

© П. О. Киричок, д.т.н., професор, Р. Л. Тріщук, асистент,
О. В. Рибак, асистент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

**РОЗРАХУНКИ ВІДНОСНОЇ ОПОРНОЇ ПЛОЩІ
ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ
ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ
ПРИ КОМБІНОВАНОМУ ЗМІЦНЕННІ
ВІБРООБКАТУВАННЯМ**

Експериментальні дослідження зі зміцнення поверхні сталевих валів поліграфічного обладнання дозволили нам встановити залежності геометричних параметрів мікрорельєфу поверхні від технологічних параметрів процесу віброобкатування. Запропоновано комплексний двоетапний процес оздоблювально-зміцнювальної обробки, що складається з двох послідовних операцій формування мікрорельєфу способами вібраційного обкатування.

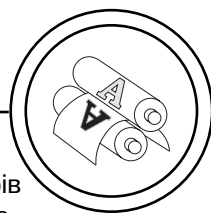
Шляхом проведення розрахунків виведено формулу відносної опорної площі поверхонь, що зміцнюються. Встановлено аналітичну залежність між геометричними параметрами елементів мікрорельєфу, радіусом сфери деформувального елемента та відносною опорною площею поверхні після комбінованої двоетапної зміцнювальної обробки пластичним деформуванням. Це дозволяє регулюванням параметрів прогнозовано впливати на якість поверхонь залежно від їх експлуатаційних властивостей.

Ключові слова: оздоблювально-зміцнювальна обробка; мікрорельєф; пластичне деформування; вібраційне обкатування; відносна опорна площа поверхні.

Постановка проблеми

Задля підвищення якісних характеристик поліграфічної продукції та у зв'язку зі збільшенням навантажень на вузли та деталі поліграфічного обладнання, що обумовлені зростанням швидкостей руху виконавчих механізмів, значно зростають вимоги до експлуатаційних властивостей деталей та відповідно до якісних показників їх поверхні та приповерхневих шарів. Нами були

проаналізовані зміцнювальні технології для деталей і доцільність застосування певних методів їх обробки [1]. Основними відомими зміцнювальними методами для металевих поверхонь деталей циліндричної форми є: поверхневе зміцнення пластичним деформуванням (вібраційне пластичне деформування надтвердими інструментами, вигладжування, обкатування та розкатування, дорнування, дробоструменева об-



робка, карбування, електромеханічна пластична обробка), криогенні та термічні методи (криогенні методи зміцнення, термообробка деталей, термічне зміцнення), фізичні (наплавлення, лазерне зміцнення) і фізико-хімічні методи (електроіскрова обробка, іонно-плазмова обробка, електрохімічні методи, хімічний осад з розчинів) і хіміко-термічне зміцнення (азотування, борування, цементація, нітроцементация, насичення складними сполуками кремнію, сірки, цинку, алюмінію) [2].

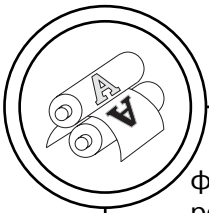
З урахуванням специфіки поліграфічного обладнання запропоновано комплексний процес оздоблювально-зміцнювальної обробки, що складається з двох послідовних операцій формування мікрорельєфу способом віброобкатування. Для додаткового підвищення мікротвердості та корозійної стійкості валів запропоновано третій етап обробки — модифікацію поверхні шляхом іонного азотування в плазмі геліконного розряду. Перший етап обробки передбачає утворення на поверхні валів повністю регулярного мікрорельєфу (ПРМР) гексагонального типу, що, згідно з ГОСТ 24773–81 належить до класу — з елементами ввігнутої форми; до групи — новий мікрорельєф; до виду — сітчастий, до типу — шестикутний [3]. Другий етап передбачає утворення на циліндричній поверхні валу з повністю регулярним мікрорельєфом частково регулярного мікрорельєфу у вигляді прямих заглибин. Застосування другого етапу зміцнення зумовлене необхідністю забезпечення точності подання вихідного матеріалу, що проходить між валами поліграфічного обладнання.

Одним з основних параметрів ПРМР, який впливає на зносостійкість та інші експлуатаційні властивості поверхонь, є відносна опорна площа поверхні, що її займають регулярні нерівності. Відносна опорна площа — це відношення площі регулярних нерівностей (отриманих у результаті перших двох етапів обробки) до площі поверхні деталі, яка оброблюється. Визначення залежності відносної опорної площі поверхні від геометричних параметрів елементів мікрорельєфу та радіуса сфери деформувального елемента дозволить отримувати поверхню з прогнозованими фізико-механічними властивостями.

