

© П. О. Киричок, д-р техн. наук, проф., Р. Л. Трищук, асист.,
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ДВОЕТАПНОЇ ОЗО ЦИЛІНДРИЧНИХ ВАЛІВ ПОЛІГРАФІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Проведено аналіз напружено-деформованого стану двоетапного процесу оздоблювально-зміцнювальної обробки (ОЗО) поверхонь валів транспортувально-координувального вузла лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном. Розроблено кінцево-елементну модель двоетапного процесу ОЗО валів транспортувально-координувального вузла лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном.

Ключові слова: оздоблювально-зміцнювальна обробка; мікрорельєф; пластичне деформування; напружено-деформований стан; комплексне зміцнення.

Постановка проблеми

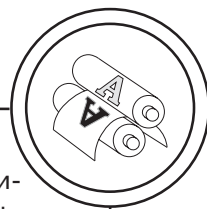
Ресурс деталей машин та механізмів визначається станом поверхні і поверхневого шару, який формується в процесі фінішних операцій технологічного процесу. Стан поверхні деталі в переважній більшості впливає на її експлуатаційні властивості.

Процес оздоблювально-зміцнювальної обробки (ОЗО) супроводжується інтенсивним прикладанням зусилля деформування приповерхневим шаром, внаслідок якого відбувається пружна і пластична деформація. У результаті в поверхневому шарі виникають залишкові напруження [1–3].

При реалізації розробленого технологічного процесу [4] основними факторами контактної взаємодії деформувального ін-

струмента і заготовки, які формують характеристики якості поверхневого шару заготовки і впливають на формування напружено-деформованого стану поверхні є зусилля вдавлювання в зоні контакту інструмента і деталі, а також контактне тертя між поверхнею деталі та інструментом.

Метод вібраційного обкатування передбачає утворення на поверхні регулярного мікрорельєфу [5] шляхом пластичної деформації початкових нерівностей цієї поверхні. Формування такого мікрорельєфу приводить до зміцнення поверхні металу та збільшення її зносостійкості. Але при зміцненні поверхні пластичним деформуванням на деякій глибині у приповерхневому шарі зароджуються тріщини, період роз-



виту яких у значній мірі залежить від залишкових напружень, які залишаються в деталі після обробки [6].

Залишкові напруження мають істотний вплив на міцнісні характеристики деталей машин. Виникнення у приповерхневому шарі залишкових стискувальних напружень приводить до підвищення циклічної міцності деталей. Це пояснюється їх впливом на розвантаження поверхневого шару від напружень, викликаних навантаженнями. Розтягувальні ж залишкові напруження навпаки призводять до зменшення міцнісних характеристик деталей внаслідок підвищення напружень поверхневого шару [7].

Сукупність внутрішніх напружень, що виникають під дією на поверхню деталі деформувального інструмента зумовлюють виникнення напружено-деформованого стану, дослідження якого дозволяє встановити вплив параметрів процесу вібраційного обкатування поверхневого шару на втрату його працездатності та ступінь зміцнення [8].

Мета роботи

За мету покладено змоделювати процес двоетапної оздоблювально-зміцнювальної обробки пластичним деформуванням циліндричних поверхонь деталей транспортувально-координувального вузла лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном методом кінцевих елементів. Моделювання процесу, а саме поведінки деформувального інструмента в процесі обробки дозволить встановити зв'язок параметрів технологічного процесу двоетап-

ної ОЗО з характером та величиною залишкових напружень, які мають суттєвий вплив на працездатність деталей.

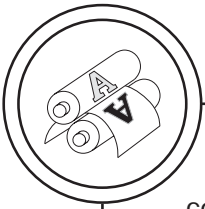
Результати проведених досліджень

Відомо декілька технологічних процесів для підвищення характеристик якості і експлуатаційних показників циліндричних валів поліграфічного обладнання. Так, зокрема технологічний процес описаний у роботі [9] полягає в тому, що на першому етапі на поверхні циліндричної деталі виконують частково регулярний мікрорельєф з регулярними нерівностями, які не перетинаються, а на другому етапі металеву поверхню хромують. Основними факторами, які впливають на формування залишкових напружень є зусилля вдавлювання деформувального елемента в зоні деформації, а також контактне тертя, яке виникає між поверхнею тертя і деформувальним елементом.

