B^2 \cdot (1 - e^{-\tau_1/B})^2}. \quad (5)$$

Для  $\varepsilon_{\text{сум}} = 5,376$  і відповідно  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon = 2,319$  із (5) визначені екстремальні (мінімальні) значення відносних величин:  $\tau_1/B = \tau_2/B = 2$ ;  $\tau/B = 4$ , а із (2) – екстремальне значення відношення  $\Pi / y_{\text{cm1}} = 2$  (рис. 1,а).

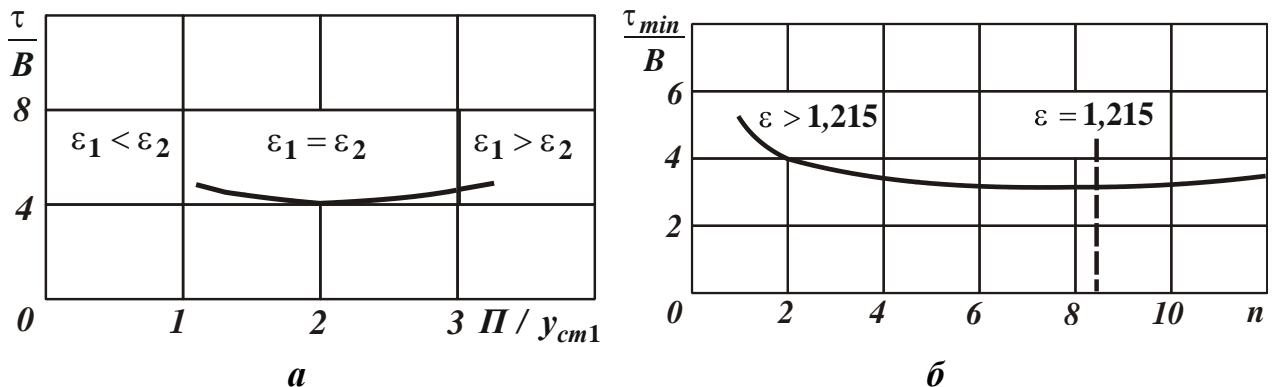


Рис. 1. Залежності відносної величини  $\tau/B$  від відношення  $\Pi / y_{\text{cm1}}$  (а) та відносної величини  $\tau_{\text{min}} / B$  від кількості переходів  $n$  (б)

Таким же чином визначається відносна величина  $\tau/B$  при шліфуванні в три й більше переходів. Загальним рішенням є те, що мінімум  $\tau/B$  досягається при одній і тій же тривалості переходів і одних значеннях уточнення на кожному переході, тобто  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \dots = \varepsilon_n = \varepsilon$ ;  $\varepsilon_{\text{сум}} = \varepsilon_1^n = \varepsilon^n$ . Зі збільшенням кількості переходів  $n$  відносна величина  $\tau_1/B$  зменшується, а  $\tau/B$  змінюється по екстремальній залежності, досягаючи мінімуму при  $n=8$  (для  $\varepsilon_{\text{сум}} = 5,376$ , табл. 1, рис. 1,б).

Таблиця 1

Розрахункові значення  $\varepsilon$ ,  $\tau_1/B$  і  $\tau/B$ 

$n$	1	2	3	4	5	6	8	10	12
$\varepsilon$	5,376	2,319	1,75	1,52	1,4	1,32	1,235	1,18	1,15
$\tau_1/B$	5,3	2	1,25	0,91	0,72	0,58	0,435	0,35	0,3
$\tau/B$	5,3	4	3,75	3,64	3,6	3,48	3,47	3,5	3,6

Найменший основний час обробки  $\tau_{min}$  при шліфуванні в  $n$  переходів з урахуванням залежності (1) для  $y_0 = 0$  й  $y_1 = y$ ;  $x = \Pi / y_{cm1}$  обчислюється

$$\tau_{min} = B \cdot n \cdot \frac{\Pi}{y_{cm1}} = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{сум}}{\ln \frac{\Pi}{y_1}} \cdot \frac{\Pi}{y_{cm1}} = B \cdot \frac{\ln \varepsilon_{сум}}{\ln \left[ \frac{x}{(1 - e^{-x})} \right]} \cdot x. \quad (6)$$

Величина  $x$  неоднозначно впливає на  $\tau_{min}$ . Визначаючи екстремум функції  $\tau_{min}$  від величини  $x$ , отримано рівняння:

$$\ln \left[ \frac{x}{(1 - e^{-x})} \right] = 1 - \frac{x \cdot e^{-x}}{(1 - e^{-x})}. \quad (7)$$