Аналіз попередніх досліджень

Під час роботи деталей машин і механізмів в умовах тертя ковзання (в нашому випадку це пари тертя у вигляді циліндричних валів транспортувального механізму лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном) найбільш інформативним параметром є відносна площа, яку займають регулярні нерівності, утворені в результаті комплексної двоетапної зміцнювальної обробки пластичним деформуванням. Запропонований третій етап обробки (модифікація поверхні іонним азотуванням) приводить до структурних змін у приповерхневих шарах, причому мікрогеометрія поверхні залишається незмінною [4].

У наукових працях В. А. Горохова, Є. В. Рижова, Ю. Г. Шнейдера встановлено аналітичні залежності між параметрами регулярно-го мікрорельєфу й технологічними



факторами [5–7], але для розробленого нами технологічного процесу [8] виникає необхідність встановлення залежності відносної опорної площі циліндричних поверхонь валів від технологічних параметрів процесу обробки, з урахуванням специфіки запропонованої технології.

Мета роботи

Встановлення аналітичної залежності між режимами обробки (геометричними параметрами елементів мікрорельєфу та радіуса сфери деформувального елемента) та відносною опорною площею поверхні, що дозволяє завдяки регулюванню параметрів прогнозовано впливати на якість поверхонь залежно від їх експлуатаційних властивостей.

Результати проведених досліджень

Обробка циліндричної поверхні валу, на відміну від відомих традиційних процесів віброобкатування, здійснюється у два етапи.

Перший етап обробки передбачає утворення на поверхні валу повністю регулярного мікро-

рельєфу (ПРМР) гексагонального типу з такими параметрами технологічного процесу:

— радіус сфери індентора (деформувального інструмента) $R = 3,0\text{--}4,0$ мм;

— зусилля при вдавлюванні $P = 100\text{--}500$ Н;

— ексцентриситет інструмента $e = 0,2\text{--}1,0$ мм;

— частота обертання шпинделя $n_{\text{шп}} = 20\text{--}2000$ об./хв;

— частота осциляцій деформувального інструмента $n_{\text{подв.х}} = 1000\text{--}2000$ подв.х./хв;

— подача інструмента $S = 0,08\text{--}15,5$ мм/об.

Складний рух індентора відносно поверхні, що обробляється, та контактування з різних боків з кожним виступом мікронерівностей вихідної поверхні приводить до утворення ПРМР (рис. 1) гексагонального типу ввігнутої форми. При цьому метал піддається пластичному деформуванню в різних напрямках.

Такий підхід дає змогу зменшити опір деформуванню та збільшити інтенсивність пластичної деформації, а це дозволяє створювати оптимальний мікрорельєф під час обробки деталей і без

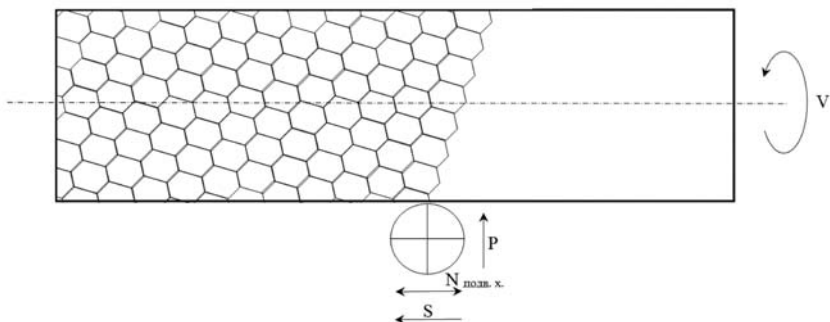
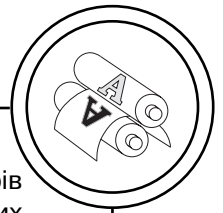


Рис. 1. Спосіб утворення постійного регулярного мікрорельєфу



значної загальної деформації досягати істотного зміцнення поверхні заготовки.

