

УДК 621.923.02

Скоркін А. О., Кондратюк О. Л., Пермяков О. А., Стрелець О. С.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОБРОБКИ ПОВЕРХОНЬ ЕЛАСТИЧНИМИ АБРАЗИВНИМИ ІНСТРУМЕНТАМИ

*У статті розглянуто процес взаємодії еластичного абразивного кола з оброблюваною поверхнею, для чого експериментально досліджені і математично описані жорсткість і ріжучий мікрорельєф еластичних абразивних кіл, розраховані математичні очікування кількості зерен, що знаходяться в контакті з оброблюваним матеріалом, і глибини їх контакту з оброблюваною поверхнею, розглянуті сили, що діють на оброблювану поверхню, експериментально досліджені зносостійкість еластичних абразивних кіл і температура в зоні різання.*

*Також розглянуті питання мікрогеометрії ріжучої поверхні абразивного кола, процес різання абразивним зерном, простежено питання знімання матеріалу, формування поверхневого шару після обробки абразивним кругом, закруглення гострих кромки, а також варіанти вирішення завдання щодо ефективної обробки абразивним інструментом.*

**Ключові слова:** абразив, поверхня, математична модель, мікрорельєф, шліфування

**Вступ.** Розв'язок проблеми механізації й автоматизації фінішної обробки деталей на операціях зачищення поверхонь перед гальванічними й лакофарбовими покриттями, поліпшення шорсткості поверхні, зняття задирок, скруглень гострих крайок, полірування й т.п., є досить актуальною.

Операція фінішної обробки може проводитися:

- як додатковий завершальний перехід при обробці на багатоінструментальному верстаті із програмним керуванням;
- на спеціальному роботизованому робочому місці, що включає спеціальний робот;
- на робочому місці, що складається з металообробного верстата із програмним керуванням і роботизованої зачисної установки;
- на універсальному металообробному верстаті;
- на робочому місці слюсаря з використанням електричних і пневматичних шліфмашинок.

У металообробці еластичні абразивні інструменти можуть бути використані для:

- шліфування й полірування,
- скруглення гострих крайок,
- зачищення поверхонь під пайку (зварювання),
- підготовки поверхонь під лакофарбові й гальванічні покриття,
- зачищення зварених швів,
- видалення окалини, іржі, старої фарби,
- видалення задирок й скруглення гострих крайок,
- зачищення місць склейки деталей з гуми й інших матеріалів.

На багатьох підприємствах фінішні зачисні операції виконуються вручну, тому на це витрачається до 20 % трудомісткості виготовлення деталі.

Заміна ручної праці на механізовану і автоматизовану дозволяє знизити трудомісткість, підвищити якість і продуктивність праці.

Еластичні абразивні кола й щітки мають деякі особливості, без знання яких не можна добитися високої ефективності застосування їх у виробництві. Впровадження процесів фінішної обробки пов'язане з необхідністю в кожному конкретному випадку визначати

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

оптимальні умови процесу обробки (конструкція інструмента, його характеристики, режими обробки).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для шліфування й полірування застосовуються еластичні кола, на робочій поверхні яких є ріжуча плівка, торована по клейовому шару абразивних порошків або, абразивно- клейовою сумішшю, що утворюється при змащуванні. Такі кола мають переваги перед колами, що змащуються пастою або жировими змащеннями, вони зменшують забруднення поверхні й скорочують витрати на наступне очищення деталей від залишків паст і змащень [3-4].

Нанесення й зміцнення абразивних зерен на робочу поверхню кіл проводиться за допомогою клеїв різного складу, наприклад, казеїну, рідкого скла.

Співвідношення зерна й клею береться залежно від бажаної твердості кола. Для твердих кіл використовують більше зерна, менше клею (на 6-7 вагових частин зерна 3-4 клею), для еластичних – 3-4 частини зерна на 6-7 частин клею.

