

УДК 621.923.04

О.М. Фасахов, В.К. Фролов

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Управління процесом оброблення деталей вільним абразивом в горизонтальному барабані

Галтувальний спосіб оброблення деталей отримав широке розповсюдження в промисловості, що пояснюється простотою конструктивного виконання пристроїв та можливістю оброблення широкої номенклатури деталей.

Процес оброблення заснований на зіткненні деталей з обробляючим середовищем. Зіткнення відбувається різними поверхнями і під різними кутами одночасно з усіх боків, тому всі поверхні оброблюються рівномірно. Відбувається полірування поверхонь, обрізка кутів і задирок, а також частковий наклеп і зміцнення поверхневого шару деталей.

Схеми оброблення різноманітні, але в основному це обертання циліндричних або гранованих барабанів навколо вертикальної, горизонтальної чи нахиленої осі з завантаженими в них деталями та обробляючим середовищем, яке виконує роль робочого інструмента [1].

В якості робочого інструмента використовують абразивні матеріали (бій абразивних кругів, гранульований абразив, шліфувальні зерна та порошки) або різні наповнювачі, як металеві (сталеві поліровані кулі), так і неметалеві (дерев'яні кулі і кубики, обрізки шкіри, повсті) різної форми і розмірів. Для отримання найменшої шорсткості поверхонь оброблюваних деталей до абразивних матеріалів додають розчини технічного мила, кальцинованої соди, тринатрійфосфату, активних зволожувачів тощо.

Недоліком даних способів оброблення є те, що постійна частота обертання барабана призводить до різних умов оброблення деталей – частина деталей знаходиться в «активній» зоні 1, в якій відбувається процес оброблення, а частина деталей знаходиться в «мертвій» зоні 2, де деталі і зерна абразиву майже не переміщуються відносно один одного (рис. 1). Це спричиняє нерівномірну якість поверхонь деталі та зменшує продуктивність процесу.

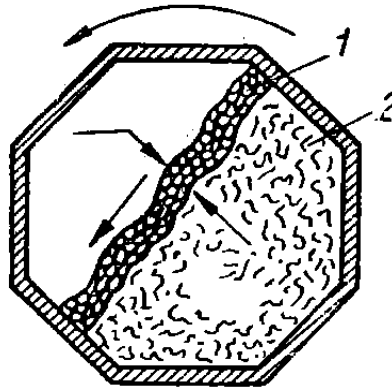


Рис. 1. Конфігурація абразивного середовища в обертовому барабані
[2, стор. 370-371]

В існуючих літературних джерелах знайдені різноманітні, не співпадаючі одне з одним рекомендації по призначенню частоти обертання барабана:

1) при поліруванні деталей в барабанах деталі та полірувальні матеріали завантажують в барабан та призначають оберти барабана з рівномірною швидкістю, яка складає 0,5...1,0 м/сек. [2, стор. 370];

2) при очищенні поверхонь деталей від корозії, окалини, видалення задирок та заокруглення гострих країв частота обертання барабана визначається розміром та конфігурацією деталей, їхньою кількістю в барабані та складом абразивного наповнювача; для барабана діаметром 0,5 м рекомендована частота обертання $n = 30 - 40$ об./хв., для барабана діаметром 0,8 м частота обертання $n \leq 25$ об./хв., при обробленні важких та великогабаритних деталей частота обертання $n = 12 - 15$ об./хв. [3, стор. 113-114];

3) при галтуванні деталей в спеціальних дзвонах та барабанах призначають швидкість обертання 10 – 50 об./хв. [4];

4) при очищенні відливків в галтовочних барабанах призначають кутову швидкість барабанів, виходячи з формул:

$$\text{для барабанів діаметром } > 0,7\text{м.} - \omega_6 \leq \frac{3,14}{\sqrt{D}} \rightarrow n = \frac{3,14}{2\pi\sqrt{D}} \text{ об./хв.};$$

$$\text{для барабанів діаметром } < 0,7\text{м.} - \omega_6 \leq \frac{3,40}{\sqrt{D}} \rightarrow n = \frac{3,40}{2\pi\sqrt{D}} \text{ об./хв. [5];}$$

5) при проведенні сухого галтування з метою полірування призначають швидкість обертання барабана $n = 60 - 180$ об./хв. [6, стор. 351];