У запропонованому ж двоетапному технологічному процесі ОЗО на першому етапі на поверхні утворюють повністю регулярний мікрорельєф на всій поверхні, а на другому етапі на окремих ділянках поверхні утворюють з додатковим зусиллям деформування частково регулярний мікрорельєф у вигляді поздовжніх заглибин. Це змінює величину і ротащування залишкових напружень по всій поверхні [10].

Для моделювання технологічного процесу обробки заданої деталі були зроблені наступні припущення:

а) деталь, у ході скінчено-елементного аналізу представляється як безкінечна заготовка;



б) деформувальний інструмент сферичної форми — абсолютно твердий;

в) технологічний процес утворення мікрорельєфу є динамічний, у зв'язку з цим при його моделюванні для спрощення постановки задачі розв'язували її як квазідинамічну, тобто в статичній постановці деформувальному інструменту задавалась не швидкість, а переміщення.

Для вирішення поставленої задачі брались експериментальні зразки зі сталі.

Враховуючи вісесиметричність заготовки, вирішується плоска задача у вертикальній площині, в якій лежить вісь заготовки, у два етапи: на першому етапі форму-

ються відбитки від вібровиглажуючої обробки (рис. 1, а) з максимальною відстанню між слідами $S = 0,2$ мм, на другому проводиться вигладжування уздовж осі заготовки по вже сформованому залишковому напружено-деформованому стану на першому етапі (рис. 1, б).

Результати напружено-деформованого стану на активній стадії при впровадженні індентора на першому етапі наведено на рис. 2.

Аналіз напружено-деформованого стану в осередку деформації (рис. 2) показує, що всі компоненти нормальних напружень $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, є стискаючими, їх максимальні величини 1000 МПа,

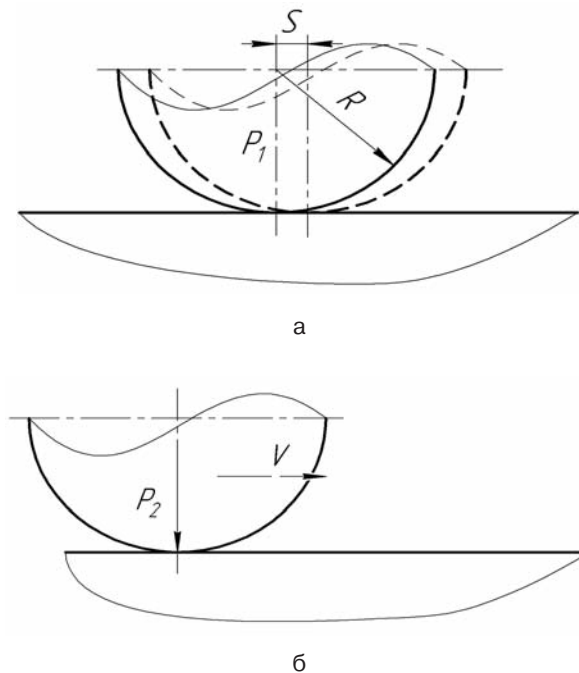
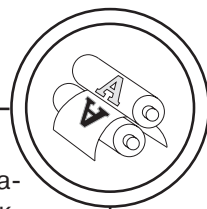


Рис. 1. Розрахункова схема процесу комбінованого вібровигладжування: а — етап 1 — формування НДС вібровигладжування із зусиллям ($P_1 = 100$ Н), б — етап 2 — вигладжування в осьовому напрямку із зусиллям $P_2 = 150$ Н



1239 МПа та 1000 МПа відповідно (рис. 2, а–в). Напруження зсуву τ_{xy} змінює знак під індентором на протилежний, а їх величина залежить від коефіцієнта тертя між деталлю і деформуючим інструментом.

Напружено-деформований стан після першого етапу (вібро-вигладжування) — залишкові напруження наведено на рис. 3.