До спеціальних еластичних шліфувальних кіл відноситься більша по різноманітності конструкцій група кіл із пружною основою, на периферії або торці якого кріпиться абразивна стрічка того або іншого типу. Основа кіл може виконуватися монолітною з гуми різної твердості, поліуретану, поролону, а також порожнім – у вигляді пневматичної камери того або іншого перетину. Спеціальні кола можуть виготовлятися одне- і багат шаровими залежно від застосовуваної шкірки.

При роботі еластичними абразивними колами може використовуватися універсальне устаткування.

У Японії [2] розроблена конструкція полірувального кола, у якій шліфувальна шкірка у вигляді стрічки закріплена на торці кола по спіралі. Ця конструкція забезпечує можливість виконання операцій з більшим зніманням припуску й охолодження кола за рахунок циркуляції повітря.

У США запатентований абразивний інструмент [1], який являє собою порожній валик з еластомеру, прикріплений із двох кінців до сердечника.

**Метою даної статті** є дослідження процесів обробки поверхонь і скруглення гострих крайок деталей еластичними абразивними інструментами.

**Взаємодія еластичного абразивного кола з оброблюваною поверхнею.** У процесі обробки абразивне коло своїм ріжучим профілем під дією сил, що виникають у результаті його зближення з оброблюваною поверхнею, робить знімання матеріалу й формування поверхневого шару по шорсткості, залишковим напругам, наклепу й іншим показникам.

Для вивчення взаємодії кола з поверхнею деталі необхідно знати: структуру ріжучого мікрорельєфу; сили, з якими діють абразивні зерна на поверхню; кількість зерен, що бере участь у процесі різання й глибину їх впровадження в матеріал деталі; кількість матеріалу, яку може вилучити коло за акт взаємодії.

Для визначення сили взаємодії абразивного інструмента з оброблюваною поверхнею в деяких роботах [8-9] використаний аналіз дії одиничного зерна на оброблюваний матеріал з наступним переходом на взаємодію абразивного інструмента в цілому з оброблюваною деталлю.

При русі одиничного зерна в ідеально жорсткопластичному півпросторі під кутом  $\delta$ к поверхні на нього діє сила, що виникає в результаті:

- пластичного деформування матеріалу;
- відтискування загальмованої зони й тертя її про поверхню зерна при русі нагору у вигляді стружки;
- тертя зерна по пластично-деформованому матеріалу;
- впливу динамічної складової пластичного деформування.

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для зручності розв'язку всю поверхню зерна, що перебуває у контакті із пластично деформованим матеріалом, автор розбив її на дві ділянки (сферичну і конічну) і визначив на них зазначені складові сили:

$$\begin{aligned} T &= T_D^1 + T_D^{11} + T_{zat}^1 + T_{zat}^{11} + T_{tr}^1 + T_{tr}^{11} + T_{din}^1 + T_{din}^{11} \\ P &= P_D^1 + P_D^{11} + P_{zat}^1 + P_{zat}^{11} + P_{tr}^1 + P_{tr}^{11} + P_{din}^1 + P_{din}^{11} \end{aligned} \quad (1)$$

Де  $T_D^1, P_D^1, T_{zat}^1, P_{zat}^1, T_{tr}^1, P_{tr}^1, T_{din}^1, P_{din}^1$  - тангенціальні й нормальні складові на сферичній частині зерна, що виникають при пластичному деформуванні, відтискуванні й терті в загальмованій зоні, терті зерна об матеріал, а також динамічні складові пластичного деформування;

$T_D^{11}, P_D^{11}, T_{zat}^{11}, P_{zat}^{11}, T_{tr}^{11}, P_{tr}^{11}, T_{din}^{11}, P_{din}^{11}$  - те ж на конічній частині зерен.

Знімання при абразивній обробці відбувається в процесі зіткнення абразивного зерна з деталлю й містить у собі обсяг витиснутого у вигляді стружки й зруйнованого матеріалу при багаторазовому пластичному й пружному деформуванні (полідеформування) у результаті численних ударів.

На інтенсивність знімання за рахунок полідеформування [5] впливають: обсяг пластично- і пружнодеформованого матеріалу при дії одиничного зерна, а також кількість цих впливів, що доводяться на одиницю поверхні в одиницю часу.

