

УДК 621.7; 621.8; 539.4

DOI: 10.15587/1729-4061.2018.126196

ДОСЛІДЖЕННЯ І РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ЗМІЦНЕННЯ КАНАТНИХ БЛОКІВ ОБКАТУВАННЯМ РОЛИКАМИ

О. В. Диха

Доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри
Кафедра зносостійкості і надійності машин
Хмельницький національний університет
вул. Інститутська, 11, м. Хмельницький, Україна, 29016
E-mail: tribosenator@gmail.com

Д. Д. Марченко

Кандидат технічних наук, доцент*
E-mail: marchenkodd1984@gmail.com

В. О. Артюх

Інженер*
E-mail: vitaliy5555555555@rambler.ru

О. В. Зубєхіна-Хайят

Інженер*
E-mail: zubehinakhayat@gmail.com

В. М. Курепін

Інженер
Кафедра методики професійного навчання**
E-mail: kurepin@mnaeu.edu.ua

*Кафедра тракторів та сільськогосподарських машин,
експлуатації та технічного сервісу**

**Миколаївський національний аграрний університет
вул. Георгія Гонгадзе, 9, м. Миколаїв, Україна, 54020

Виконані дослідження глибини, ступеня наклепування і дифузії хімічних елементів поверхневого шару. Основним механізмом дифузії є градієнт щільності дислокацій. Досліджено процес зношування контактних поверхонь тертя при коченні з врахуванням проковзування. Запропоновані спосіб, технологія і пристрій для обкатування канатних блоків клиновим роликом, які забезпечують низьку шорсткість і високий ступінь наклепування поверхні

Ключові слова: контактна міцність, зношування, поверхнєве пластичне деформування, клиновий ролик, канатний блок

Выполнены исследования глубины, степени наклепа и диффузии химических элементов поверхностного слоя. Основным механизмом диффузии является градиент плотности дислокаций. Исследован процесс износа контактных поверхностей трения при качении с учетом проскальзывания. Предложены способ, технология и устройство для обкатывания канатных блоков клиновым роликом, которые обеспечивают низкую шероховатость и высокую степень наклепывания поверхности

Ключевые слова: контактная прочность, износ, поверхностное пластическое деформирование, клиновой ролик, канатный блок

1. Вступ

Проблема підвищення зносостійкості, контактної міцності і опору контактному зминанню стає все більш актуальною, оскільки постійно зростає інтенсивність роботи підйомно-транспортного обладнання.

Найекономічніше продовжити термін експлуатації канатних блоків можна за рахунок поліпшення властивостей поверхневого шару. Управління властивостями поверхні можна здійснювати за рахунок зміни структури поверхневого шару, а також його фізико-механічних властивостей.

При експлуатації техніки та обладнання загально-технічного призначення великогабаритні сталеві деталі, що сприймають контактні навантаження, такі як: канатні блоки, поліспасти, шківні та інші, часто виходять з ладу. Значні робочі зусилля за наявності перекосів сполучених деталей, нерідко призводять до зминання, підбивці робочих поверхонь тертя, спотворенню форми, зміни розрахункових зазорів між деталями. В результаті цього скорочується довговічність роботи вузла під-

йомно-транспортного обладнання і машини в цілому. Численні дослідження [1] показали, що до 85 % виходу з ладу машин при експлуатації відбувається не через недостатню конструктивну міцність деталей і вузлів, а через контактні руйнування і зношування спряжених поверхонь тертя.

Застосування термічних або хіміко-термічних методів зміцнення при виготовленні великих канатних блоків обмежено габаритними розмірами і масою. Найбільш простим і доступним, а часто і єдино можливим методом зміцнення таких блоків, є обробка поверхонь холодним пластичним деформуванням, – обкатуванням роликами або чеканкою бойками. Для поліпшення зовнішнього вигляду і підвищення зносостійкості поверхневого шару застосовується чистове поверхнєве пластичне деформування (ППД), а з метою підвищення втомної, контактної міцності деталей – зміцнююча обробка.

Тому, дослідження впливу властивостей поверхневого шару після обкатування роликами на триботехнічні характеристики є актуальним науково-технічним завданням.