У результаті вібро-вигладжуючої обробки у приповерхневому

шарі формуються стискаючі залишкові напруження σ_x і σ_z . Їх максимальна величина знаходиться під слідом від вібро-вигладжуючого інструмента [11, 12]. Розподіл діючих і залишкових напружень у приповерхневому шарі на першому етапі вібро-вигладжуючої обробки наведено на рис. 4.

Максимальна величина залишкових напружень спостерігається на глибині 50–100 мкм та складає $\sigma_x = 117$ МПа, $\sigma_z = 191$ МПа.

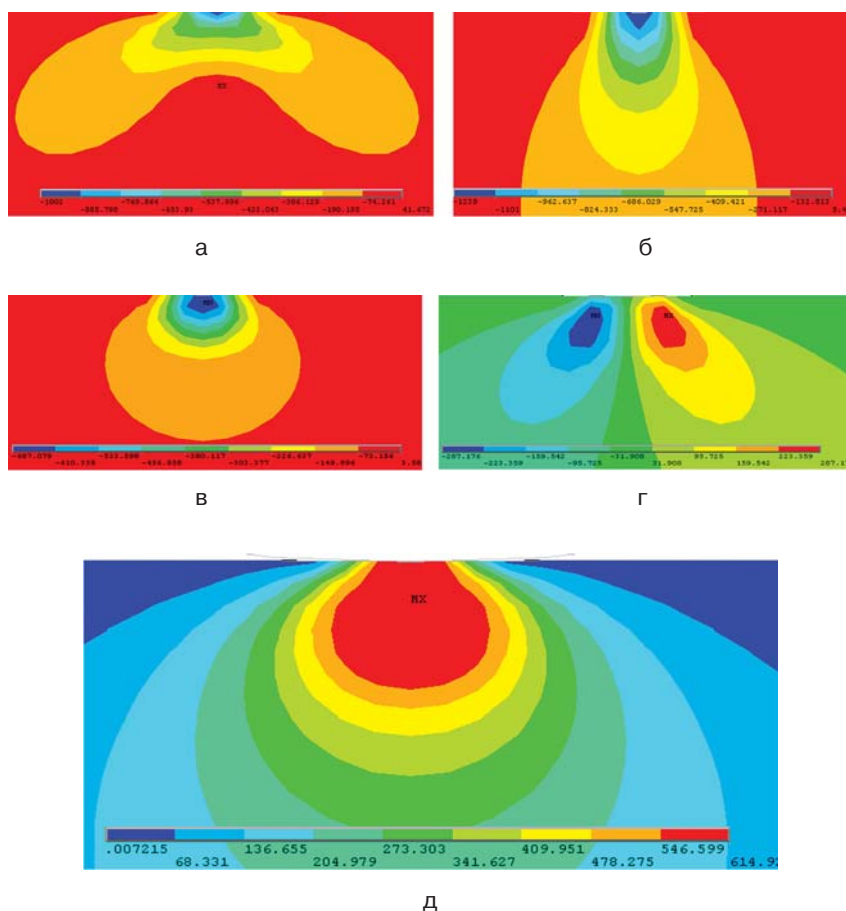
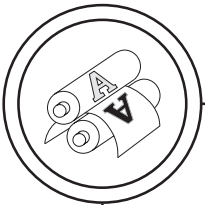


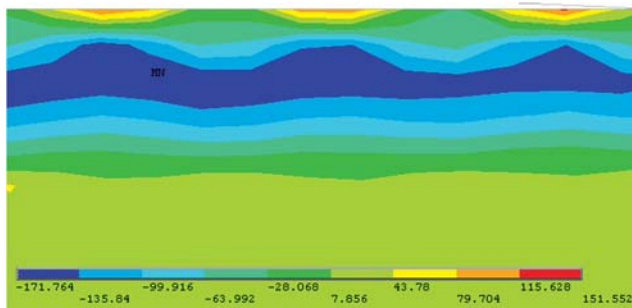
Рис. 2. Напружено-деформований стан поверхневого шару при впровадженні індентора на першому етапі: а–в — нормальні напруження σ_x , σ_y , σ_z , г — дотичні напруження τ_{xy} , д — інтенсивність напружень