Розрахунками одержано:  $x = \Pi / y_{cm1} = 0,4$ ;  $y_1 / y_{cm1} = 0,329$ . Оптимальне уточнення на переході дорівнює  $\varepsilon = \Pi / y_1 = 1,215$ , а сумарне уточнення –  $\varepsilon_{сум} = 1,215^n$ . Для сумарного уточнення  $\varepsilon_{сум} = 5,376$  мінімум  $\tau_{min} = 0,4 \cdot n \cdot B = 3,2 \cdot B$ , де  $n = \frac{\ln \varepsilon_{сум}}{\ln \varepsilon} = \frac{\ln 5,376}{\ln 1,215} = \frac{1,68}{0,2} = 8,4$ . Значення  $\tau_{min} = 3,2 \cdot B$  несуттєво відрізняється від значення  $\tau_{min} = 4 \cdot B$ , отриманого при  $n=2$  і  $\varepsilon=2,32$  (рис. 1,б). Отже, майже з однаковою продуктивністю обробки можна шліфування вести в діапазоні  $n=2...8$ , тобто при зміні уточнення  $\varepsilon$  в межах 1,215...2,32.

Для сумарного уточнення  $\varepsilon_{сум} = 100$  екстремальна кількість переходів дорівнює  $n = \frac{\ln \varepsilon_{сум}}{\ln \varepsilon} = \frac{\ln 100}{\ln 1,215} = 23$ , а  $\tau_{min} = 0,4 \cdot 23 \cdot B = 9,2 \cdot B$ . Розрахунками

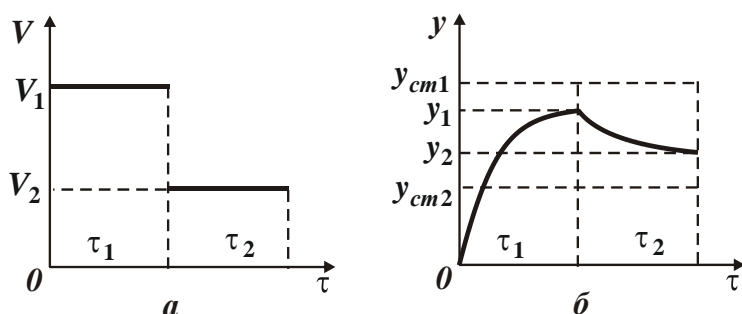


Рис. 2. Характер зміни швидкості  $V$  (а) і пружнього переміщення  $y$  (б) з часом обробки  $\tau$

встановлено, що при  $n = 4...23$  відносна величина  $\tau/B$  змінюється несуттєво (у межах 9,2...12). Тому практично з мінімальним основним часом обробки можна здійснювати шліфування при  $n=4...5$  (тобто при  $\varepsilon=2,5...3,15$ ), оскільки подальше збільшення  $n$  не дає відчутного ефекту зниження  $\tau/B$ . Таким чином, враховуючи нелінійність

функції  $V(\tau)$  в залежності  $y = B \cdot V(\tau)$ , виконано уточнений розрахунок найменшого основного часу обробки з урахуванням обмеження по точності розміру оброблюваної поверхні при врізному шліфуванні за жорсткою схемою з дискретно змінюваним в часі характером контакту круга з деталлю.

Для порівняння в роботі отримані аналогічні рішення відносно врізного шліфування за жорсткою схемою з постійним контактом круга з деталлю. Основний час обробки  $\tau$  на операції шліфування у два переходи (рис. 2) при зніманні припусків  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$

$$\tau = \frac{\Pi_1}{V_1} + \frac{\Pi_2}{V_2} = B \cdot \left( \frac{\Pi_1}{y_{cm1}} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right). \quad (8)$$

Тут параметри  $V_1, V_2$  й відповідно  $y_{cm1} = B \cdot V_1$ ,  $y_{cm2} = B \cdot V_2$  – невідомі. Виразимо залежність (8) відносно  $y_{cm1}$  й підставимо отриманий вираз в (1), приймаючи на першому переході  $y = y_1$ ;  $y_0 = 0$ ;  $y_{cm} = y_{cm1}$ :

$$y_1 = \frac{\Pi_1}{\left( \frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left( \frac{\tau}{B} + \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \right]. \quad (9)$$