У результаті багаторазового пластичного деформування оброблюваний матеріал руйнується й відбувається його відділення обсягом  $\Delta Q_{пл}$ .

Обсяг матеріалу, зруйнованого одиничним зерном при його переміщенні в тангенціальному напрямку на  $\Delta x$ :

$$\Delta Q_{пл} = \frac{S_{деф} \Delta x}{n_n} \quad (2)$$

де  $S_{деф}$  - площа деформованого матеріалу;  $n_n$  - кількість циклів пластичного деформування, необхідна для руйнування матеріалу.

Обсяг пружнодеформованого матеріалу являє собою незначну величину в порівнянні з обсягами стружки й пластичного деформування [8, 9].

Знімання матеріалу з одиниці площі визначається за формулою:

$$Q = (Q_c + Q_{пл}) \times T_0 \times N_k + Q_{дон} \quad (3)$$

де  $N_k$  - кількість актів взаємодії за одиницю часу на одиниці площі оброблюваної поверхні;  $T_0$  - час обробки;  $Q_c$  - обсяг матеріалу, витиснутого у вигляді стружки за один удар, обумовлений за формулою;  $Q_{пл}$  - обсяг матеріалу, зруйнованого в результаті пластичного полідеформування, що доводиться на один удар;  $Q_{дон}$  - додатковий обсяг матеріалу при накладенні хімічного, електрохімічного, електроімпульсного й інших процесів (ця складова буде мати місце при сполучених способах обробки).

Знімання матеріалу при обробці пелюстковими колами відбувається в процесі взаємодії мікрорельєфу ріжучої поверхні з оброблюваною поверхнею деталі й містить у собі обсяг матеріалу, витиснутого абразивними зернами у вигляді стружки, і обсяг матеріалу,

зруйнованого в результаті малоциклової втоми при пластичному деформуванні матеріалу, що витискається зернами [7].

Знімання матеріалу з одиниці площі для обробки пелюстковим колом визначається за формулою:

$$g = \left( g_c + \frac{g_{\text{деф}}}{n_n} \right) \times n \times \frac{N}{k} \times T_1 \quad (4)$$

де  $g_c$  - обсяг матеріалу, витиснутого одиничною пелюсткою у вигляді стружки, обумовлений як сумарний для циклу всіх його етапів;

$g_{\text{деф}}$  - обсяг пластично деформованого матеріалу одиничною пелюсткою за цикл обробки для всіх його етапів;

$n_n$  - сумарне число циклів взаємодії, необхідне для елементарного акту руйнування в результаті малоциклової втоми.

**Взаємодія еластичного абразивного кола з оброблюваною поверхнею.** Для вивчення взаємодії еластичного абразивного кола з поверхнею оброблюваної деталі необхідно мати такі дані як:

- властивості оброблюваного матеріалу;
- характеристики й властивості еластичного інструмента (твердість, модуль пружності першого роду, коефіцієнт Пуассона й параметри ріжучого мікрорельєфу);
- показники впровадження зерен кола в оброблюваний матеріал (глибина впровадження, кількість зерен, що перебувають у контакті й радіус кривизни вершин зерен);
- сили, що діють на оброблювану поверхню.

Твердість одиничного елемента площею  $ds$  еластичного кола в  $dp$  напрямку осі  $Y$  можна представити рівнянням:

$$C_r = \frac{dP_y}{y \times dS} \quad (5)$$

де  $d$  – деформація, мм;

$P_y$  – сила, що діє по осі  $Y$ , Н.