б) при подрібненні матеріалів у кульових млинах приймають швидкість обертання барабана $\frac{32}{\sqrt{D}} \leq n \leq \frac{37}{\sqrt{D}}$ об./хв. [7];

7) для розмелювання матеріалу у дрібну фракцію в кульових млинах приймають швидкість обертання барабана $n = \frac{32}{\sqrt{D}}$ об./хв. [8];

8) при галтуванні великих (найбільший розмір понад 50мм) або крихких деталей частота обертання галтовочного барабана $n = 20 - 30$ об./хв., а при галтуванні деталей, що витримують сильні удари, $n = 40 - 80$ об./хв. [9];

9) при поліруванні деталей частота обертання барабана постійна для деталей різних розмірів (маси) та визначається за залежностями:

- дрібні (легкі) деталі до 30 мм – $n = 28,1/\sqrt{D}$;

- середні деталі 32...150 мм – $n = 21,2/\sqrt{D}$;

- великі (важкі) деталі більше 150 мм – $n = 15,9/\sqrt{D}$ [10, стор.199];

10) при поліруванні ювелірних каменів для барабана діаметром 0,15 м рекомендована частота обертання $n = 35 - 55$ об./хв., для барабана діаметром 0,25 м частота обертання $n = 25 - 40$ об./хв., для барабана діаметром 0,3 м частота обертання $n = 15 - 25$ об./хв., для барабана діаметром 0,4 м частота обертання $n = 5 - 15$ об./хв. [11, стор. 238-242].

З приведеного вище можна зробити висновок, що рекомендації отримані здебільшого експериментальним шляхом, а єдиної теоретично обґрунтованої методики по призначенню частоти обертання барабана не існує.

Метою роботи є отримання теоретичної залежності частоти обертання барабана від його розмірів та інших параметрів процесу.

Подібна задача розглядається в роботі [12], але при її вирішенні не враховується коефіцієнт тертя між середовищем барабана та його стінкою.

В роботі [13] коефіцієнт тертя враховується, але мінімальна сила тертя розрахована для однієї точки, а максимальна дотична складова сили тяжіння – для іншої. При цьому отримані значення сил використовуються в одному рівнянні рівноваги, що, на погляд авторів, є некоректним.

В роботі [14] коефіцієнт тертя враховується, але є постійним і дорівнює 1, що не відповідає реальним умовам оброблення вільним абразивом.

Схема сил, що діють на абразивне середовище з деталями при обертанні барабана, приведена на рис. 2.

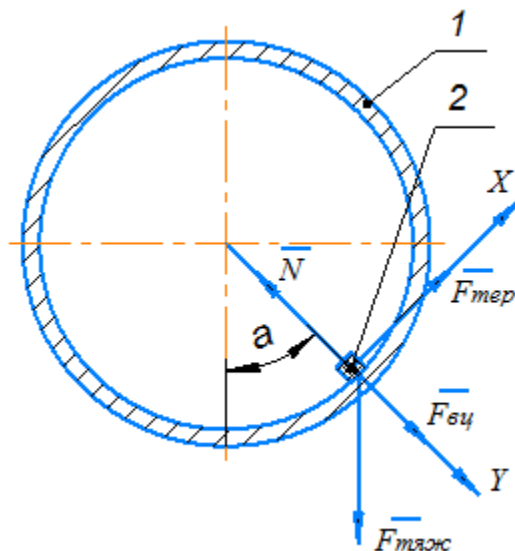


Рис. 2. Схема сил, що діють на абразивне середовище з деталями при обертанні барабана (1 – барабан; 2 – абразивне середовище)

Максимальну частоту обертання n_{max} барабана, при якій абразивне середовище з деталями знаходиться в рівновазі у його верхній точці, можна визначити з умови рівноваги сил, що діють на абразивне середовище в довільній точці барабана.