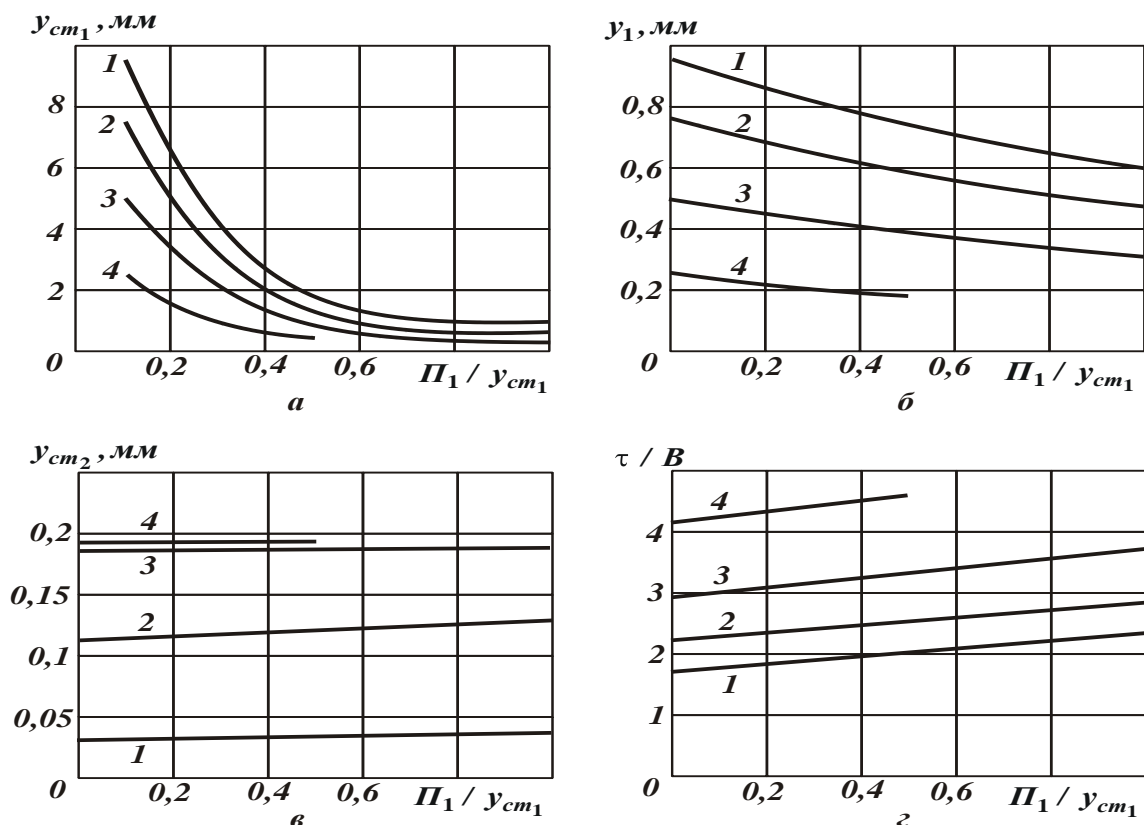


Рис. 3. Залежності параметрів  $y_{cm1}$  (а),  $y_1$  (б),  $y_{cm2}$  (в) і  $\tau/B$  (г) від відношення  $\Pi_1/y_{cm1}$ : 1 –  $\Pi_1=0,95$  мм;  $\Pi_2=0,05$  мм; 2 –  $\Pi_1=0,75$  мм;  $\Pi_2=0,25$  мм; 3 –  $\Pi_1=\Pi_2=0,5$  мм; 4 –  $\Pi_1=0,25$  мм;  $\Pi_2=0,75$  мм ( $\Pi=1$  мм і  $y_2=0,186$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

Потім підставимо залежність (9) в (1), приймаючи на другому переході  $y = y_2$ ;  $y_0 = y_1$ ;  $y_{cm} = y_{cm2}$ :

$$y_2 = y_{cm2} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{\Pi_2}{y_{cm2}}} \right) + \frac{\Pi_1}{\left( \frac{\tau}{B} - \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\left( \frac{\tau}{B} - \frac{\Pi_2}{y_{cm2}} \right)} \right] \cdot e^{-\frac{\Pi_2}{y_{cm2}}}. \quad (10)$$

Рівняння (9) і (10) містять лише дві невідомі величини  $y_{cm2}$  й  $\tau/B$ , тому що параметри  $y_1$  й  $y_{cm1}$  визначаються на основі залежності (1), розглядаючи  $y = y_1$ ;  $y_0 = 0$ ;  $y_{cm} = y_{cm1}$  (рис. 3,а, рис. 3,б). Задаючи  $y_2$ ,  $\Pi$ ,  $\Pi_1$  і  $\Pi_2 = \Pi - \Pi_1$ , на основі рівнянь (9) і (10) можна розрахувати значення  $y_{cm2}$  і  $\tau/B$  (рис. 3,в, рис. 3,г). Як видно, зі збільшенням  $\Pi_1$  відносна величина  $\tau/B$  зменшується, досягаючи мінімального значення за умови  $\Pi_1 = \Pi$ , тобто, коли знімання припуску й формування точності обробки відбувається на другому переході. Перший перехід служить лише для створення в системі пружного переміщення (початкового натягу) величиною  $y_1 = \Pi$ . Це вказує на ефективність застосування пружної схеми шліфування з початковим натягом у технологічній системі, рівним (1 схема на рис. 4) або кратним (2 схема на рис. 4) величині знятого припуску. При шліфуванні у два переходи, що включає перехід шліфування за жорсткою схемою й перехід шліфування за пружною схемою з початковим натягом у технологічній системі, значно меншим величині знятого припуску (3 схема на рис. 4), відносна величина  $\tau/B$  й відповідно основний час обробки  $\tau$  приймають більші значення. Установлено також, що значення  $\tau/B$  при шліфуванні з постійним у часі контактом круга з деталлю (рис. 4) менше, ніж при дискретному контакті (рис. 1).