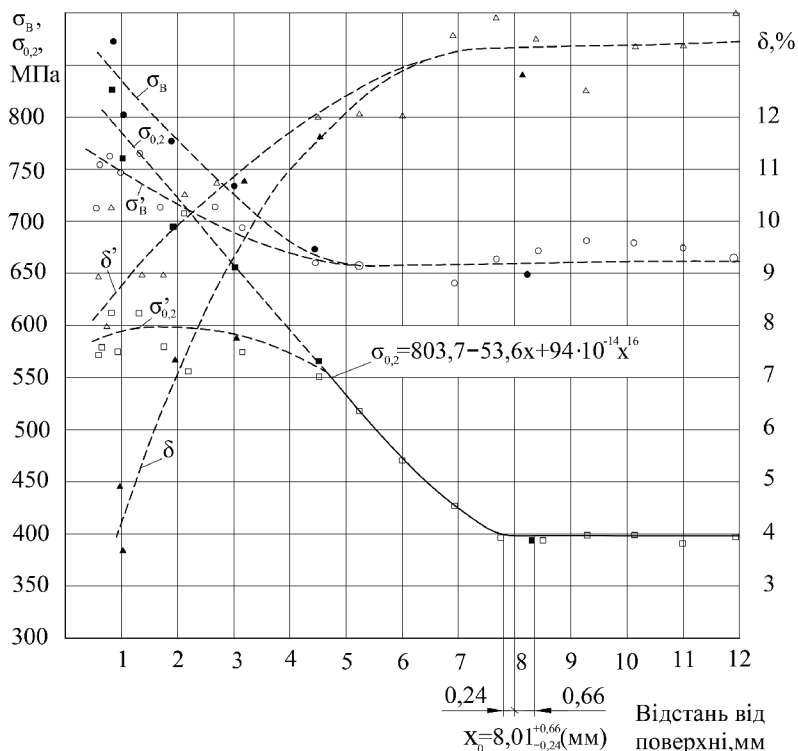


Рис. 1. Механічні властивості поверхневого шару валів, обкатаних тороподібними роликми діаметром $D_p = 105$ мм, з профільним радіусом $r_p = 10$ мм: σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ – властивості в круговому напрямі; σ'_B , $\sigma'_{0,2}$, δ' – властивості в осьовому напрямі

У процесі регресійного аналізу значення коефіцієнтів рівняння регресії (1)–(2) й абсциси точки екстремуму спочатку розраховували з урахуванням значень механічних властивостей, що істотно відрізняються від вихідних. Після того, як точки заміру початкових механічних властивостей були зсунуті у напрямі осі x до збігу їх абсцис з абсцисою точки екстремуму лінії регресії, рішення виконувалося знову, вже з урахуванням перетворених таким чином замірів початкових механічних властивостей.

Розв'язання повторювалося до тих пір, поки різниця між абсцисами точок екстремуму двох останніх ліній регресії не перевищувала наперед заданого числа, рівного 0,01 мм. Розрахунки виконувалися на ПЕОМ. Коефіцієнт m параболічної лінії регресії набував значень від 2 до 25.

З усіляких ліній регресії вибиралася лінія, що має найменшу залишкову дисперсію S^2 . Кращою лінією регресії виявилася параболічна залежність. Для всіх випробовуваних зразків гіпотеза рівності середніх значень глибини наклепування, визначених за результатами замірів твердості й границі текучості, перевірена за критерієм Стюдента, не підтвердилася.

Результати досліджень показали, що границя текучості наклепаного шару зростає в більший ступінь, ніж твердість (100–130 % проти 20–60 %). Завдяки цьому по зміні текучості чіткіше визначається границя деформованого шару. Застосування для обкатування циліндричних голчастих роликів малого діаметру призводить до різкого підвищення ступеня деформації в тонкому поверхневому шарі, що фіксується на оптичних мікрофотографіях по витягуванню зерен у напрямі обкатування. Точність визначення границі наклепаного шару методом регресійного аналізу за результатами замірів умовної границі текучості в два рази вище,

ніж по замірах твердості, визначуваної методом Віккерса. 95%-і довірчі інтервали для глибини наклепування, розраховані за результатами замірів умовної границі текучості, складають 11–36 % глибини наклепування, а по замірах твердості 32–75 %. Глибина наклепування, що визначається по змінах умовної границі текучості, 25–50 % більше глибини, що визначається по вимірюваннях твердості по Віккерсу. Відмінність зростає зі зменшенням ступеня наклепування. Глибина наклепування по умовній границі текучості для кругових і близьким до них відбитків ($b/a \leq 2$) відповідає розрахунковій по С. Г. Хейфецу навіть при досить малій приведеній кривизні контакту ролика з деталлю ($k=0,0835 \text{ мм}^{-1}$). Встановлено, що границя текучості являється більш чутливішою механічною характеристикою для визначення глибини пластичної деформації, ніж твердість. Глибина залягання стискаючих напружень близька глибині наклепування, визначеної по границі текучості.