Перейдемо в систему відліку, яка обертається разом з барабаном. Ця система являється неінерційною, тому необхідно ввести відцентрову силу, направлену від центру обертання по осі Y . При максимальній частоті обертання абразивне середовище не ковзає по поверхні барабану, тобто сили, що діють на абразивне середовище з деталями в довільній точці барабана, знаходяться в рівновазі:

$$\vec{F}_{вц} + \vec{F}_{тяж} + \vec{N} + \vec{F}_{тер} = 0.$$

Умову рівноваги сил можна виразити системою проєкцій цих сил на вісі X та Y :

$$\begin{cases} F_{вц} + F_{тяж} \cos \alpha - N = 0 & \text{— проєкція сил на вісь } Y; \\ F_{тер} - F_{тяж} \sin \alpha = 0 & \text{— проєкція сил на вісь } X, \end{cases}$$

де α – кут розташування довільної точки барабана;

$F_{вц}$ – відцентрова сила, яка складає

$$F_{вц} = m\omega^2 R,$$

де m – маса абразивного середовища з деталями, кг;

ω – кутова швидкість обертання неінерційної системи відліку відносно інерційної, рад./с.;

R – внутрішній радіус барабана, м;

$F_{\text{тяж}}$ – сила тяжіння абразивного середовища з деталями, яка складає

$$F_{\text{тяж}} = mg,$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,8 \text{ м/с.}^2$;

m – маса абразивного середовища з деталями, кг;

N – сила реакції опори;

$F_{\text{тер}}$ – сила тертя покою.

Як відомо, сила тертя покою не може перевищити деяке критичне значення, що дорівнює $f_{\text{тер}}N$. Тобто $F_{\text{тер}} \leq f_{\text{тер}}N$,

де $f_{\text{тер}}$ – коефіцієнт тертя між внутрішньою стінкою барабана та абразивним середовищем з деталями.

Тоді з приведенного вище можна записати:

$$mgsin\alpha \leq f_{\text{тер}}(m\omega^2R + mgcos\alpha).$$

Звідки:

$$gsin\alpha \leq f_{\text{тер}}\omega^2R + f_{\text{тер}}gcos\alpha.$$

Переписавши останній вираз відносно ω , отримаємо:

$$\omega^2 \geq \frac{gsin\alpha - f_{\text{тер}}gcos\alpha}{f_{\text{тер}}R} \geq \frac{g(sin\alpha - f_{\text{тер}}cos\alpha)}{f_{\text{тер}}R} \geq \frac{g}{R} \left(\frac{sin\alpha}{f_{\text{тер}}} - cos\alpha \right),$$

або

$$\omega \geq \sqrt{\frac{g}{R} \left(\frac{sin\alpha}{f_{\text{тер}}} - cos\alpha \right)}.$$

Очевидно, що максимальне значення кутової швидкості ω буде досягнуто при певному куті α , тому:

$$\omega_{\text{max}} = \sqrt{\frac{g}{R} \max\left(\frac{sin\alpha}{f_{\text{тер}}} - cos\alpha\right)}.$$

Для подальших розрахунків кутова швидкість малоінформативна, тому останнє рівняння запишемо відносно частоти обертання барабана.

Відомо, що:

$$\omega_{\text{max}} = 2\pi n_{\text{max}}; R = \frac{D}{2}.$$

Тоді:

$$2\pi n_{max} = \sqrt{\frac{2g}{D} \max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{тер}} - \cos\alpha\right)}.$$

Вирішивши рівняння відносно частоти обертання, отримаємо:

$$n_{max} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{2g}{D} \max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{тер}} - \cos\alpha\right)} = \sqrt{\frac{g}{2\pi^2 D} \max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{тер}} - \cos\alpha\right)}.$$

Підставивши відомі значення констант, отримаємо:

$$n_{max} = \sqrt{\frac{9,8 \cdot 3600}{2\pi^2 D} \max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{тер}} - \cos\alpha\right)} = \sqrt{\frac{1789,1}{D} \max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{тер}} - \cos\alpha\right)},$$

або

$$n_{max} = 42,3 \sqrt{\frac{\max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{тер}} - \cos\alpha\right)}{D}}.$$

За допомогою програмного середовища WolframAlpha розраховані екстремуми підкореневого чисельника для різних значень $f_{тер}$, зведені в табл. 1.

Для спрощення подальших розрахунків побудовані графіки залежності екстремуму підкореневого чисельника від коефіцієнта тертя між внутрішньою стінкою барабана та абразивним середовищем з деталями $f_{тер}$ (рис. 3).

Найточніше апроксимоване рівняння отримано при степеневій апроксимації.

Зважаючи на це, можна записати залежність для визначення частоти обертання, при якій абразивне середовище з деталями знаходиться в рівновазі у верхній точці барабана:

$$n_{max} = 42,3 \frac{1,096 f_{тер}^{-0,478}}{\sqrt{D}} \approx \frac{46,5}{f_{тер}^{0,48} \sqrt{D}}, \text{ об./хв.} \quad (1)$$

В результаті проведених досліджень був запропонований спосіб оброблення деталей вільним абразивом в горизонтальному барабані [15].