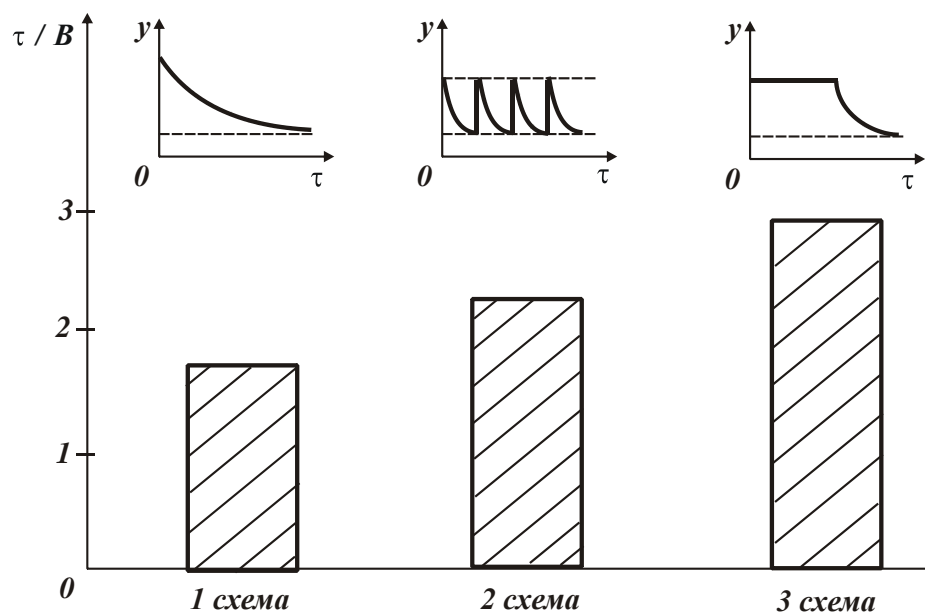


Рис. 4. Діаграма розподілу значень  $\tau/B$  для трьох схем шліфування

На основі отриманих рішень аналітично виявлені умови підвищення точності й продуктивності обробки при внутрішньому шліфуванні. Аналітично визначена величина  $y$  при шліфуванні за пружною схемою з початковим натягом у технологічній системі (тобто за схемою виходжування) двома шляхами: на основі інтегрування і простого підсумовування фактичної глибини шліфування по проходах круга:

$$y = y_0 \cdot e^{-\frac{n}{B_1}} ; \quad (11)$$

$$y = y_0 \cdot \varepsilon^{-n} , \quad (12)$$

де  $\varepsilon = 1 + \frac{1}{B_1}$  – уточнення на проході;  $B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$  – безрозмірний

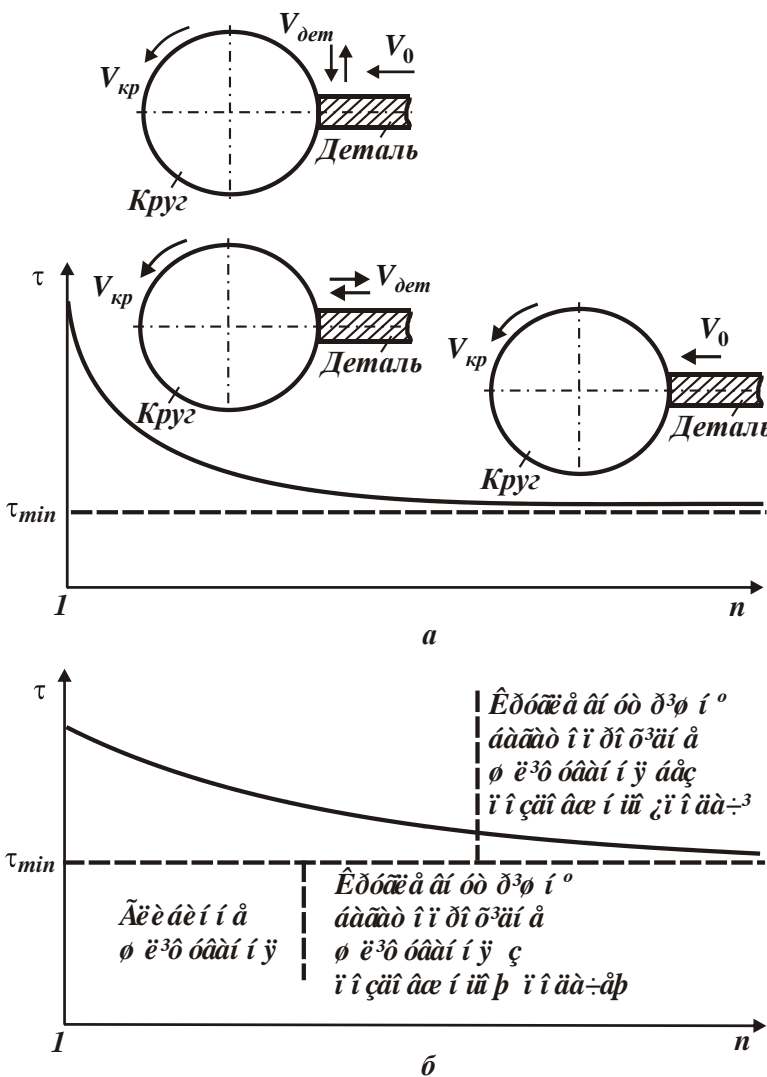


Рис. 5. Характер зміни  $\tau$  від кількості проходів круга  $n$  при шліфуванні за пружною схемою з початковим натягом у системі деталі (а) і при круглому внутрішньому шліфуванні (б)