Вплив режимів обкатування роликми на зміну мікроструктури оброблюваних металів досліджено при обкатуванні циліндричними роликми малого діаметру і тороподібними роликми. Мікроструктура зразків до поверхневого наклепування складається з перлітних зерен, оточених доевтектоїдним феритом (рис. 2, а).

Після обкатування зміни в мікроструктурі на оптично-цифрових мікрофотографіях вдалося виявити тільки в поверхневих шарах валу, обкатаного роликком (рис. 2, б). Полягали в значному видовженні в круговому напрямку кочення ролика як феритних, так і перлітних зерен. Встановлено, що при віддаленні від поверхні (16,42 мм) феритні пластинки перліту не містять дислокацій, в окремих ділянках спостерігалися одиничні дислокації на поверхні розділу ферит-цементит. Феритні зерна зразків обмежені плоскими прямими границями. В середині зерен присутня трьохмірна сітка дислокацій невеликої щільності.

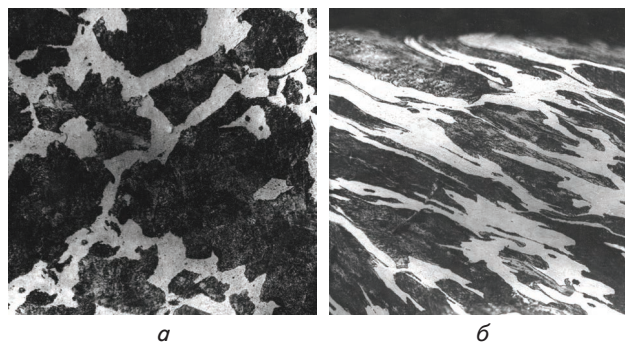


Рис. 2. Мікроструктура зразків поверхневого шару із нормалізованої сталі 40: а – до обкатування; б – після обкатування ($\times 300$)

Як показало електроннографічне дослідження, зміцнення поверхневих шарів при обкатуванні валів роликком в основному пов'язано з виникненням дислокаційних комірок в структурі зерен надлишкового фериту. Збільшення

ступеня наклепування при обкатуванні голчастим роликом проявляється у більшій щільності дислокацій. Також у зменшенні розміру комірок в субструктурі феритних зерен і густішій сітці дислокацій у феритних пластинах перліту. У окремих ділянках відбувається вигин і розлом цементитних пластинок, що свідчить про граничну ступінь пластичної деформації поверхневого шару. Це підтверджується початком лущення поверхні, обкатаної п'яти-міліметровим роликом.

Розподілення мікротвердості H_μ за глибиною 3-х зразків показано на рис. 3.