Другий етап зміцнювальної обробки полягає в тому, що на поверхні валу з ПРМР утворюють частково регулярний мікрорельєф, який займає площу не менше 30 % від загальної площі поверхні валу та має вигляд прямих заглибин, які розташовані паралельно до осі валу на відстані одна від одної не менше $2b$, глибиною $h = 0,006-0,009$ мм, шириною $b = 0,35-0,5$ мм і мають висоту напливів $0,0017-0,0040$ мм. Зусилля вдавлювання індентора $P = 150-550$ Н, радіус сфери індентора $R = 1,5-2,5$ мм (рис. 2).

Після другого етапу обробки утворені у вигляді прямих заглибин ділянки згладжують мікрорельєф гексагонального типу завдяки повторному прикладанню зусилля деформування. На поверхні утворюється новий мікрорельєф, геометричні параметри якого (висота, форма, розташування мікронерівностей) визначаються не тільки величиною зусилля, а й радіусом сфери індентора, швидкістю, подачею, числом осциляцій та амплітудою коливання інструмента. Залеж-

ність геометричних параметрів мікрорельєфу від вищевказаних параметрів технологічного процесу встановлено експериментально та буде наведено в окремій статті.

Третій перехід комплексної зміцнювальної обробки передбачає додаткове підвищення мікротвердості приповерхневих шарів деталей шляхом модифікації їх поверхонь іонним азотуванням у геліконному розряді. Цей інноваційний метод досліджувався нами вперше та має значні переваги над відомими нині методами азотування (енергоєфективність [9], швидкість технологічного процесу та ін.) [10].

Перейдемо до розрахунку відносної опорної площі нерівностей, отриманих після двох етапів обробки, та їх залежності від геометричних параметрів одиниці площі отриманого мікрорельєфу (базового елемента) з урахуванням радіуса сфери деформувального елемента.

Для початку обчислимо площу базового елемента, який має форму правильного шестикутника при вигляді зверху. Його отримано в результаті вдавлювання

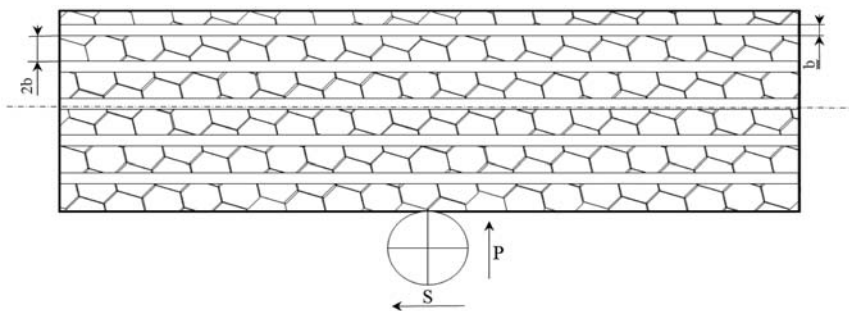


Рис. 2. Спосіб утворення частково регулярного мікрорельєфу на поверхні з постійним регулярним мікрорельєфом

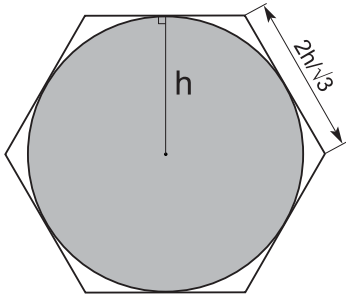
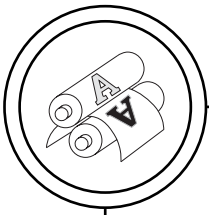


Рис. 3. Вигляд зверху на базовий елемент поверхні ПРМР гексагонального типу

в поверхню деталі заготовки сферичного індентора радіусом R (рис. 3, 4).

Нехай шестикутник має висоту h (у нашому випадку висота — це відстань від його центру до сторони). Відповідно, довжина сторони дорівнює $\frac{2h}{\sqrt{3}}$.

Окремо розрахуємо площу заштрихованої області — заглибини базового елемента без урахування рівнів перетину поверхні з РМР. Як відомо, площа цієї заглибини дорівнює $2\pi RH$, де H — висота заглибини. У нашому випадку

$$H = R - \sqrt{R^2 - h^2},$$

тому

$$S_{\text{зар.}} = 2\pi R \left(R - \sqrt{R^2 - h^2} \right).$$

Залишилось обчислити площу незаштрихованої області (площу рівнів перетину поверхні з ПРМР). Ця зона (позначимо її P) складається з 12 криволінійних трикутників, один з яких заштрихований на рис. 3. Тому завдання зводиться до пошуку площі цього трикутника.