параметр;  $H$  – ширина шліфування (висота круга), м;  $V_{дет}$  – швидкість переміщення деталі, м/с;  $n$  – кількість проходів круга;  $y_0$  – початковий натяг у технологічній системі, м.

Встановлено, що значення  $y$ , розраховані по залежності (11), завжди менші, ніж по залежності (12). Причому, для  $B_1 \leq 1$  відхилення значень  $y$  збільшується. Доведено, що залежність (12) точніше відображає закономірності формування пружних переміщень у технологічній системі й тому на її основі зроблено розрахунок основного часу обробки  $\tau = n \cdot L / V_{дет}$ , де  $L$  – довжина повздовжнього ходу круга, м. Встановлено, що зі збільшенням кількості проходів круга  $n \rightarrow \infty$  й відповідно швидкості деталі  $V_{дет} \rightarrow \infty$  основний

час обробки  $\tau$  зменшується, асимптотично наближаючись до найменшого значення

$$\tau_{min} = \frac{\sigma \cdot F}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot \ln \frac{y_0}{y}. \quad (13)$$

Таке ж значення основного часу обробки  $\tau = n \cdot L / V_{дем}$  встановлено на основі залежностей (11) і (1) за умови  $y_{cm}=0$ . Це вказує на те, що пружна схема шліфування з початковим натягом у технологічній системі й з безперервним у часі зніманням припуску дозволяє реалізувати найменший основний час обробки  $\tau$  (рис. 5,а). Пружна схема шліфування з дискретним у часі зніманням припуску характеризуються більш високим основним часом обробки  $\tau$ .

Залежність (13) справедлива при круглому внутрішньому шліфуванні як з поздовжньою, так і без поздовжньої подачі. У першому випадку параметр  $F$  визначає всю площу оброблюваної поверхні отвору  $F = \pi \cdot D_{дем} \cdot l$ , а в другому випадку – лише частину площі  $F = \pi \cdot D_{дем} \cdot H$  ( $D_{дем}$ ,  $l$  – відповідно діаметр і довжина оброблюваного отвору, м). Оскільки на верстаті можна реалізувати значно високі значення швидкості обертання деталі  $V_{дем}$  в порівнянні зі швидкістю поздовжньої подачі  $S_{позд}$ , то, виходячи з отриманого рішення, при круглому внутрішньому шліфуванні без поздовжньої подачі можна домогтися менших значень  $\tau$  (рис. 5,б). В цьому полягає ефективність застосування схеми круглого внутрішнього шліфування послідовними врізаннями – з радіальною подачею уступами.

Залежність (13) дає можливість визначити умови зменшення основного часу обробки  $\tau$  при круглому внутрішньому шліфуванні з низькою жорсткістю технологічної системи. Умови реалізації: зменшення умовного напруження різання  $\sigma$ , збільшення швидкості обертання круга  $V_{кр}$  і обробка поверхні за пружною схемою шліфування з початковим натягом у технологічній системі  $y_0$ , кратним величині знятого припуску  $P$ . Установлено, що від залежностей (11) і (12), справедливих для пружної схеми шліфування з початковим натягом у технологічній системі, можна перейти до залежностей для визначення величини пружного переміщення  $y$  при шліфуванні за жорсткою схемою:

$$y = y_{cm} \cdot (1 - e^{-\frac{n}{B_1}}); \quad (14)$$

$$y = y_{cm} \cdot (1 - \varepsilon^{-n}), \quad (15)$$

де  $y_{cm} = B_1 \cdot t$  – пружне переміщення при сталому процесі шліфування, м.

У цьому випадку основний час обробки  $\tau$ , який характеризує перехідний процес при шліфуванні за жорсткою схемою, такий же, як і при шліфуванні за пружною схемою з початковим натягом у технологічній системі, і описується залежністю (13). У зв'язку із цим, підвищити ефективність обробки в даних умовах можна за рахунок створення в



технологічній системі натягу, рівного величині  $y_{cm}$ , виключаючи перехідний процес із технологічного циклу обробки деталі. Це досягається застосуванням пружної схеми багатопрхідного шліфування з фіксованим радіальним зусиллям.