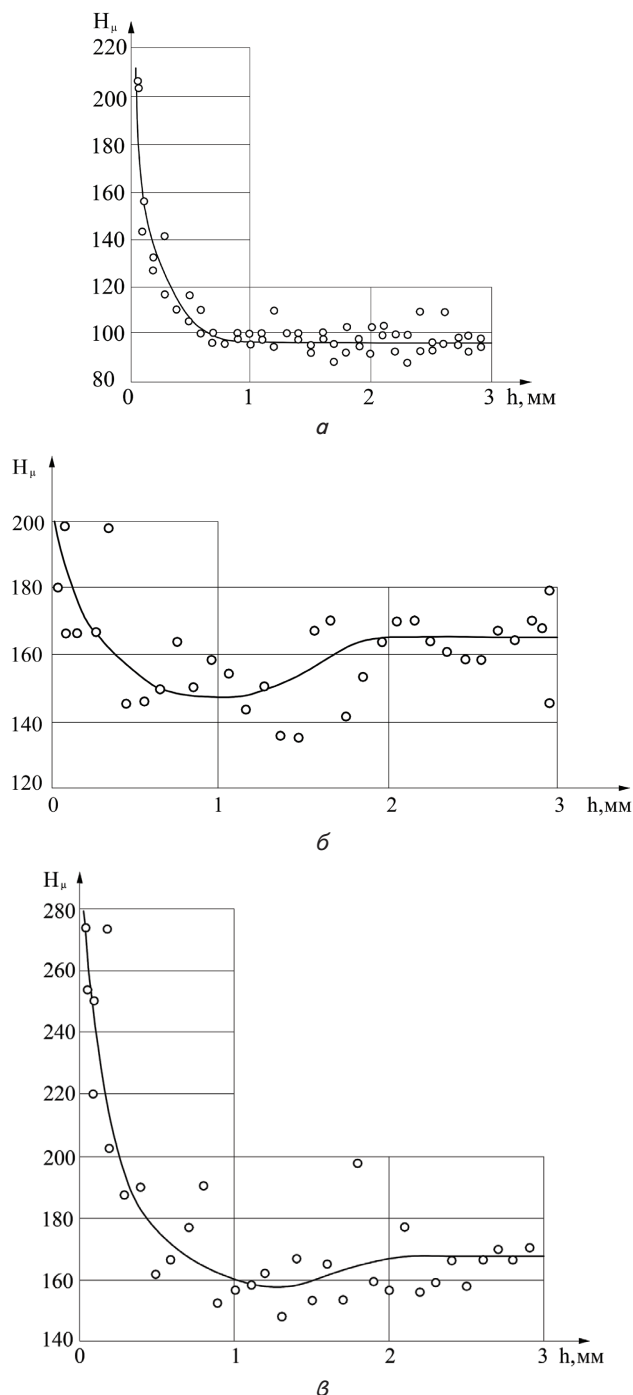


Рис. 3. Розподілення мікротвердості за глибиною зміцненого шару: а – армкозалізо, $r_p = 2,5$ мм, $P = 1,5$ кН; б – сталь 45, $r_p = 5$ мм, $P = 5$ кН; в – сталь 40X, $r_p = 2,5$ мм, $P = 5,5$ кН

На графіках (рис. 3, б, в) для сталей 45 і 40X виявлено зниження мікротвердості $H_{\mu(п.з.)}$ в перехідній зоні між зміцненим шаром і вихідним металом, мікротвердістю $H_{\mu(м.)}$. Середні значення $H_{\mu(п.з.)}$ та $H_{\mu(м.)}$ нормально розподілених величин порівнювали за допомогою t – критерію Стюдента.

Для цього визначали зведену дисперсію:

$$S^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad (3)$$

та

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (4)$$

де n_1, n_2 – число замірів H_μ у перехідній зоні й у вихідному металі відповідно; S_1^2, S_2^2 – дисперсія значень $H_{\mu(п.з.)}$ та $H_{\mu(м.)}$ відповідно; $\bar{x}_1, \bar{x}_2$ – середні значення $H_{\mu(п.з.)}$ та $H_{\mu(м.)}$ відповідно.

Якщо $|t| \geq t_\alpha, K$, то різниця середніх значень суттєва. Величину довірчої імовірності $P = 1 - \alpha$ вибирали рівною 0,95, ($\alpha = 0,05$), число ступеня вільності визначали з виразу $K = n_1 + n_2 - 2$.

Встановлено, що в перехідній зоні вміст Cr і C зменшився на 20–30 %, а в зміцненому шарі збільшився до 10–15 %. При обкатуванні роликами сталей 40X і 45 простежується значне зниження мікротвердості у перехідній зоні між зміцненим шаром і вихідним металом. При обкатуванні армкозаліза такого спаду не виявлено (рис. 3, а). На підставі цих досліджень викладено гіпотезу дифузії зміцнюючих хімічних елементів (Cr, C) з проміжного шару на поверхню деталі. Основним механізмом дифузії при ППД являється градієнт щільності дислокацій.

Методом фотопружності показано, що при пружно-пластичній деформації напруження по поверхні контакту ролика з деталлю розподіляються по кривій, близькій до еліптичної, різниця не більше 7 %.

Встановлено, що при проковзуванні до 2 % простежується різка зміна коефіцієнту тертя, після чого він залишається практично не змінним через розповсюдження ковзання на всю площу контакту. Очевидний зв'язок величини максимального коефіцієнту тертя від стану поверхні тертя. Так в процесі різкої зміни коефіцієнту тертя для зміцнених і не зміцнених зразків з мащенням і без нього виявлена зона (штрихована лініями), коли припрацювання відбувається швидше для обкатаних зразків роликами (рис. 4, а). Можна стверджувати, що шорсткість поверхні впливає тільки при малих проковзуваннях (до 3 %), при цьому обкатування роликами створює в поверхневому шарі задані триботехнічні властивості зі зменшеними показниками зношування.

На рис. 4, б приведена залежність коефіцієнта тертя від шорсткості поверхні для зразків до обкатування і після обкатування роликом з мащенням мастила Торсиол-55. Встановлено, що зі зменшенням шорсткості поверхні після обкатування роликами зменшується коефіцієнт тертя для зразків, які мають мащення.

При коченні з проковзуванням основними механізмами зношування є окислювальне і втомлювальне (змінання) зношування [14, 15]. Деформація зминання збільшується, при підвищенні проковзування, якщо дотичні напруження достатньо великі.