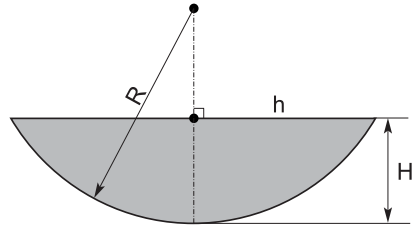


Рис. 4. Вигляд спереду на заглибину базового елемента поверхні ПРМР

Введемо кути α та β , як показано на рис. 5 та рис. 6. При невеликих змінах цих кутів на $d\alpha$ і $d\beta$ покривається прямокутник зі сторонами $(R\sin\beta - d\alpha)$ і $Rd\beta$.

Тому

$$S_p = 12 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \int_{\beta_2(\alpha)}^{\beta_1(\alpha)} R^2 \sin\beta d\beta d\alpha.$$

Межі інтегрування для α змінюються від 0 до $\pi/6$, а для β — від $\beta_1(\alpha)$ до $\beta_2(\alpha)$ (рис. 5).

Зауважимо, що

$$\beta_1(\alpha) = \arcsin\left(\frac{h}{R}\right)$$

та

$$\begin{aligned} \beta_2(\alpha) &= \arcsin\left(\frac{OA_\alpha}{R}\right) = \\ &= \arcsin\left(\frac{h}{R \cos\alpha}\right), \end{aligned}$$

тобто

$$\beta_2(\alpha) = \arcsin\left(\frac{h}{R \cos\alpha}\right).$$

Таким чином, площа рівнів перетину поверхні з РМР (позначимо її S_p .) дорівнює:

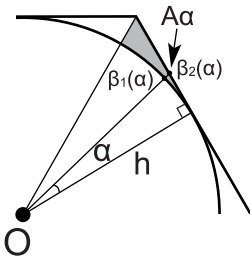
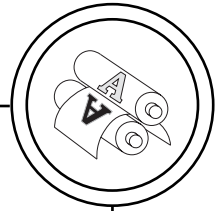


Рис. 5. Вигляд зверху на рівні перетину поверхні з ПРМР

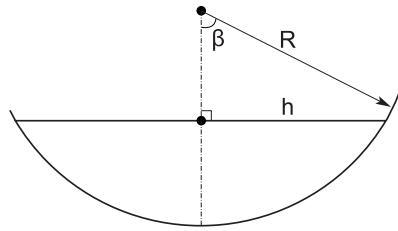


Рис. 6. Вигляд спереду на заглибину базового елемента та рівні перетину поверхні з ПРМР

$$\begin{aligned}
 S_n &= 12 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \int_{\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)}^{\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)} R^2 \sin\beta d\beta d\alpha = \\
 &= 12R^2 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(-\cos\beta \Big|_{\beta=\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)}^{\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)} \right) d\alpha = \\
 &= 12R^2 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\cos\left(\arcsin\left(\frac{h}{R}\right)\right) - \cos\left(\arcsin\left(\frac{h}{R\cos\alpha}\right)\right) \right) d\alpha.
 \end{aligned}$$

Зауважимо, що $\cos x = \sqrt{1 - \sin^2 x}$

(для $x \in \left[0; \frac{\pi}{2}\right]$), тому

$$\begin{aligned}
 \cos(\arcsin x) &= \\
 &= \sqrt{1 - \sin^2(\arcsin x)} = \\
 &= \sqrt{1 - x^2}
 \end{aligned}$$

Таким чином,

$$\begin{aligned}
 S_n &= 12R^2 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}} \right) d\alpha = \\
 &= 12R^2 \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}}}{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}}} \right) d\alpha.
 \end{aligned}$$

Перетворимо вираз під інтегралом:

$$\begin{aligned}
 1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}}}{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}}} &= 1 - \frac{\sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - h^2}}{\sqrt{R^2 - h^2}} = \\
 &= 1 - \frac{\sqrt{(R^2 \cos^2 \alpha - h^2) - R^2}}{(R^2 - h^2) R^2 \cos^2 \alpha} = \\
 &= 1 - \frac{\sqrt{R^2 \cos^2 \alpha - h^2}}{\sqrt{(R^2 - h^2) \cos^2 \alpha}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{h^2 (1 - \cos^2 \alpha)}{(R^2 - h^2) \cos^2 \alpha}} = \\
 &= 1 - \sqrt{1 - \frac{h^2 \sin^2 \alpha}{(R^2 - h^2) \cos^2 \alpha}} = 1 - \sqrt{1 - \frac{h^2 \tan^2 \alpha}{R^2 - h^2}}
 \end{aligned}$$