У роботі аналітично обґрунтовані умови виникнення й шляхи усунення коливань при шліфуванні [4]. Запропоновано рівняння коливань приведеної маси  $m$  від дії радіальної складової сили різання  $P_y = \frac{\sigma \cdot Q(\tau)}{K_{ш} \cdot V_{кр}}$ , сили

пружності системи  $-c \cdot y$  і сили опору  $-k_1 \cdot \dot{y}$  з урахуванням балансу переміщень у технологічній системі, де  $Q(\tau)$  – фактична продуктивність обробки,  $m^3/c$ ;  $k_1$  – коефіцієнт опору.

При шліфуванні деталі, що рухається по нормалі до робочої поверхні круга зі швидкістю  $V_0$ , рівняння коливань із урахуванням співвідношень  $Q(\tau) = F \cdot V(\tau)$  і  $V(\tau) = V_0 - \dot{y}$  та їх рішення для початкових умов  $y(\tau = 0) = 0$  і  $\dot{y}(\tau = 0) = V_0$  приймають вид:

$$\ddot{y} + \frac{(k_1 + c \cdot B)}{m} \cdot \dot{y} + \frac{c}{m} \cdot y = \frac{c}{m} \cdot B \cdot V_0; \quad (15)$$

$$y = y_{cm} \cdot \left[ 1 - e^{-\alpha \tau} \cdot \left( \cos \beta \tau - \frac{(1 - \alpha \cdot B)}{\beta \cdot B} \cdot \sin \beta \tau \right) \right], \quad (16)$$

де  $\alpha = \frac{(k_1 + c \cdot B)}{2m}$ ;  $\beta = \sqrt{\frac{c}{m} - \frac{(k_1 + c \cdot B)^2}{4m^2}}$ ;  $B = \frac{\sigma}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}} \cdot F$ ;  $y_{cm} = B \cdot V_0$ .

Аналіз залежності (16) показує, що приведена маса  $m$  виконує загасаючі коливання. Щоб виключити коливання в технологічній системі в початковий момент обробки й забезпечити стабільне протікання процесу шліфування, необхідно домогтися від'ємного значення підкореневого вираження параметра  $\beta$ . Це досягається за рахунок збільшення  $c \cdot B$ . Отже, реалізація статично несталого в часі процесу шліфування ( $V(\tau) < V_0$ ) сприяє підвищенню сили опору в системі й зниженню рівня коливань.

При шліфуванні з дискретно змінюваною в часі швидкістю переміщення деталі (при багатопрхідному внутрішньому й плоскому шліфуванні) рівняння коливань із урахуванням  $Q = H \cdot V_{дем} \cdot t_\phi$  і  $t_\phi = t - y$  і його рішення для початкових умов  $y(\tau = 0) = 0$ ;  $\dot{y}(\tau = 0) = 0$  приймають вид

$$\ddot{y} + \frac{k_1}{m} \cdot \dot{y} + \left( \frac{c}{m} + \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m} \right) \cdot y = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дем} \cdot t}{K_{ш} \cdot V_{кр} \cdot m}; \quad (17)$$

$$y = \frac{t}{\left( 1 + \frac{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}{\sigma \cdot H \cdot V_{дем}} \right)} \cdot \left[ 1 - e^{-\alpha \tau} \cdot \left( \cos \beta \tau - \frac{\alpha}{\beta} \cdot \sin \beta \tau \right) \right], \quad (18)$$

$$\text{де } \alpha = \frac{k_1}{2m}; \quad \beta = \sqrt{\frac{c}{m}(1 + B_1) - \frac{k_1^2}{4m^2}}; \quad B_1 = \frac{\sigma \cdot H \cdot V_{дет}}{c \cdot K_{ш} \cdot V_{кр}}$$

Залежність (18) описує характер зміни в часі амплітуди загасаючих коливань. Для виключення коливань у початковий момент обробки необхідно забезпечити від'ємне значення підкореневого вираження параметра  $\beta$  шляхом зменшення безрозмірного параметра  $B_1$  за рахунок реалізації статично сталого в часі процесу шліфування, коли фактична й номінальна глибини шліфування рівні. Це досягається створенням у системі статично рівноважного стану, при якому  $P_y = c \cdot y$ , наприклад, при шліфуванні за пружною схемою з фіксованим радіальним зусиллям  $P_y$  або при виходжуванні (рис. 6). Показано, що при переміщенні оброблюваної деталі по нормалі до робочої поверхні круга ймовірність усунення коливань у технологічній системі більша, ніж при переміщенні оброблюваної деталі по дотичній до робочої поверхні круга.