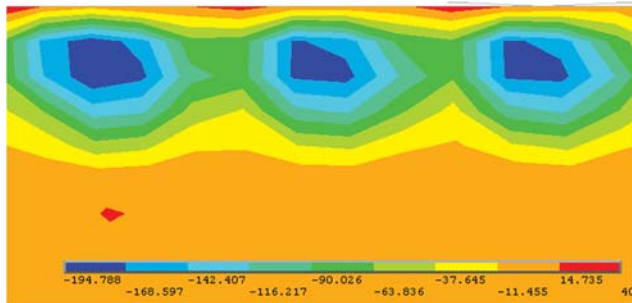
Модельовання другого етапу — вигладжування вздовж осі деталі моделювалось з урахуванням напружено-деформованого стану, який сформувався на першому етапі вібровигладжуючої обробки (рис. 5).

Розподіл залишкових напружень після другого етапу обробки вигладжуванням наведено на рис. 6.

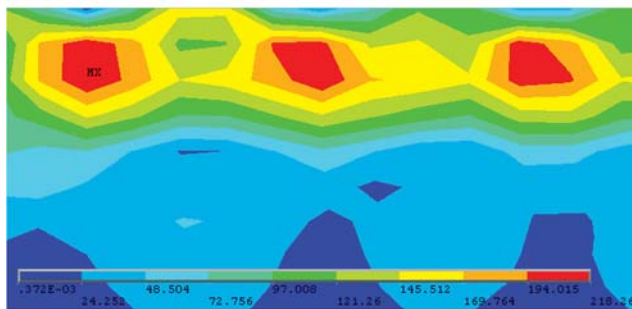
У приповерхневому шарі спостерігаються залишкові напруження стиску напруження σ_x і σ_z .



а

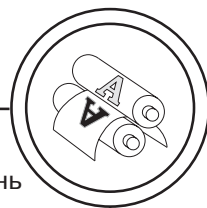


б



в

Рис. 3. Розподіл залишкових напружень після першого етапу обробки вібровигладжуванням: а, б — нормальні напруження σ_x і σ_z , в — інтенсивність напружень



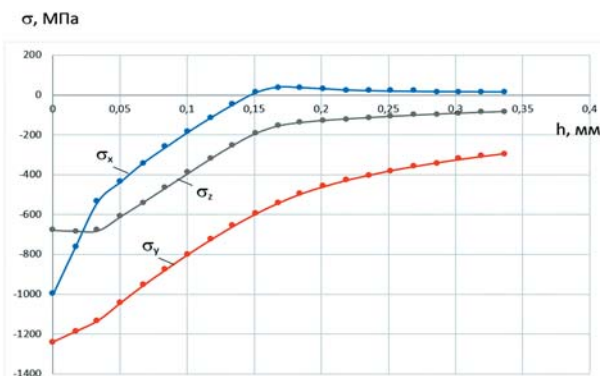
Графіки розподілу нормальних залишкових напружень по глибині поверхневого шару h наведено на рис. 7.

Після другого етапу вигладжувачої обробки спостерігається збільшення величини і глибини залягання нормального залишкового напруження σ_z за рахунок більшого зусилля вигладжування. Значне збільшення нормального залишкового напруження σ_x може бути пояснене співпадін-

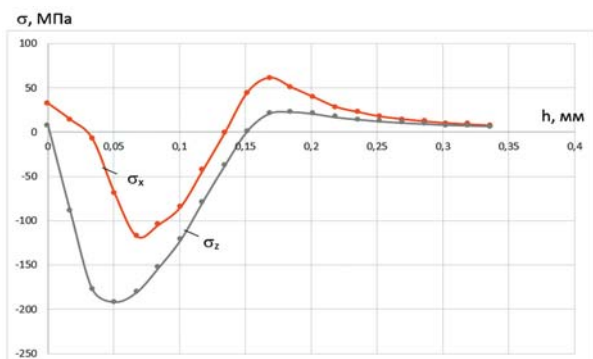
ням напрямків дії цих напружень на першому та другому етапі комбінованої обробки.