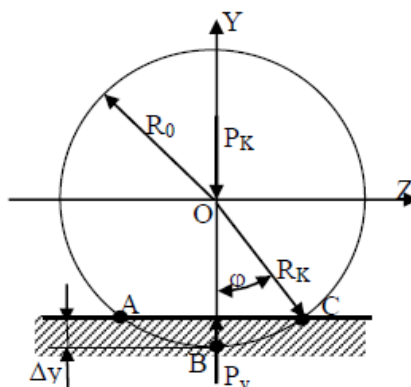


Рисунок 1 – Схема взаємодії еластичного кола із площиною

## Машинобудування і зварювальне виробництво

При експериментальному визначенні твердості на еластичне коло прикладається сила  $PK$  і вимірюється його деформація  $\Delta y$  (рис. 1). У різних крапках прямої  $AC$  деформація кола буде різною. При визначенні твердості кола доцільно знайти середньозважену деформацію.

При відомій деформації кола  $\Delta y_{\text{ук}}$  для всіх випадків контакту кола з різними поверхнями кут  $\varphi$  визначиться як:

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\Delta y_{\text{к}}}{R_{\text{к}}} \quad (6)$$

Для випадку контакту кола із площиною ( $\Delta y = \Delta y_{\text{ук}}$ ) середньозважена деформація дорівнює:

$$\Delta y_c = \frac{S}{AC} \quad (7)$$

де  $S$  – площа сегмента  $ABC$  (див. Рисунок 1):

$$S = \frac{R_{\text{к}}^2}{2} \times \left( \frac{\pi \times \varphi}{90} - \sin 2\varphi \right) \quad (8)$$

Кут  $\varphi$  тут у градусах.

$$AC = 2R_{\text{к}} \times \sin \varphi \quad (9)$$

Після підстановки виразів одержимо середньозважену деформацію кола:

$$\Delta y_c = \frac{R_{\text{к}} \times \left( \frac{\pi \times \varphi}{90} - \sin 2\varphi \right)}{4 \sin \varphi} \quad (10)$$

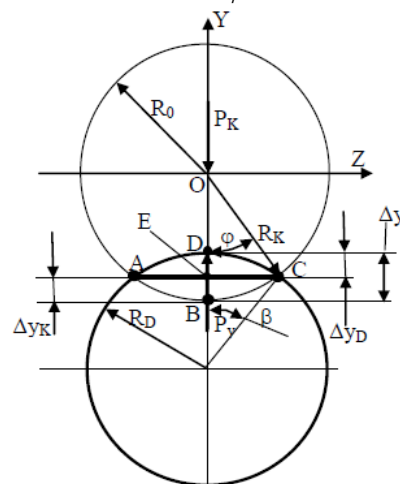


Рисунок 2 – Схема взаємодії еластичного кола із зовнішньою циліндричною поверхнею

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для випадку контакту кола з зовнішньою циліндричною поверхнею ( $\Delta y = \Delta y_{\text{лук}} + \Delta y_{\text{д}}$ ) (рис. 2) середньозважена деформація дорівнює:

$$\Delta y_c = \frac{R_k^2 \times \left( \frac{\pi \times \varphi}{90} - \sin 2\varphi \right) + R_d^2 \times \left( \frac{\pi \times \beta}{90} - \sin 2\beta \right)}{4 \times R_k \times \sin \varphi} \quad (11)$$

**Експериментальне дослідження твердості еластичних кіл** Для досліджень використовувалися еластичні абразивні кола компанії 3М (Minnesota Mining and Manufacturing Company), виготовлені з абразивного матеріалу Scotch-Brite™. Цей матеріал складається із синтетичних волокон, що утворюють тривимірне неткане полотно, по всьому обсягу якого рівномірно розподілені абразивні зерна.

Поверхневі геометричні характеристики абразивного інструмента при відомих розмірах зерен, пор і містків зв'язування можуть бути описані теоретично.

У якості методу одержання первинної інформації про рельєф робочої поверхні прийняте профілеграфування, що відрізняється від інших методів простотою й більшим обсягом одержуваної інформації.

У якості гіпотези приймемо, що досліджуваний випадковий процес підкоряється закону нормального розподілу.

Відомо, що для повного опису нормального випадкового процесу необхідно знати тільки його математичне очікування і кореляційну функцію:

$$K(\tau) = \sigma^2 \times \rho(\tau) \quad (12)$$

де  $\sigma$  - середнє квадратичне відхилення випадкового процесу;

$\rho(\tau)$  - нормована кореляційна функція;

$\tau$  - відстань між крапками профілю.