Тобто:

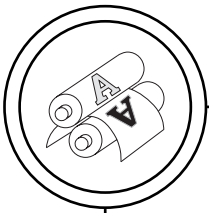
$$\begin{aligned}
 S_n &= 12R^2 \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}} \right) d\alpha = \\
 &= 12R^2 \sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(1 - \frac{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2 \cos^2 \alpha}}}{\sqrt{1 - \frac{h^2}{R^2}}} \right) d\alpha.
 \end{aligned}$$

Цей інтеграл не обчислюється в елементарних функціях, тому обчислимо його наближено.

Для цього застосуємо формулу:

$$\sqrt{1 - z} \approx 1 - \frac{z}{2}, \text{ придатну для } |z| \ll 1.$$

Маємо:



$$\begin{aligned}
 S_{n_1} &\approx 12R^2 \frac{\sqrt{R^2 - h^2}}{R} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{h^2}{2(R^2 - h^2)} \operatorname{tg}^2 \alpha d\alpha = \\
 &= 6R\sqrt{R^2 - h^2} \cdot \frac{h^2}{R^2 - h^2} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \operatorname{tg}^2 \alpha d\alpha = \\
 &= \frac{6Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} \int_0^{\frac{\pi}{6}} \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha} - 1 \right) d\alpha = \\
 &= \frac{6Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} (\operatorname{tg} \alpha - \alpha) \Big|_{\alpha=0}^{\frac{\pi}{6}} = \\
 &= \frac{6Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{\pi}{6} \right) = \\
 &= \frac{Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} (2\sqrt{3} - \pi).
 \end{aligned}$$

Повна площа:

$$\begin{aligned}
 S_a &= S_{\text{зарл.}} + S_{n_1} \approx 2\pi R(R - \sqrt{R^2 - h^2}) + \\
 &+ \frac{Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}} (2\sqrt{3} - \pi).
 \end{aligned}$$

Обчислимо відносну опорну площу (площу рельєфної поверхні, поділену на площу плоскої):

$$\begin{aligned}
 \rho_1 &= \frac{S_a}{S_{\text{шестиступінки}}} \approx \\
 &\approx \frac{2\pi R(R - \sqrt{R^2 - h^2}) + \frac{Rh^2(2\sqrt{3} - \pi)}{\sqrt{R^2 - h^2}}}{3h \cdot \frac{2h}{\sqrt{3}}} = \\
 &= \frac{2\pi R \frac{R^2 - (R^2 - h^2)}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + (2\sqrt{3} - \pi) \frac{Rh^2}{\sqrt{R^2 - h^2}}}{2\sqrt{3}h^2} = \\
 &= \frac{\pi}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + \left(1 - \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \right) \frac{R}{\sqrt{R^2 - h^2}}.
 \end{aligned}$$

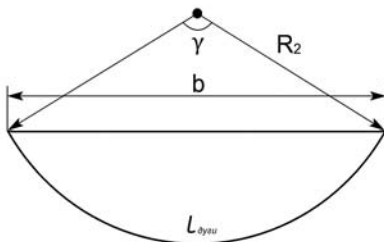


Рис. 7. Вид зсередини на поздовжню заглибину, утворену на другому етапі обробки

Далі обчислимо відносну площу поздовжньої заглибини шириною b , продавлену індентором, що має радіус деформувально-го елемента R_2 (рис. 7).

