

## ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МАТЕМАТИЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ПРИ ВИБОРІ ОПТИМАЛЬНИХ РЕЖИМІВ ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ

Глушкова Д. Б.<sup>1</sup>, Рижков Ю. В.<sup>1</sup>, Багров В. А.<sup>1</sup>, Степанюк А. І.<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Встановлено оптимальні значення твердості, шорсткості поверхні сталі 38Х2МЮА, товщини покриття, що наноситься з точки зору зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу. Під час обробки результатів експерименту використовувався метод математичної моделі.

**Ключові слова:** підкладка, адгезія, відшаровування, шорсткість, зносостійкість, математична модель.

### Вступ

Широкі можливості відкриває використання плазмових покриттів, зокрема хімічне осадження з газового середовища, конденсація речовини в умовах іонного бомбардування (КІБ).

Однак при цьому велике значення має не тільки склад покриття, що наноситься, а й такі параметри, як твердість підкладки, шорсткість поверхні, на яку наноситься покриття, товщина покриття.

### Аналіз публікацій

Незалежно від призначення надійність, працездатність, чутливість та інші важливі параметри гідроприводів залежать не тільки від вибору принципової схеми, її конструктивного виконання, але, як відзначає більшість розробників [1–3] від матеріалу, способу обробки поверхонь.

Аналіз робіт [4–6] дозволяє подати структуру і будову деформованого тертям шару металу у вигляді двох моделей. Під час побудови моделей використовувалося наближення «цегляної кладки», де кожна «цеглина» відповідає окремому фрагменту.

Перша модель показує монотонне збільшення розмірів і зменшення взаємного розорієнтування фрагментів приповерхневого шару з відстанню від поверхні тертя. Це відповідає постійному зменшенню деформації в напрямку ковзання по глибині від поверхні.

Друга модель характеризується ступінчастим збільшенням розмірів фрагментів і зменшенням їх розорієнтування на відстані в кілька товщин фрагментів приповерхневого шару. Можна уявити, що в цьому випадку помірно пластично деформований метал покритий «кіркою» з гранично наклепаного шару.

На думку автора роботи [7], найбільш вірогідним поясненням поступової зміни будови шару металу, деформованого тертям, є процеси пластичної течії поверхневих і приповерхневих шарів при зношуванні, механізм якого запропонований і детально розглянутий в роботах [8–10]. Відповідно до цього механізму, в результаті контакту мікронерівностей відбувається їх перебіг і накопичення пластичної деформації. Це призводить до утворення максимально деформованого приповерхневого шару, який і формує надалі пластинчасті частинки зношуваності. Утворення такого шару супроводжується пересиченням активованого під час тертя металу киснем, елементами сполученого матеріалу або мастила, завдяки їх дифузії у процесі тертя [11].

В роботі [12] запропоновано варіанти поєднання матеріалів у парах тертя, в основу яких покладено властивості міцності матеріалів (тимчасова межа міцності основного матеріалу і деформованого у процесі тертя) і умови роботи (навантаження) цих матеріалів.

Основні висновки цих досліджень свідчать про те, що у процесі роботи вузла тертя відбувається формування приповерхневого шару за рахунок пластичної деформації. Залежно від міцності властивостей і прикладених навантажень вказані шари можуть мати структуру, що монотонно змінюється по глибині від поверхні, або таку, яка змінюється східчасто, у вигляді «кірки».

Також будова приповерхневих шарів справляє дуже сильний вплив на процес тертя і зношування за рахунок різних механізмів релаксації енергії, що підводиться до вузла тертя.

Під час виготовлення і ремонту деталей об'ємного гідроприводу застосовують хіміко-термічну обробку, дифузійне насичення і

поверхнєве легування для поліпшення їх робочих характеристик.