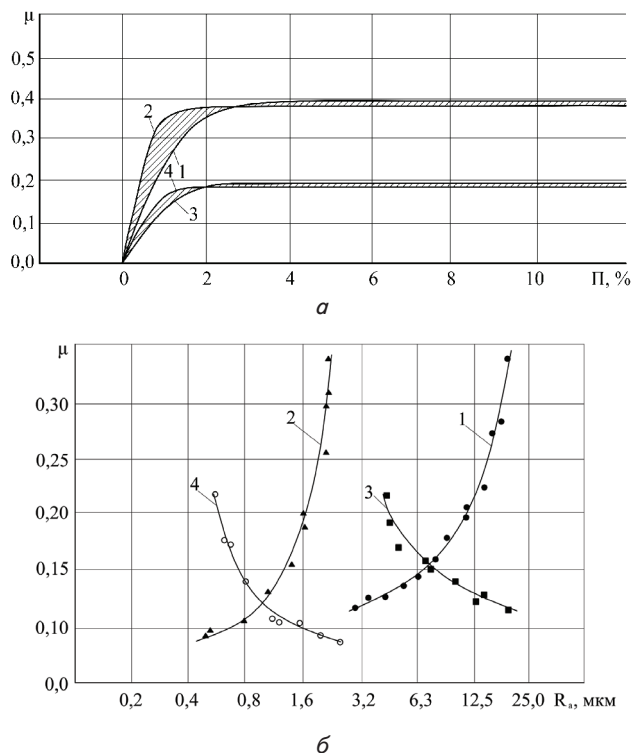


Рис. 4. Залежність коефіцієнта тертя:

- α – від величини проковзування; b – від шорсткості поверхні: 1 – не обкатаний зразок без мащення; 2 – зразок обкатаний за допомогою ролика без мащення; 3 – не обкатаний зразок з мащенням; 4 – зразок обкатаний за допомогою ролика з мащенням

Розроблена методика визначення зусилля обкатування клиновим роликом. З метою запобігання перенаклепування і лущення обкатуваного металу введено обмеження зусилля обкатування середнім кутом втискування, не перевищуючим 5° . За допомогою номограми визначають

зусилля обкатування, яке залежить від розмірів деталі і ролика кругового профілю та вибирають приведений профільний радіус ролика для визначення його конструктивних параметрів.

Розроблено спосіб обкатування сталей [16] та здійснено теоретичний аналіз геометричних параметрів при обкатуванні клиновим роликом канатних блоків. При цьому розраховано биття, ексцентриситет і діаметр ролика, його кривизна, кривизна обкатуваної деталі та нормальне посилення між роликом і деталлю в зоні деформації у всіх точках профілю деталі.

Розрахунки показали, що для запобігання утворення хвилястості на обкатуваній поверхні профільний радіус r_p виконаний змінної величини, що забезпечує постійність кута $\phi = 5^\circ$ втискування ролика на всіх ділянках профілю деталі.

Конструкція пристрою для обкатування канатних блоків показана на рис. 5, на який отримано патенти на винахід [16, 17].

Розроблений пристрій і технологія обкатування [17] канатних блоків клиновим роликом забезпечує низьку шорсткість і високу ступінь наклепування поверхні. Цей ефект досягається в результаті зберігання постійного середнього кута j втискування ролика в оброблювану поверхню і встановлення роликового вузла на опорах кочення. Це сприяє рівномірній деформації поверхневого шару за відсутності хвилястості і призводить до підвищення довговічності оброблюваної деталі.

Під час експериментальних досліджень було проведено оцінку залежності показників виконання технологічного процесу обкатування від кута вдавлювання ролика, профільного радіуса ролика, швидкості обкатування, а також від кількості обертів канатного блоку.

При побудові діаграми по осі абсцис наносилися фактори в порядку зниження їх рангу, а по осі ординат – суми рангів для відповідного фактора. За допомогою отриманої діаграми проведено оцінку значимості факторів. Для визначення факторів, що не впливають на технологічний процес, використовувався критерій Стюдента (t -критерій).