Висновки

Встановлено, що після першого етапу комплексного технологічного процесу у приповерхневому шарі формуються стискаючі залишкові напруги σ_x і σ_z . Максимальна величина їх знаходиться на глибині 50–100 мкм та складає $\sigma_x = 100\text{--}120$ МПа, $\sigma_z = 170\text{--}190$ МПа.

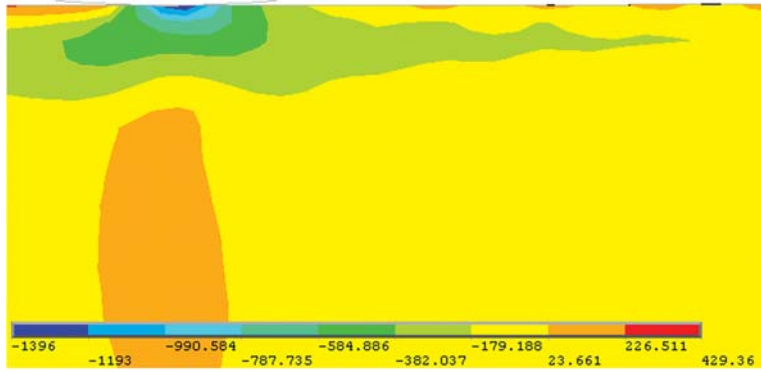
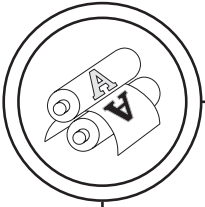


а

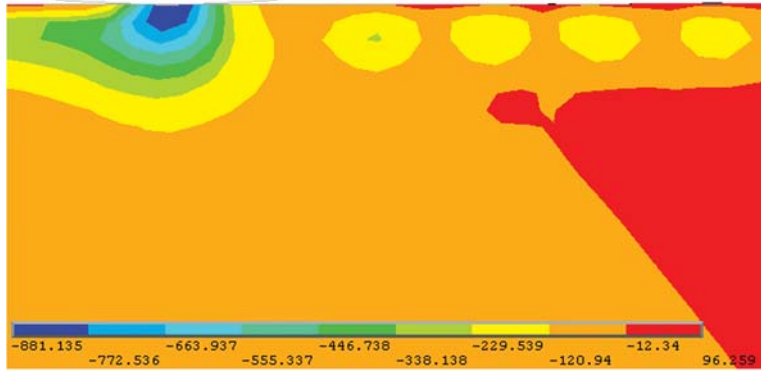


б

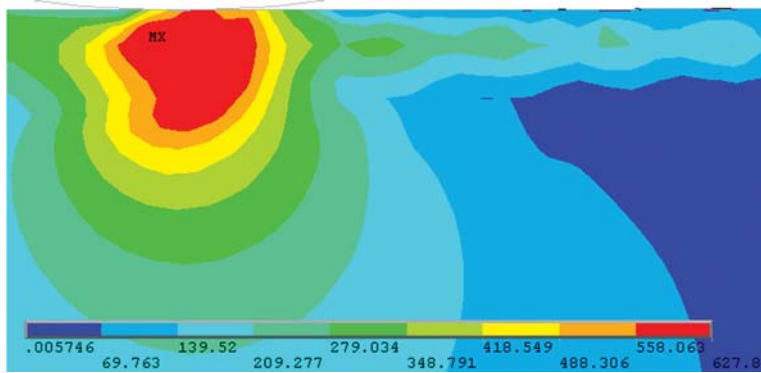
Рис. 4. Розподіл напружень у поверхневому шарі на першому етапі вібровигладжувачої обробки: а — діючі напруження на активній стадії навантаження, б — залишкові напруження