Задачею нового способу є стабілізація умов оброблення деталей шляхом зміни траєкторій їх руху відносно барабана та абразивного середовища, що забезпечує рівномірну якість поверхонь деталей та збільшує продуктивність процесу.

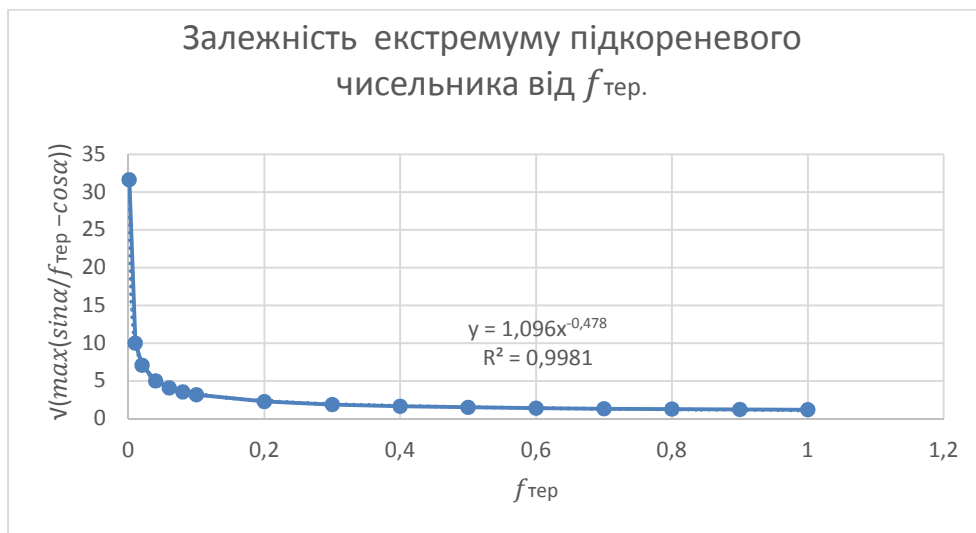
Оброблення відбувається наступним чином: заготовки завантажують в нерухомий барабан з абразивним середовищем та передають барабану

обертальний рух навколо його горизонтальної осі, через певний час барабан зупиняють та вивантажують готові деталі.

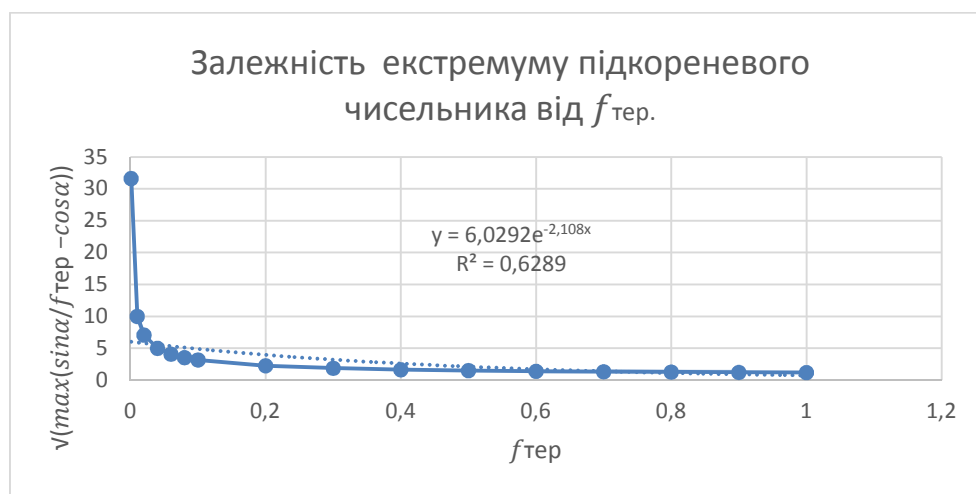
Частоту обертання барабана спочатку збільшують до максимальної величини, потім зменшують до нуля, потім збільшують до максимальної величини у зворотному напрямі та знову зменшують до нуля, причому на кожному з цих етапів зміну частоти обертання барабана здійснюють дискретно, періодично зменшуючи кутове прискорення до нуля, а максимальну частоту обертання визначають з виразу (1), при цьому призначають $f_{\text{тер}} = 0,3 \dots 0,5$ у випадку сухого тертя, $f_{\text{тер}} = 0,1 \dots 0,3$ у випадку напіврідинного тертя.