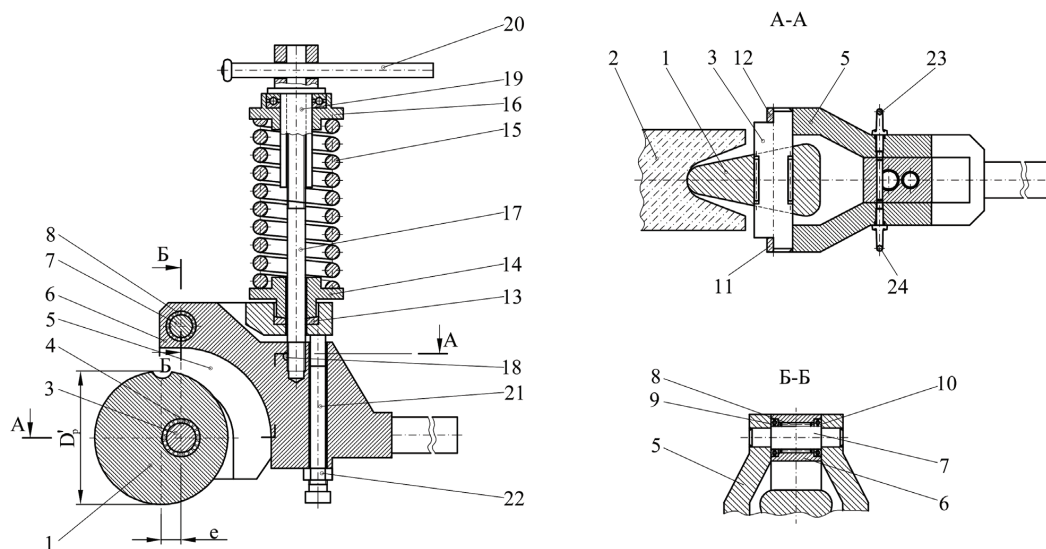


Рис. 5. Пристрій для обкатування канатних блоків клиновим роликом:

- 1 – ролик; 2 – обкатувана деталь; 3, 7 – вісь; 4, 8, 9, 10 – підшипники; 5 – важіль; 6 – кронштейн; 11, 12 – планки; 13 – сферична шайба; 14 – втулка; 15 – пружина; 16 – втулка; 17 – тяга; 18 – штифт; 19, 22 – гайка; 20 – рукоятка; 21 – гвинт; 23, 24 – римболти

Якщо розглянути побудовані графіки, можна зробити висновок, що зона оптимального поєднання факторів обмежена кривими ШП і СН в точках А, В, С, F, G. При цьому шорсткість поверхні лежатиме в межах $1,2 \text{ мкм} < \text{ШП} < 1,4 \text{ мкм}$, а ступінь наклепування $44 \% < \text{СН} < 45 \%$.

При таких показниках критеріїв оптимізації величина профільного радіуса ролика має бути $16...20 \text{ мм}$, а швидкість обкатування – $27...36 \text{ м/хв}$.

Послідовно змінюючи поєднання факторів, отримали двомірні перетини поверхонь відгуку при всіх можливих комбінаціях факторів.

Так, поєднуючи фактори значення кута вдавлювання (X_3) і кількості обертів канатного блоку (X_4) при $X_1 = 0$ (профільний радіус ролика) і $X_2 = 0$ (швидкість обкатування), було отримано такі рівняння регресії:

$$\begin{aligned} \text{ШП} = & 1,9224 - 0,5837 \cdot X_3 - \\ & - 0,4970 \cdot X_4 + 0,359 \cdot X_3 \cdot X_4 + \\ & + 1,405 \cdot X_3^2 - 1,280 \cdot X_4^2; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{СН} = & 47,5008 + 0,135 \cdot X_3 + \\ & + 0,1157 \cdot X_4 - 1,062 \cdot X_3 \cdot X_4 - \\ & - 0,925 \cdot X_3^2 + 0,931 \cdot X_4^2. \end{aligned} \quad (17)$$

Рішення системи рівнянь дало координати центрів поверхонь відгуку:

– для шорсткості поверхні $X_3 = 0,22$; $X_4 = -0,16$; $\alpha = 3,81^\circ$; $Y_5 = 1,89$;

– для ступеня наклепування $X_3 = 0,08$; $X_4 = -0,01$; $\alpha = 14,8^\circ$; $Y_5 = 47,50$.

На рис. 7 наведено результати, отримані для рівнянь (16) та (17), з яких видно, що зони оптимального поєднання факторів обмежені кривими ШП і СН в точках А, В, С і С, D, E. При цьому шорсткість поверхні в обох зонах близько 1 мкм , а ступінь наклепування становить 47% , при цьому кут вдавлювання ролика $4^\circ...7^\circ$, а кількість обертів канатного блоку $265...300 \text{ об.}$

Значимість отриманих оцінок коефіцієнтів і адекватності моделі виконували за допомогою G – критерія Кохрена і F – критерія Фішера.

За допомогою планування експерименту при оптимізації технологічного процесу обкатування канатного блоку клиновим роликом отримані оптимальні режими обробки. З них виявилися наступні: профільний радіус ролика (X_1) 15 мм , швидкість обкатування (X_2) $40...50 \text{ м/хв}$, кут вдавлювання ролика (X_3) 5° , кількість обертів канатного блоку (X_4) $160...180 \text{ об.}$ (рис. 6, 7).