а

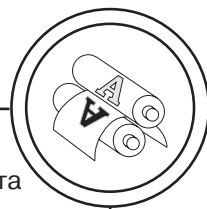


б



в

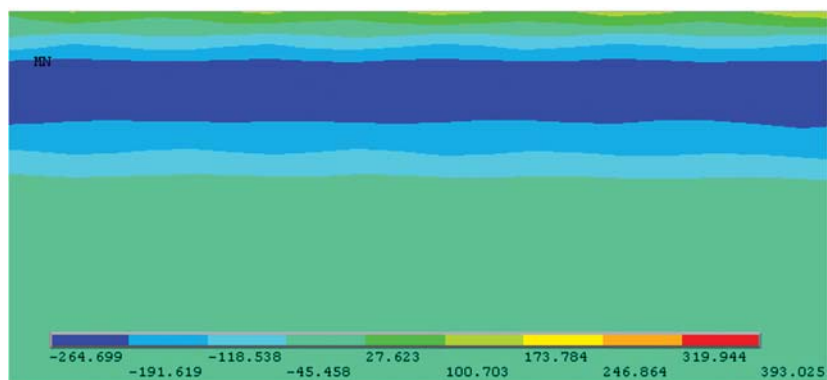
Рис. 5. Напружено-деформований стан поверхневого шару на другому етапі вигладжуючої обробки: а, б — нормальні напруження σ_x , та σ_y , в — інтенсивність напружень



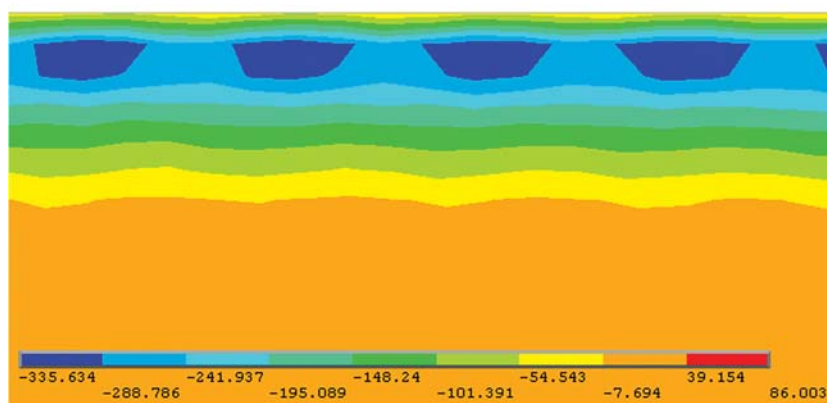
Після другого етапу розробленого технологічного процесу в місцях повторного проходження деформувального інструмента відбувається збільшення глибини і величини залягання нормального залишкового напруження σ_z за рахунок додаткового зусилля вигладжування. А значне збільшення нормального напруження σ_x може бути обґрунтовано співпадінням напрямків дії

цих напружень на першому та другому етапах комплексного технологічного процесу.

Формування в приповерхневому шарі стискаючих залишкових напружень позитивно впливає на підвищення зносостійкості валів транспортувально-координувального вузла лінії для виготовлення інтегральних обкладинок з широким клапаном.



а



б

Рис. 6. Розподіл залишкових напружень після другого етапу обробки вигладжуванням в осьовому напрямку: а, б — нормальні напруження σ_x і σ_z

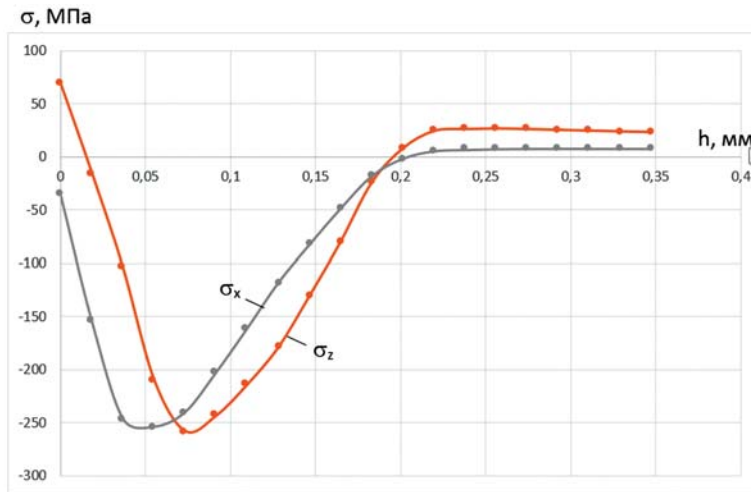
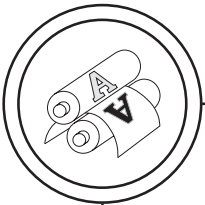
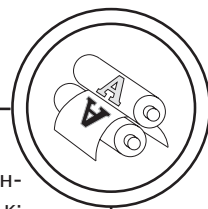