Для мікрорельєфу поверхні математичне очікування процесу дорівнює нулю. Отже, завдання опису зводиться до вивчення апроксимації кореляційної функції.

$$E(n(0)) = \frac{1}{\pi} \times \left( -p^{(2)}(0) \right)^{1/2} \quad (13)$$

На рис. 3 наведені світлини зліпків ріжучого мікрорельєфу, а на рис. 4 – профілограми ріжучої поверхні еластичних абразивних кіл.

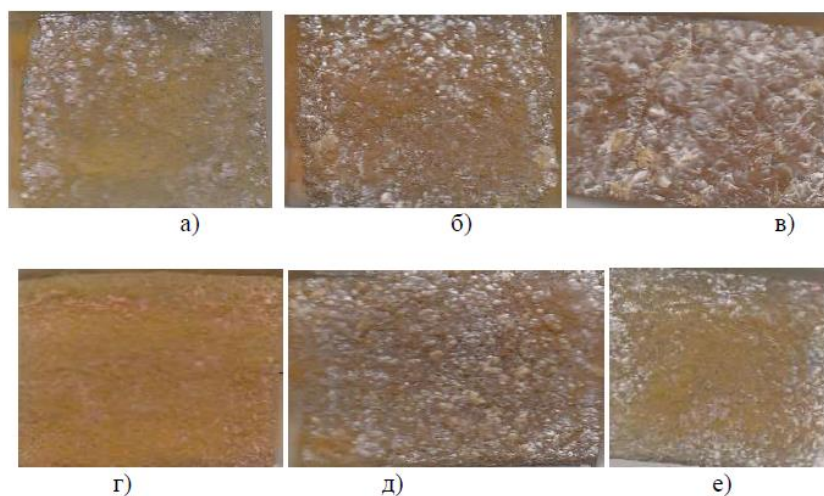


Рисунок 3 – Зліпки, що відбивають мікрорельєф еластичних абразивних кіл

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>

## Машинобудування і зварювальне виробництво

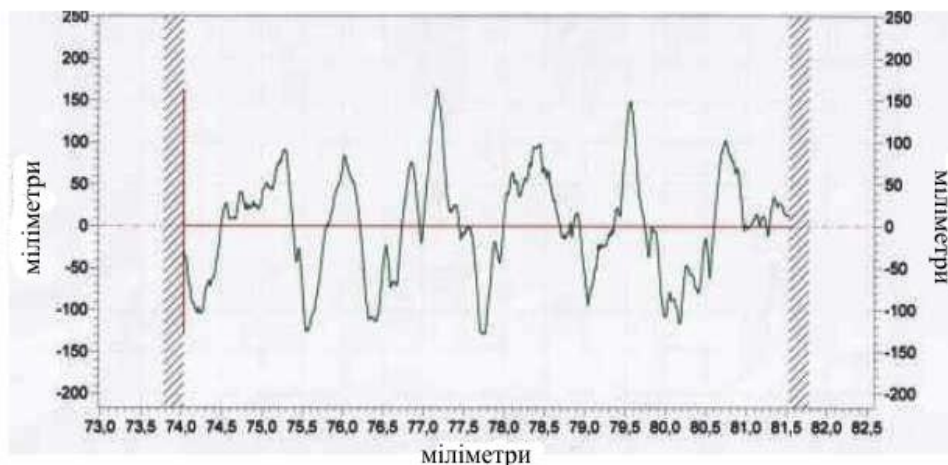


Рисунок 4 – Профілограма ріжучої поверхні еластичного абразивного кола

### ВИСНОВКИ

Обґрунтовано, що в якості методу отримання первинної інформації про мікрорельєф робочої поверхні еластичного абразивного круга слід прийняти профілографування. Розроблено теоретичні положення взаємодії ріжучого мікрорельєфу еластичного абразивного інструменту, з оброблюваною поверхнею на підставі теорії випадкових процесів. Визначено сили взаємодії еластичного абразивного кола з оброблюваною поверхнею.