Їх оптимальне поєднання формує якість виконання технологічного процесу поверхневого зміцнення сталейних деталей обкатуванням роликами в показниках: шорсткості поверхні (ШП) – $1...1,9 \text{ мкм}$ і ступеня наклепування (СН) – $46,5...56 \%$.

Дані про зношування приведені в табл. 2.

Показано, що обкатування роликами робочого профілю канатних блоків підвищує контактну міцність, а отже і довговічність у 3–4 рази.

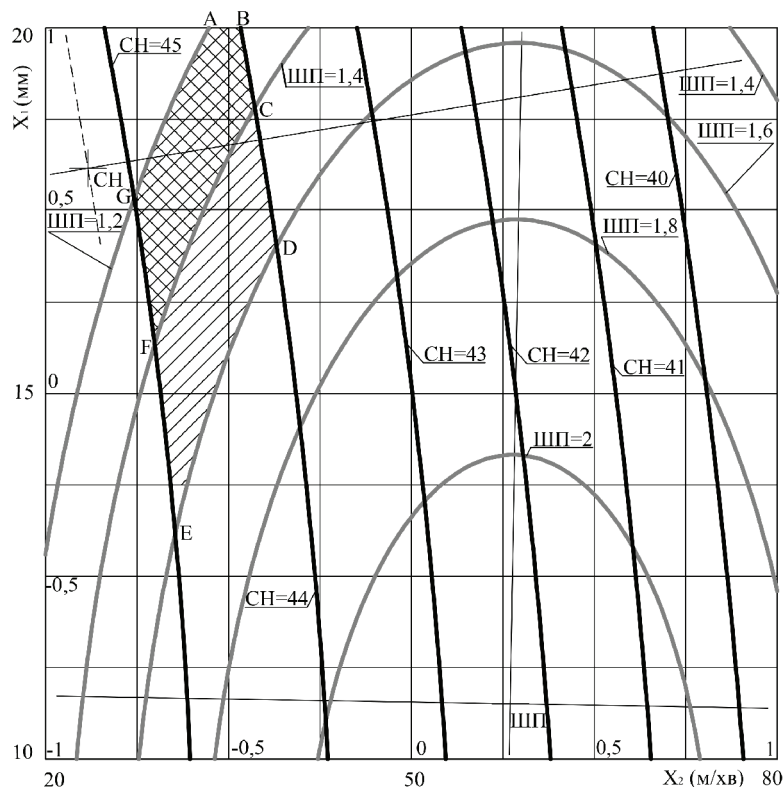


Рис. 6. Двомірні перетини поверхонь відгуку за поєднання факторів X_1 і X_2 при $X_3 = 0$ та $X_4 = 0$

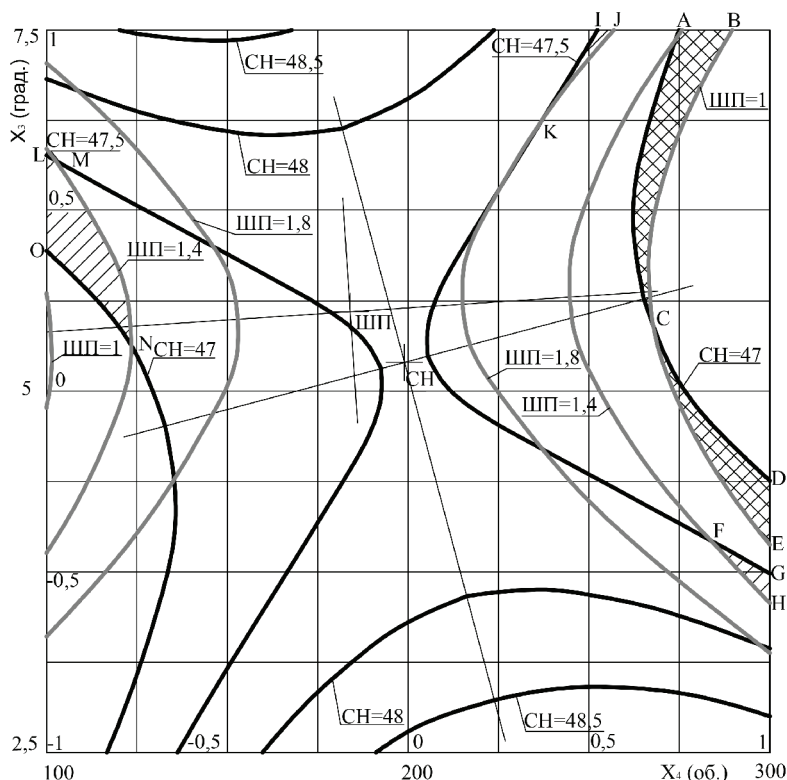


Рис. 7. Двомірні перетини поверхонь відгуку за поєднання факторів X_3 і X_4 при $X_1 = 0$; $X_2 = 0$