Таблиця 1. Значення екстремуму підкореневого чисельника для різних значень коефіцієнту тертя $f_{\text{тер}}$

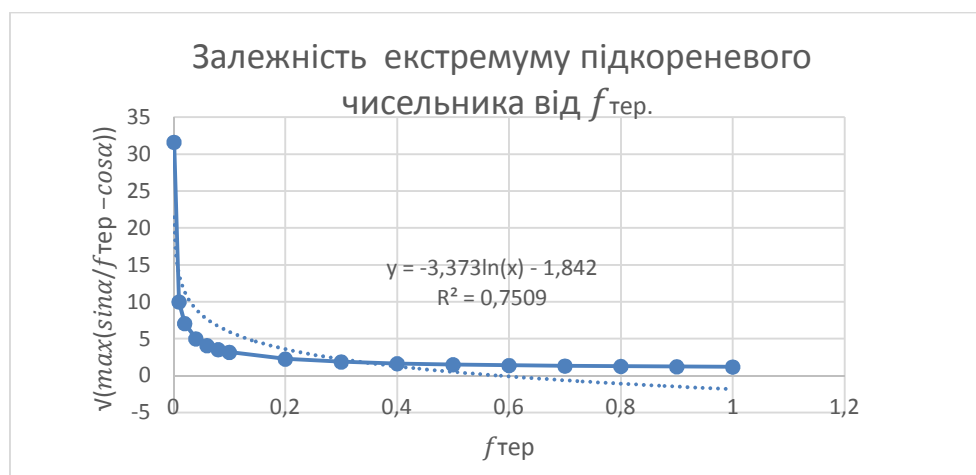
$f_{\text{тер}}$	$\max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{\text{тер}}} - \cos\alpha\right)$	$\sqrt{\max\left(\frac{\sin\alpha}{f_{\text{тер}}} - \cos\alpha\right)}$
0,001	$\sqrt{1000001}$	31,62
0,01	$\sqrt{10001}$	10
0,02	$\sqrt{2501}$	7,07
0,04	$\sqrt{626}$	5
0,06	$\sqrt{2509}/3$	4,08
0,08	$\sqrt{329}/2$	3,54
0,1	$\sqrt{101}$	3,17
0,2	$\sqrt{26}$	2,26
0,3	$\sqrt{2501}$	1,87
0,4	$\sqrt{29}/2$	1,64
0,5	$\sqrt{5}$	1,5
0,6	$\sqrt{34}/3$	1,39
0,7	$\sqrt{149}/7$	1,32
0,8	$\sqrt{41}/4$	1,27
0,9	$\sqrt{181}/9$	1,22
1	$\sqrt{2}$	1,19



а



б



в

Рис. 3. Графіки залежності екстремуму підкореневого чисельника від коефіцієнта тертя $f_{\text{тер}}$ (y – апроксимоване рівняння заданої функції, R^2 – достовірність апроксимації при: а – степеневій апроксимації; б – експоненціальній апроксимації; в – логарифмічній апроксимації)

При зміні частоти обертання барабана, періодичної її стабілізації та зміні напрямку обертання барабана змінюється конфігурація (контур циркуляції) завантаженої маси абразивного середовища з деталями та її розташування в барабані. Це призводить до зміни траєкторії оброблюваних деталей, переміщення їх з «мертвих» до «активних» зон і навпаки. Тим самим поверхні деталей оброблюються більш рівномірно та збільшується продуктивність процесу.

На рис. 4 зображена конфігурація завантаженої маси абразивного середовища з деталями при зміні величини та напрямку частоти обертання барабана (1 – оброблювані деталі, 2 – барабан, 3 – абразивне середовище), на рис. 5 – графік зміни частоти обертання n барабана в залежності від часу оброблення τ , на рис. 6 – графік зміни кутової швидкості ω барабана в залежності від часу оброблення τ , на рис. 7 – графік зміни кутового прискорення ε барабана в залежності від часу оброблення τ .