Рис. 7. Розподіл залишкових напружень у поверхневому шарі після другого етапу вигладжуючої обробки

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. Бутаков Б. И. Повышение контактной прочности стальных деталей с помощью поверхностного пластического деформирования / Б. И. Бутаков, Д. Д. Марченко // Проблемы трибологии. 2008. № 1. С. 14–23.
3. Деревінка І. С. Стан і аналіз сучасних методів підвищення надійності деталей машин поверхневим зміцненням / І. С. Деревінка // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». Сер. «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». 2007. № 583. С. 18–24.
4. Пат. 129043 Україна, МПК (2006) B24B 39/00. Спосіб утворення регулярного мікрорельєфу на поверхнях циліндричних деталей поліграфічних машин / П. О. Киричок, Ю. Ю. Віцюк, Р. Л. Трищук; заявник і власник НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського». № u 2018 00825; заявл. 30.01.2018; опубл. 25.10.2018, Бюл. № 20. 6 с.
5. ГОСТ 24773-81 Поверхности с регулярным микрорельефом. Классификация, параметры и характеристики.
6. С. М. Зигуля. Сучасний стан і аналіз застосування поверхневого пластичного деформування у поліграфічному машинобудуванні / С. М. Зигуля // Технологія і техніка друкарства. 2013. № 2(40). С. 69–82. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(40\).2013.30739](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(40).2013.30739).
7. Гавриш А. П. Підвищення надійності деталей машин поверхневим пластичним деформуванням / А. П. Гавриш, П. О. Киричок, П. П. Мельничук. Житомир: ЖІТІ. 2001. 516 с.
8. Гавриш А. П. Алмазноабразивна обробка магнітних матеріалів / А. П. Гавриш, П. П. Мельничук: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2003. 652 с.
9. Лотоцька О. І. Підвищення експлуатаційних властивостей деталей поліграфічних машин / О. І. Лотоцька // Технологія і техніка друкарства. 2008. № 3–4(21–22). С. 16–20. Режим доступу: <http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/58790>.



10. Фесенко А. Г. Методи поверхневого зміцнення у процесі виготовлення деталей машин: навч. посібник / А. Г. Фесенко та ін. Дніпропетровськ: РВВ ДНУ. 2015. 104 с.

11. Проскуряков Ю. Г. Технология упрочняющекалибрующей формообразующей обработки металлов / Ю. Г. Проскуряков. М.: Машиностроение. 1981. 208 с.

12. Безъязычный В. Ф. Расчет температурных остаточных напряжений в поверхностном слое деталей при механической обработке / В. Ф. Безъязычный // Физика и химия обработки материалов. 1996. № 5. С. 37–42.

References

1. Kyrychok, P. O. & Oliinyk, V. H. & Kyrychok, T. Yu. (2004). *Zmitsnennia poverkhon metalevykh detalei*. Kyiv: Presa Ukrainy, 240 p. [in Ukrainian].

2. Butakov, B. I. & Marchenko, D. D. (2008). Povyshenie kontaktnoy prochnosti stal'nykh detaley s pomoshch'yu poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya. *Journal of Problemy trybolohii*, 1, 14–23 [in Russian].