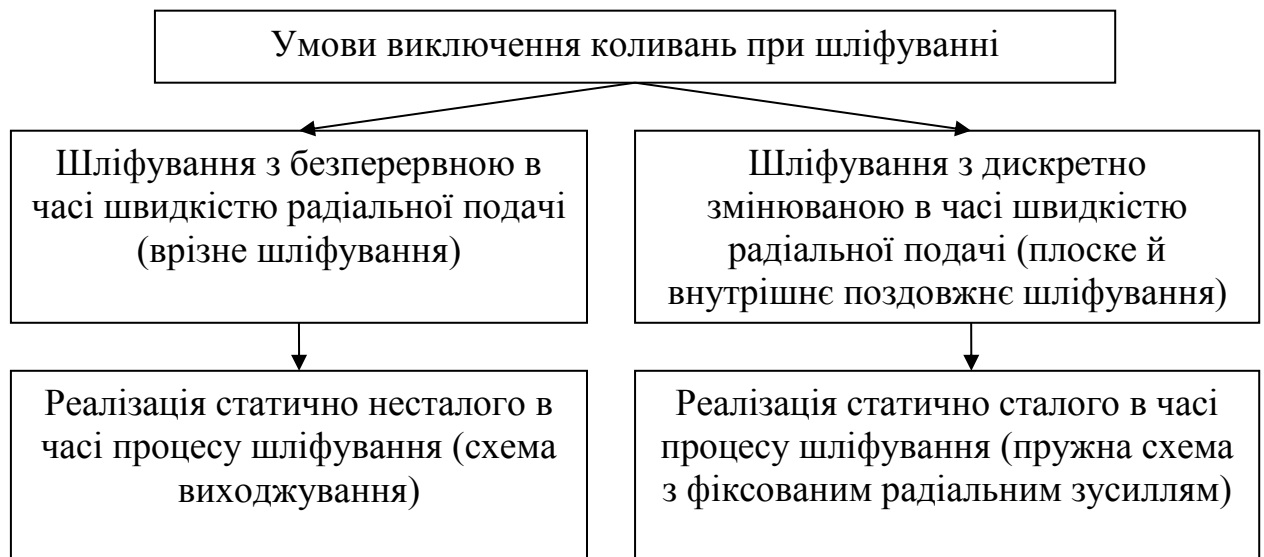


Рис. 6. Структурна схема умов виключення коливань при шліфуванні

Теоретичні рішення підтверджені експериментально. Для цього оброблялися отвори діаметром 150 мм і висотою 150 мм сателітів редуктора зі сталі 18ХГН2МФБ твердістю  $HRC\ 57...63$  абразивним кругом 100x20x62 25А 25 СМ1 8 із режимом шліфування:  $V_{кр} = 35$  м/с;  $V_{дет} = 30$  м/хв;  $S_{прод} = 1,5$  м/хв; тривалість поздовжнього ходу круга 7 с.

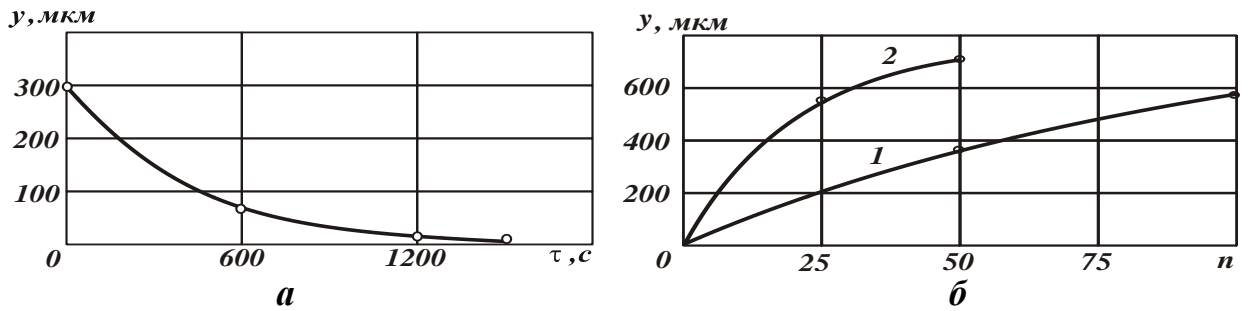


Рис. 7. Залежності пружного переміщення  $y$  від часу обробки  $\tau$  при виходжуванні (а) і від кількості проходів круга  $n$  при шліфуванні за жорсткою схемою (б): 1 –  $t=0,01$  мм; 2 –  $t=0,02$  мм.

Експериментально встановлено (рис. 7), що утворення пружних переміщень у технологічній системі при шліфуванні узгоджується з аналітичними залежностями. При цьому параметри  $B$  і  $B_I$  не залежать від часу обробки й при внутрішньому шліфуванні приймають значно більші значення ( $B=420\dots441$ с;  $B_I=60\dots63$ ), чим при круглому зовнішньому ( $B=4,27\dots4,88$  с) і плоскому ( $B_I=0,45$ ) шліфуванні. Експериментально встановлено, що при внутрішньому шліфуванні за жорсткою схемою  $y$  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 знижує продуктивність обробки. Показано, що в цих умовах весь припуск доцільно знімати за пружною схемою шліфування з початковим натягом (рис. 8), рівним або кратним величині припуску, що знімається (тобто за схемою виходжування з відключеною радіальною подачею).