5. Improving of the wear resistance of working parts agricultural machinery by the implementation of the effect of self-sharpening / Aulin V., Warouma A., Lysenko S., Kuzyk A. // International Journal of Engineering & Technology. 2016. Vol. 5, Issue 4. P. 126–130. doi: 10.14419/ijet.v5i4.6386
6. Кузьменко А. Г., Диха О. В. Контакт, трение и износ смазанных поверхностей: монография. Хмельницкий: ХНУ, 2007. 344 с.
7. Справочник по кранам. Т. 1 / Брауде В. И., Гохберг М. М., Звягин И. Е. и др.; ред. М. М. Гохберг // Характеристики материалов и нагрузок. Основы расчета кранов, их приводов и металлических конструкций. М.: Машиностроение, 1988. 536 с.
8. Волошин В. И. Влияние износа блоков на работу подъемных канатов // Подъемно-транспортное оборудование. 1986. № 17. С. 65–66.
9. Chernets M. V. Prediction of the life of a sliding bearing based on a cumulative wear model taking into account the lobing of the shaft contour // Journal of Friction and Wear. 2015. Vol. 36, Issue 2. P. 163–169. doi: 10.3103/s1068366615020038
10. Soldatenkov I. A. Evolution of contact pressure during wear of the coating in a thrust sliding bearing // Journal of Friction and Wear. 2010. Vol. 31, Issue 2. P. 102–106. doi: 10.3103/s1068366610020029
11. Mezrin A. M. Determining local wear equation based on friction and wear testing using a pin-on-disk scheme // Journal of Friction and Wear. 2009. Vol. 30, Issue 4. P. 242–245. doi: 10.3103/s1068366609040035
12. Togawa K., Arai S., Uwatoko M. 104 Influence of Traction Sheave P.C.D. Difference on Sheave and Rope // The Proceedings of the Elevator, Escalator and Amusement Rides Conference. 2012. Vol. 2011. P. 31–34. doi: 10.1299/jsmearc.2011.31
13. Ryu J. B., Chae Y. H., Kim S. S. A Fundamental Study of the Tribological Characteristics of Sheave Steel against a Wire Rope // Key Engineering Materials. 2005. P. 1382–1387. doi: 10.4028/0-87849-978-4.1382
14. Dykha A. V., Kuzmenko A. G. Solution to the problem of contact wear for a four-ball wear-testing scheme // Journal of Friction and Wear. 2015. Vol. 36, Issue 2. P. 138–143. doi: 10.3103/s1068366615020051
15. Determining the characteristics of viscous friction in the sliding supports using the method of pendulum / Dykha A., Aulin V., Makovkin O., Posonskiy S. // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 3, Issue 7 (87). P. 4–10. doi: 10.15587/1729-4061.2017.99823
16. Спосіб чистової та зміцнюючої обробки поверхонь тіл обертання складного профілю і пристрій для його здійснення: Пат. № 93252 UA. МПК В 24 В 39/04 / Бутаков Б. І., Шебанін В. С., Бутакова Г. С., Марченко Д. Д.; заявник і патентовласник Миколаївський державний аграрний університет. № а200815098; заявл. 29.12.2008; опубл. 25.01.2011, Бюл. № 2.
17. Устройство для чистовой и упрочняющей обработки поверхностей тел вращения сложного профиля: Пат. № 2493954 RF. МПК В 24 В 39/04, В 21 Н 1/22 / Бутаков Б. И., Шебанин В. С., Бутакова Г. С., Марченко Д. Д.; заявитель и патентообладатель Николаевский государственный аграрный университет. № 2010147733/02; заявл. 22.11.2010; опубл. 27.09.2013, Бюл. № 27.
18. Butakov B. I., Marchenko D. D. Promoting contact strength of steel by rolling // Journal of Friction and Wear. 2013. Vol. 34, Issue 4. P. 308–316. doi: 10.3103/s106836661304003x
19. Erdonmez C., Imrak C. Modeling and numerical analysis of the wire strand // J. of Naval Science and Engineering. 2009. Vol. 5, Issue 1. P. 30–38.