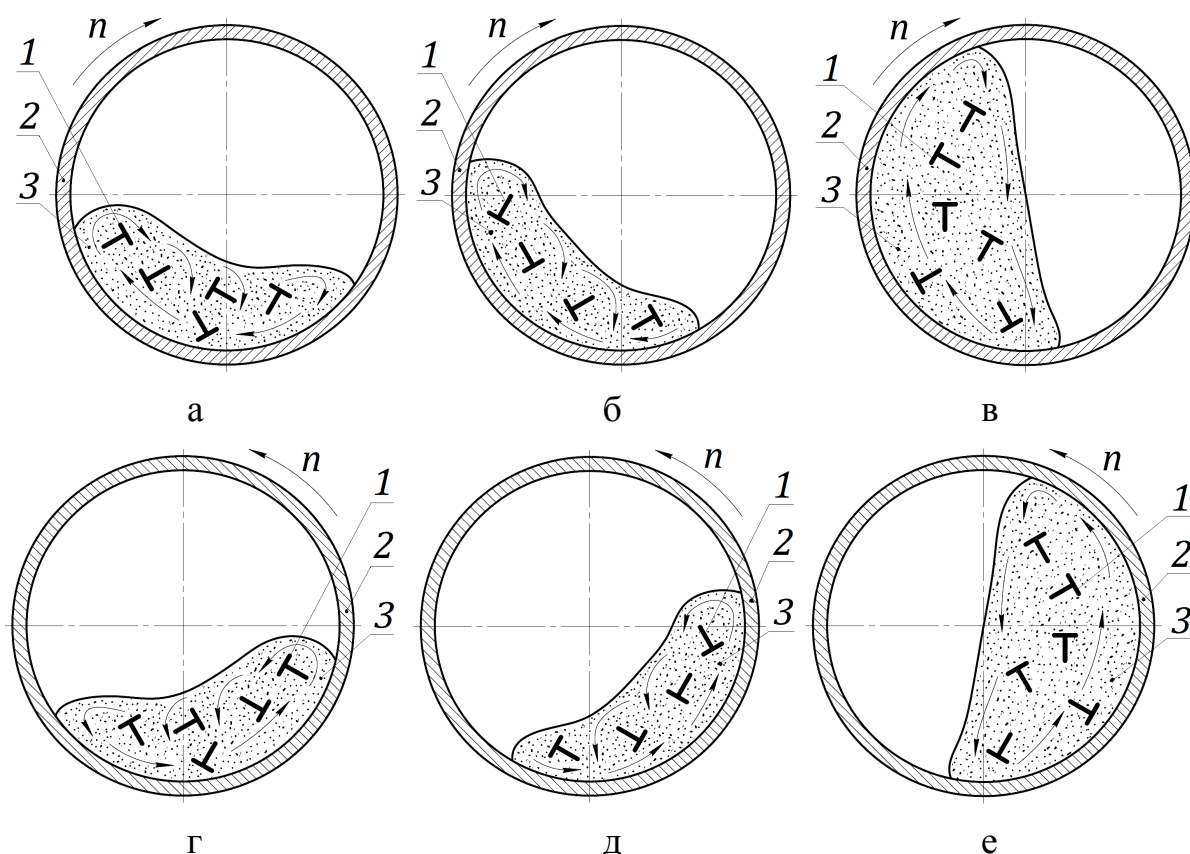


Рис. 4. Конфігурація маси абразивного середовища з деталями при зміні величини та напрямку частоти обертання барабана (а, б, в – частота обертання збільшується, напрям – за годинниковою стрілкою; г, д, е – частота обертання збільшується, напрям – проти годинникової стрілки)

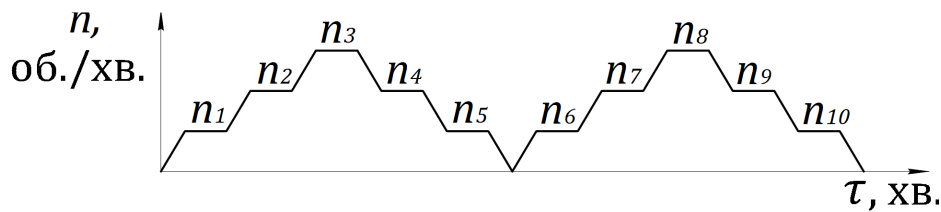


Рис. 5. Графік зміни частоти обертання n барабана в залежності від часу оброблення τ