3. Derefinka, I. S. (2007). Stan i analiz suchasnykh metodiv pidvyshchennia nadiinosti detalei mashyn poverkhnevym zmitsnenniam. *Journal of Visn. Nats. un-tu 'Lvivska politekhnika'. Ser. 'Optimizatsiia vyrobnychykh protsesiv i tekhnichniy kontrol u mashynobuduvanni ta pryladobuduvanni'*, 583, 18–24 [in Ukrainian].

4. Kyrychok, P. O. & Vitsiuk, Yu. Yu. & Trishchuk, R. L. *Sposib utvorennia rehu-liarnoho mikroreliefu na poverkhniakh tsylindrychnykh detalei polihrafichnykh mashyn [Method of forming regular microrelief on surfaces of cylindrical parts of printing machines]* // Patent № UA129043. Publish 25.10.2018 [in Ukrainian].

5. *Poverkhnosti s regulyarnym mikrorel'efom. Klassifikatsiya, parametry i kharakteristiki* (GOST 24773-81) [in Russian].

6. Zyhulia, S. M. (2013). Suchasnyi stan i analiz zastosuvannia poverkhnevo-ho plastychnoho deformuvannia u polihrafichnomu mashynobuduvanni. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 2(40), 69–82. DOI: [https://doi.org/10.20535/2077-7264.2\(40\).2013.30739](https://doi.org/10.20535/2077-7264.2(40).2013.30739) [in Ukrainian].

7. Havrysh, A. P. & Kyrychok, P. O. & Melnychuk, P. P. (2001). *Pidvyshchennia nadiinosti detalei mashyn poverkhnevym plastychnym deformuvanniam*. Zhytomyr: ZhITI, 516 p. [in Ukrainian].

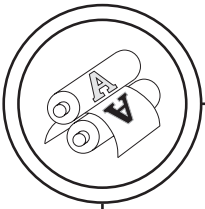
8. Havrysh, A. P. & Melnychuk, P. P. (2003). *Almaznoabrazovna obrobka mahnitnykh materialiv*. Zhytomyr: ZhDTU, 652 p. [in Ukrainian].

9. Lototska, O. I. (2008). Pidvyshchennia ekspluatatsiinykh vlastyvoستي detalei polihrafichnykh mashyn. *Journal of Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva*, 3–4(21–22), 16–20. Режим доступа: <http://ttdruk.vpi.kpi.ua/article/view/58790> [in Ukrainian].

10. Fesenko, A. H. & at al. (2015). *Metody poverkhnevoho zmitsnennia u protsesi vyhotovlennia detalei mashyn*. Dnipropetrovsk: RVV DNU, 104 p. [in Ukrainian].

11. Proskuryakov, Yu. G. (1981). *Tekhnologiya uprochnyayushcheekalibruyushchey formoobrazuyushchey obrabotki metallov*. Moscow: Mashinostroenie, 208 p. [in Russian].

12. Bez'yazychnyy, V. F. (1996). Raschet temperaturnykh ostatochnykh napryazheniy v poverkhnostnom sloe detaley pri mekhanicheskoy obrabotke. *Journal of Fizika i khimiya obrabotki materialov*, 5, 37–42 [in Russian].



Проведен анализ напряженно-деформированного состояния двухэтапного процесса отделочно-упрочняющей обработки (ОУО) поверхностей валов транспортировочно-координирующего узла линии для изготовления интегральных обложек с широким клапаном. Разработана конечно-элементная модель двухэтапного процесса ОУО валов транспортировочно-координирующего узла линии для изготовления интегральных обложек с широким клапаном.

Ключевые слова: отделочно-упрочняющая обработка; микрорельеф; пластическое деформирование; напряженно-деформированное состояние; комплексное упрочнение.

The analysis of the stress-strain state of a two-stage process of finishing and strengthening treatment of the shaft surfaces of the conveyor-coordinating node of the line for the manufacture of integral covers with a wide valve. A finite element model of a two-stage process of finishing and strengthening processing of shafts of the transport-coordinating node of the line for the manufacture of integral covers with a wide valve is developed.

Keywords: finishing-strengthening treatment; microrelief; plastic deformation; stress-strain state; complex strengthening.

Рецензент — А. І. Іванко, канд. техн. наук,
доц., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції 16.09.19