Де

$$\begin{aligned}
 \rho_2 &= \frac{l_{\text{дуги}}}{b} = \frac{R_2 \gamma}{b} = \\
 &= \frac{R_2 \cdot 2\arcsin\left(\frac{b}{2R_2}\right)}{b}.
 \end{aligned}$$

Маємо:

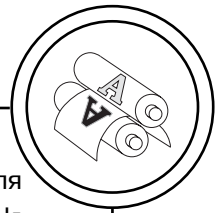
$$\rho_2 = \frac{2R_2}{b} \arcsin\left(\frac{b}{2R_2}\right).$$

Площа ПРМР гексагонального типу займає 2/3 від загальної площі, а мікрорельєф, нанесений у вигляді поздовжніх заглиблень, — 1/3 площі. Тому загальна відносна опорна площа:

$$\begin{aligned}
 \rho &= \frac{2}{3} \rho_1 + \frac{1}{3} \rho_2 \approx \frac{2\pi}{3\sqrt{3}} \cdot \\
 &\cdot \frac{R}{R + \sqrt{R^2 - h^2}} + \left(\frac{2}{3} - \frac{\pi}{3\sqrt{3}} \right) \cdot \\
 &\cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 - h^2}} + \frac{2R_2}{3b} \arcsin\left(\frac{b}{2R_2}\right).
 \end{aligned}$$

Висновки

Експериментально встановлено, що комплексна двоетапна оздоблювально-зміцнювальна обробка сприяє збільшенню зносостійкості валів, які працюють в умовах тертя, на 45–55 % порівняно з необробленими поверхнями. Також виявлено можливість покращення властивостей приповерхневих шарів після комплексної оздоблювально-зміцнювальної обробки завдяки підвищенню їх мікротвердості методом іон-



но-плазмового азотування в геліконному розряді без зміни мікрогеометрії поверхні.

Встановлено аналітичну залежність між геометричними параметрами елементів мікрорельєфу, радіусом сфери деформувального елемента та відносною

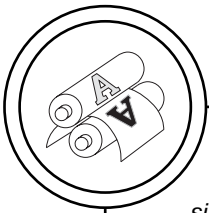
опорною площею поверхні після комбінованої двоетапної зміцнювальної обробки пластичним деформуванням. Це дозволяє регулюванням параметрів прогнозовано впливати на якість поверхонь залежно від їх експлуатаційних властивостей.

Список використаної літератури

1. Киричок П. О. Зміцнення поверхонь металевих деталей / П. О. Киричок, В. Г. Олійник, Т. Ю. Киричок. Київ: Преса України. 2004. 240 с.
2. Ляшенко Б. А. Тенденции развития упрочняющей поверхностной обработки и положение в Украине / Б. А. Ляшенко, С. А. Клименко // Сучасне машинобудування. 1999. № 1(1). С. 94–104.
3. ГОСТ 24773-81 Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики.
4. Тріщук Р. Л. Підвищення зносостійкості деталей поліграфічного обладнання шляхом модифікації їх поверхонь методом іонно-плазмового азотування / Р. Л. Тріщук // Технологія і техніка друкарства. 2018. № 1(59). С. 48–59. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(59\).2018.135134](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(59).2018.135134).
5. Шнейдер Ю. Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом / Ю. Г. Шнейдер. Л.: Машиностроение, 1982. 248 с.
6. Фельдман Я. С. Расчет параметров микрорельефа цилиндрических вибронакатанных поверхностей деталей машин и приборов и их технологическое обеспечение / Под ред. Ю. Г. Шнейдера. Л.: ЛИТМО. 1979. 97 с.
7. Рыжов Э. В. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин / Э. В. Рыжов, А. Д. Суслов, В. П. Федоров. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
8. Пат. 129043 Україна, МПК (2006) B24B 39/00. Спосіб утворення регулярного микрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин / П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, Р. Л. Тріщук; заявник і власник НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». № u 2018 00825; заявл. 30.01.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 6 с.
9. Ogórek M. Wpływ wybranych elementów organizacji produkcji na efektywność ekonomiczną procesu azotowania / M. Ogórek, Z. Skuza, T. Frączek // Logistyka. 2015. № 6. С. 351–356, CD.
10. Руденко Е. Зміцнення поверхні сталі 45 йонним азотуванням у геліконному розряді / Е. Руденко, В. Панарін, П. Киричок, М. Свавільний, І. Короташ, Д. Полоцький, Р. Тріщук // Металлофизика и новейшие технологии. 2018. Т. 40. № 8. С. 1101–1112. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.08.0919>.

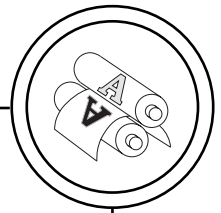
References

1. Kyrychok, P. O. & Oliinyk, V. H. & Kyrychok, T. Iu. (2004). *Zmitsnennia poverkhon metalevykh detalei*. Kyiv: Presa Ukrainy, 240 p. [in Ukrainian].
2. Lyashenko, B. A. & Klimentko, S. A. (1999). Tendentsii razvitiya uprochnyayushchey poverhnostnoy obrabotki i polozhenie v Ukraine. *Journal of Suchasne mashinobuduvannia*, 1, 94–104 [in Ukrainian].