#### Перелік використаних джерел:

1. Пат. 6152814 США, МПК<sup>7</sup> В 24 D 11/00. Эластичный абразивный инструмент = Elastic abrasive belt for use with inflatable tool / *Amarosova R. P., Amarosova P. J.* – № 09/398159; заявл. 16.09.1999; опубл. 28.11.2000.
2. Заявка 59-24966. Япония, МКИ В 24 Д 13/14 / Мураками Масаюки. – Опубл. 08.06.84. – Изобретения стран мира. – 1985. – Бюл. № 12.
3. *Кризберг, Ю. Я.* Определение кривизны вершин микронеровностей шероховатых поверхностей / *Ю. Я. Кризберг, Я. А. Рудзит* // Микрогеометрия и эксплуатационные свойства машин. – Рига, 1979. – Вып. 7. – С. 79–87.
4. *Кузнецов, В. Д.* Влияние смазок на процесс царапания металлом / *В. Д. Кузнецов, А. И. Лоскутов, Ю. И. Коган* // Известия вузов. Физика. – 1957. – № 1. – С. 32–35.
5. *Кулаков, Ю. М.* Отделочно-зачистная обработка деталей / *Ю. М. Кулаков, В. А. Хрульков.* – М. : Машиностроение, 1979. – 216 с.
6. *Лукьянов, В. С.* Параметры шероховатости поверхности / *В. С. Лукьянов, Я. А. Рудзит.* – М. : Изд-во стандартов, 1979. – 162 с.
7. *Маслов, Е. Н.* Теория шлифования материалов / *Е. Н. Маслов.* – М. : Машиностроение, 1974. – 319 с.
8. *Мартынов, А. Н.* Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами / *А. Н. Мартынов.* – Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1981. – 212 с.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

9. Николаенко, А. А. Моделирование сил резания при шлифовании с учетом характеристик круга / А. А. Николаенко // Прогрессивные технологии в машиностроении : темат. сб. науч. тр. / Юж.-Урал. гос. ун-т. – Челябинск, 2003. – С. 50–53.

Скоркин А. О., Кондратиук О. Л., Пермяков А. А., Стрелец А. С.

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЭЛАСТИЧНЫМИ АБРАЗИВНЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

*В статье рассмотрен процесс взаимодействия эластичного абразивного круга с обрабатываемой поверхностью, для чего экспериментально исследованы и математически описаны жесткость и режущий микрорельеф эластичных абразивных кругов, рассчитаны математические ожидания количества зерен, находящихся в контакте с обрабатываемым материалом, и глубины их контакта с обрабатываемой поверхностью, рассмотрены силы, действующие на обрабатываемую поверхность, экспериментально исследованы износостойкость эластичных абразивных кругов и температура в зоне резания.*

*Также рассмотрены вопросы микрогеометрии режущей поверхности абразивного круга, процесс резки абразивным зерном, прослежен вопрос съема материала, формирования поверхностного слоя после обработки абразивным кругом, закругления острых кромок, а также варианты решения задачи по эффективной обработке абразивным инструментом.*

**Ключевые слова:** абразив, поверхность, математическая модель, микрорельеф, шлифовка

Skorkin A. O., Kondratiuk O. L. Permyakov A. A., Strelets A. S.

### SURFACE TREATMENT PROCESSES INVESTIGATION BY ELASTIC ABRASIVE TOOLS

*The article discusses the process of interaction of an elastic abrasive wheel with the surface being treated, for which the stiffness and cutting micro-relief of elastic abrasive wheels are experimentally investigated and mathematically described, the mathematical expectations for the number of grains in contact with the treated. The material and the depth of their contact with the machined surface are considered to be the forces acting on the machined surface, the wear resistance of elastic abrasive wheels and the temperature in the cutting zone were experimentally investigated. Microgeometry issues of the cutting surface of an abrasive disc, the process of cutting with an abrasive grain, and also the question of removing material, forming the surface layer after processing with an abrasive disc, rounding out sharp edges, as well as options for solving the problem of efficient processing with an abrasive tool.*