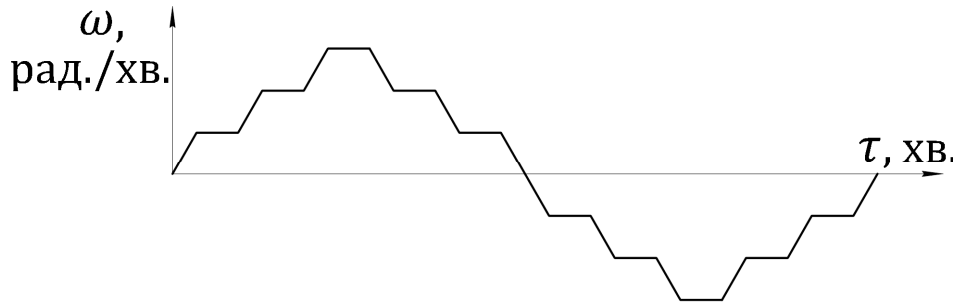


Рис. 6. Графік зміни кутової швидкості ω барабана в залежності від часу оброблення τ

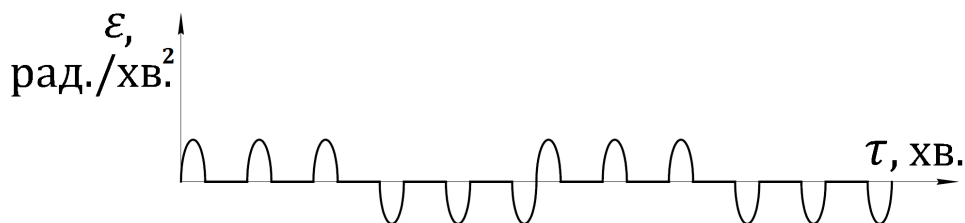


Рис. 7. Графік зміни кутового прискорення ε барабана в залежності від часу оброблення τ

Кількість періодів оброблення з постійною частотою обертання барабана, тривалість кожного з періодів та загальну кількість циклів оброблення призначають в залежності від технологічних завдань, вихідного стану поверхонь завантажених заготовок та необхідної якості поверхонь готових деталей.

Висновки

В результаті досліджень запропонований спосіб оброблення деталей вільним абразивом в горизонтальному барабані, який стабілізує умови оброблення деталей шляхом зміни траєкторій їх руху відносно барабана та

абразивного середовища, що забезпечує рівномірну якість поверхонь деталей та збільшує продуктивність процесу.

Список використаних джерел

1. <http://xn--80aagiccszezsw.xn--p1ai/uchebnye-posobiya/povyshenie-effektivnosti-otdelochnoj-obrabotki-detalej-iz-mednyx-splavov-svobodnymi-abrazivami-na-osnove-issledovaniya-sostava-texnologicheskoy-sredy/1-sostoyanie-voprosa-i-postanovka-zadachi-issledovaniya/1-1-analiz-metodov-otdelochnoj-obrabotki/1-1-6-galtovka>
2. Космачёв И.Г. Технология машиностроения. – Л.: Лениздат, 1970. 400 с.
3. Гальванические покрытия в машиностроении. Справочник. В 2-х томах / Под ред. М.А. Шлугера, Л.Д. Тока. – М: Машиностроение, 1985. – Т. 2. 1985. 248 с.
4. <http://gk-drawing.ru/line-module/metalworking/surface-cleaning.php>
5. http://referatwork.ru/category/proizvodstvo/view/291775_galtovochnye_barabany
6. Лившиц В.Б. Технология обработки материалов. Учебное пособие для СПО. – Юрайт, 2018. 382с.
7. <https://studfiles.net/preview/6065996/page:31/>
8. http://intech-gmbh.ru/ball_drums/
9. https://studme.org/125163/tehnika/galtovochnoe_oborudovanie
10. Масловский В.В., Дудко П.Д. Полирование металлов и сплавов. Учеб. пособие для подготовки рабочих на производстве. – М.: Высшая школа, 1974. 255 с.
11. Синкенкес Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. 423 с.
12. https://www.chertov.org.ua/view_zadachi.php?par=2&num=43
13. http://kvant.mccme.ru/1972/09/dvizhenie_po_okruzhnosti.htm
14. <http://physics.tsu.tula.ru/abitura/olymp2001.pdf>
15. Фролов В.К., Трибрат К.О., Фасахов О.М., Перевозник К.Р. Спосіб оброблення деталей вільним абразивом в горизонтальному барабані. Патент України на корисну модель № 133313, В23В 31/00. Опубл. 25.03.2019, бюл. № 6.