3. GOST 24773-81 *Poverkhnosti s regulyarnym mikrorel'efom. Klassifikatsiya, parametry i kharakteristiki* [in Russian].
4. Trishchuk, R. L. (2018). Pidvyshchennia znosostiikosti detalei polihrafichnogo obladnannia shliakhom modyfikatsii yikh poverkhon metodom ionno-plazmovoho azotuvannia. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, (1 (59), 48–59. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.1\(59\).2018.135134](https://doi.org/10.20535/2077-7264.1(59).2018.135134) [in Ukrainian].
5. Shneyder, Yu. G. (1982). *Ekspluatatsionnye svoystva detaley s regulyarnym mikrorel'efom*. Leningrad: Mashinostroenie, 248 p. [in Russian].
6. Fel'dman, Ya. S. (1979). *Raschet parametrov mikrorel'efa tsilindricheskikh vibronakatannykh poverkhnostey detaley mashin i priborov i ikh tekhnologicheskoe obespechenie*. Leningrad: LITMO, 97 p. [in Russian].
7. Ryzhov, E. V. & Suslov, A. D. & Fedorov, V. P. (1979). *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley mashin*. Moscow: Mashinostroenie, 176 p. [in Russian].
8. Pat. 129043 Ukraine, MPK (2006). B24B 39/00. *Sposib utvorennia rehu-liarnoho mikroreliefu na poverkhniakh tsylindrychnykh detalei polihrafichnykh mashyn*. P. O. Kyrychok, Iu. Iu. Vitsiuk, R. L. Trishchuk № u 2018 00825; Publish 25.10.2018 [in Ukrainian].
9. Ogórek, M. & Skuza, Z. & Frączek, T. (2015). Wpływ wybranych elementów organizacji produkcji na efektywność ekonomiczną procesu azotowania. *Journal of Logistyka*, (6), 351–356 [in Poland].
10. Rudenko, E. M. & Panarin, V. Ye. & Kyrychok, P. O. & Svavilnyi, M. Ye. & Korotash, I. V. & Polotskyi, D. Yu. & Trishchuk, R. L. (2018). Zmitsnennia poverkhni stali 45 yonnym azotuvanniam u helikonnomu rozriadi. *Journal of Metallofizika i noveyshie tekhnologii*, 40, No. 8, 919–930. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.40.08.0919> [in Ukrainian].

Экспериментальные исследования по упрочнению поверхности стальных валов полиграфического оборудования позволили нам установить зависимости геометрических параметров микрорельефа поверхности от технологических параметров процесса виброобкатывания. Предложен комплексный двухэтапный процесс отделочно-упрочняющей обработки, состоящий из двух последовательных операций формирования микрорельефа способами вибрационного обкатывания. Путем проведения расчетов выведено формулу относительной опорной площади упрочняемой поверхности и установлено аналитическую зависимость между геометрическими параметрами элементов микрорельефа, радиусом сферы деформирующего элемента и относительной опорной площадью поверхности после комбинированной двухэтапной упрочняющей обработки пластическим деформированием, что позволяет путем регулирования параметров прогнозируемо влиять на качество поверхностей в зависимости от их эксплуатационных свойств.



Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка; микрорельеф; пластическое деформирование; вибрационное обкатывание; относительная опорная площадь поверхности.

Experimental researches on strengthening the surface of the steel shafts of printing equipment allowed us to establish the dependence of the geometric parameters of the microrelief of the surface on the technological parameters of the vibration process. The complex two-stage process of strengthening finishing, consisting of two consecutive operations of formation of a microrelief by a method of vibro-rolling, is offered.

We have established analytical dependence between the geometric parameters of elements of a microrelief, the radius of the sphere of the deforming element and the relative reference surface of the surface after the combined two-stage hardening processing with plastic deformation. This allows, through the regulation of parameters, to predict the effect on the quality of the surfaces, depending on their operational properties.

Keywords: finishing-strengthening treatment; microrelief; plastic deformation; vibration rollin; relative bearing surface area.

Рецензент — В. Б. Струтинський, д.т.н.,
професор, КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції 06.11.18