*In the article, the parameters of material removal and roughness of the treated surface during surface cleaning are calculated. The results of experimental studies of material removal and surface roughness in the processing of parts with elastic abrasive wheels are presented. The experimental data are compared with the data obtained from the calculations. The microrelief of the cutting part of the elastic abrasive wheel and its interaction with the treated surface (in turn, which has its own microrelief) were investigated, as a result of which the material is removed and the surface roughness is formed. For experimental studies of the stiffness of elastic wheels, (Minnesota Mining and Manufacturing Company) elastic abrasive wheels made of Scotch-Brite™ abrasive material were used. This material consists of synthetic fibers forming a three-dimensional non-woven fabric, throughout the volume of which the abrasive grains are evenly distributed. It has*

Режим доступу: <http://sap.pstu.edu>



*been substantiated that profilographing should be adopted as a method for obtaining primary information about the microrelief of the working surface of an elastic abrasive wheel. Theoretical positions of the interaction of the cutting microrelief of an elastic abrasive tool with the surface to be processed were developed on the basis of the theory of random processes with the determination of the force of interaction of an elastic abrasive wheel with the surface being processed.*

**Keywords:** *abrasive, surface, mathematical model, microrelief, grinding.*

Рецензент: проф., д-р техн. наук Ищенко А. А.

Статья поступила 11.01.2019 г.

УДК 531.66:621.771.06

Карпенко Т. Н., Музыка И. Н., Рассохин Д. А., Лях А. Д.

## К ВОПРОСУ О НЕСИММЕТРИЧНОМ УДАРЕ ПО РОЛИКУ РАБОЧЕГО РОЛЬГАНГА ПРОКАТНОГО СТАНА

*Рассматривается актуальный для прокатного производства, вопрос о перераспределении давлений на подшипниковые опоры станинного ролика рабочего рольганга прокатного стана при расположении транспортируемого сляба ближе к одной из опор. Имея геометрические параметры сляба и ролика, а также усилия прокатки и вес консольной части сляба после его выхода из прокатных валков, формулируется задача о распределении ударных импульсов и о величине импульса, приходящего на один диск ролика. Применяв теорему об изменении количества движения ролика за время удара, в случае несимметричного удара по нескольким из десяти дисков ролика, получены формулы для определения реактивных импульсов, возникающих в опорах. Для практического использования полученных результатов введены коэффициенты неравномерности распределения давлений на подшипники:  $\mu_1$  равен отношению большего реактивного импульса к меньшему;  $\mu_2$  равен отношению большего импульса к импульсу при несимметричном, относительно опор, ударе. Проведены численные анализы задачи в случае сдвига слябов трех размеров, применяемых на прокатном стане 3000, вправо. Коэффициенты равны: в случае широкого сляба  $\mu_1 = 1,8$ ,  $\mu_2 = 1,28$ ; в случае среднего  $\mu_1 = 2,24$ ,  $\mu_2 = 1,38$ ; в случае узкого  $\mu_1 = 2,83$ ,  $\mu_2 = 1,47$ . Эти коэффициенты могут быть использованы для формулировки обоснованных запасов прочности при проектировании подшипниковых узлов других вращающихся тел при несимметричном расположении сил удара. Примененная в статье методика определения реактивных импульсов в подшипниковых опорах может быть применена для вращающегося твердого тела при действии на него нескольких сил удара, расположенных несимметрично относительно опор.*

**Ключевые слова:** *ударный импульс, теоремы импульсов, подшипниковая опора, ролик рольганга.*

### Постановка проблемы.

Традиционно расчет долговечности нагруженных подшипников в опорах роликов рабочего рольганга прокатных станом выполняют исходя из симметричного, относительно опор расположения, транспортируемого сляба. Однако, как показывает практика, чаще выходит из строя подшипник одной из опор, в частности, из-за несимметричной ударной нагрузки при сдвиге сляба ближе к одной опоре. Чтобы избежать необоснованно