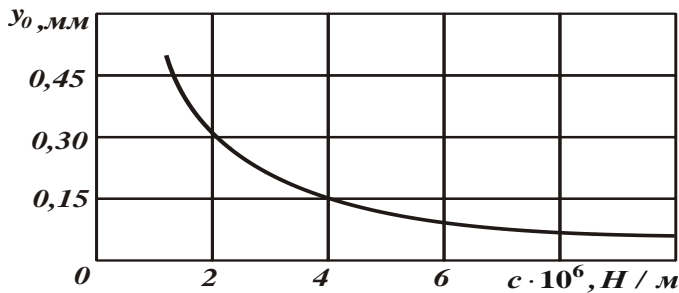


Рис. 8. Залежність граничних значень початкових натягів  $y_0$  від жорсткості

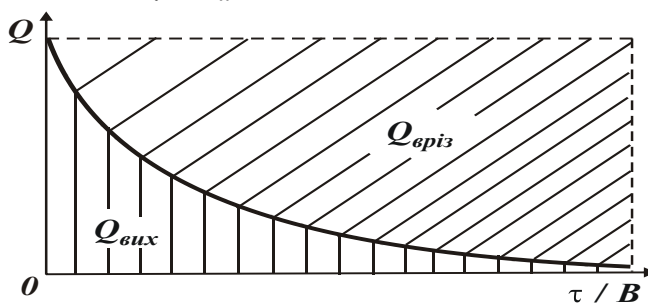


Рис. 9. Залежність кількості виділяемого тепла  $Q_{вих}$  при виходжуванні і  $Q_{вріз}$  при врізному шліфуванні від відносної величини  $\tau / B$

Експериментально встановлено, що при зніманні припуску 0,5 мм на сторону обробку ефективно виконувати в 3 переходи за пружною схемою шліфування 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 по точності розміру (у межах 10 мкм) і шорсткості ( $R_a < 0,63$  мкм) оброблюваної поверхні, фактично виключаються коливання в системі. На оброблених поверхнях відсутні припікання й

мікротріщини. На 30 % знижуються витрати абразивних кругів у зв'язку зі зменшенням їхнього зношування. Експериментально встановлено, що застосування нового варіанта 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. Це узгоджується з теоретичними рішеннями, виходячи з яких кількість тепла  $Q_{вих}$  (рис. 9), що виділяється при шліфуванні за схемою виходжування, до 3-х разів менше, ніж при врізному шліфуванні за жорсткою схемою ( $Q_{вріз}$ ). Причому, зі збільшенням відносної величини  $\tau / B$  відношення  $Q_{вих} / Q_{вріз}$  зменшується.

На основі отриманих результатів розроблені ефективні технологічні операції фінішної обробки внутрішніх циліндричних поверхонь деталей редукторів приводів шахтних конвеєрів (зубчастих коліс, сателітів, втулок та інш.), які підвищують точність і продуктивність обробки й стабільно забезпечують вимоги по точності і якості оброблюваних поверхонь.

**Висновки.** 1. Доведено, що при дискретному характері знімання припуску основний час обробки завжди менше й лише в умовах значної багатопрохідності при шліфуванні однаковий з основним часом обробки, який досягається при безперервному характері знімання припуску.

2. Виявлена незначність зміни основного часу обробки в широкому діапазоні зміни уточнення (1,215...3,15) при дискретному характері знімання припуску, що дає змогу виконувати шліфування за кілька переходів, зменшуючи трудомісткість обробки при забезпеченні заданої точності оброблюваної поверхні.

3. Теоретично обґрунтовані умови підвищення точності й продуктивності обробки при внутрішньому шліфуванні з пониженою жорсткістю технологічної системи, складовими яких є зменшення енергоємності обробки, збільшення швидкості круга й здійснення знімання припуску шляхом періодичного створення в технологічній системі натягів, кратних величині припуску, що знімається.

4. Виявлені причини виникнення коливань при внутрішньому та плоскому шліфуванні, які пов'язані зі статично нерівноважним станом технологічної системи, і на цій основі обґрунтовані умови їхнього усунення за рахунок реалізації пружної схеми шліфування.

### Список літератури

1. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей [Текст] / А.В. Якимов. – М.: Машиностроение, 1984. – 212 с.
2. Лурье Г.Б. Прогрессивные методы круглого наружного шлифования [Текст] / Г.Б. Лурье. – Л.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
3. Новиков Ф.В., Ковальчук А.И. Оптимизация структуры и параметров операций шлифования валов приводов шахтных конвейеров [Текст] // Труды 14-й Международной научно-технической конференции.

Физические и компьютерные технологии. – Харьков: ХНПК “ФЭД”, 2008. – С. 3-13.

Новиков Ф.В. Исследование условий возникновения и путей устранения колебаний при шлифовании [Текст] / Ф.В. Новиков, Р.А. Бережной // Защита металлургических машин от поломок. – Мариуполь. – 2009. – Вып. 11. – С. 264-270.