Хіміко-термічну обробку проводять з метою підвищення міцності від втоми, твердості, опору корозії, зносостійкість [4–6]. Один з найбільш широко застосовуваних методів хіміко-термічної обробки – цементация [7]. Цементация піддаються сталі з вмістом вуглецю не більше 0,2 %. У разі використання твердого карбюратора (насичує середовища) нагрів ведуть у печах, у разі використання газового карбюратора – в герметичних шахтних печах.

Відомі літературні дані про суміщення декількох процесів проведення цементация й азотування хромистих сталей, з метою підвищення втомної міцності. В роботі [2] описано новий спосіб хіміко-термічної обробки сталей, який приводить до утворення в поверхневому шарі нітриду і карбонітридів хрому.

Всі методи хіміко-термічної обробки є трудомісткими, відрізняються тривалістю процесів, і результати не завжди виправдовують витрати.

Аналіз досвіду ряду машинобудівних підприємств показує ефективність застосування іонно-плазмової технології [8–13].

Змінюючи властивості іонно-плазмових покриттів та умови їх нанесення, можна направлено впливати на зносостійкість, корозійну стійкість, формування їх стабільних характеристик, що сприяє підвищенню довговічності деталей машин і механізмів [14, 15].

#### Мета і постановка завдання

Метою роботи є дослідити і розробити оптимальний склад плазмового покриття і технологічні параметри його нанесення.

Тому одним із завдань є визначення шорсткості оброблюваної поверхні, що забезпечує найкращу адгезію покриття з основним металом.

#### Матеріал і методика дослідження

Матеріалом дослідження була сталь 38Х2МЮА. Термічна обробка – поліпшення, що забезпечує оптимальне поєднання міцності та пластичних властивостей. Після зазначеної термічної обробки твердість коливається в межах 42 ... 46 HRC.

Нами розроблено нове покриття системи Ti-Cr-N з наступним співвідношенням інгредієнтів, склад якого визначався методом фазового рентгенівського аналізу (% по масі) Ti від 10 до 75; Cr 5-70; N від 15-21. На нього одержано патент № 31864 від 25.04.2008р.

Товщина покриття, що наноситься, змінюється в межах від 3 до 6 мікрон, що відповідає добрій адгезії. Менша товщина не справляє істотного впливу на властивості виробу, а у випадку, коли товщина більше 6 мікрон, спостерігається відшаровування через погану адгезію з підкладкою.

Оскільки твердість набуває тільки цілих значень, то було вирішено провести п'ять серій експериментів (відповідно отримуючи значення твердості 42, 43, 44, 45, 46).

За допомогою теорії планування експерименту було проведено дослідження параметрів нанесення покриттів і встановлено зв'язок між твердістю матеріалу підкладки, шорсткістю поверхні, на яку наноситься покриття, товщиною покриття і зносом.

Відомо, що велике значення має не тільки склад покриття, що наноситься, а й такі параметри, як твердість матеріалу підкладки, шорсткість поверхні, на яку наноситься покриття, товщина покриття.

Як один з показників обрано твердість. Вона легко піддається перевірці в будь-якій точці виробу без шкоди для цілісності як до, так і після експлуатації.

Практика експлуатації виробів, виготовлених зі сталі з нанесенням на робочі поверхні плазмових покриттів, показала, що шорсткість поверхні виробу, на яке наноситься покриття, повинна бути не менше 0,48 Ra. В іншому випадку спостерігається відшаровування покриття, що наноситься, через погану адгезію його з підкладкою.

#### Результати експерименту та їх обговорення

Як прийнято в теорії планування експерименту [4, 5], товщину покриття і шорсткість будемо називати факторами і позначати  $X_1$  і  $X_2$ , а знос – відгуком і позначати  $Y$ . Виходячи з викладених вище міркувань, приймемо, що межами існування (зміни) факторів є  $X_{1\min} = 3$ ;  $X_{1\max} = 6$ ;  $X_{2\min} = 0,10$ ;  $X_{2\max} = 0,48$ . Інтервали варіювання факторів відповідно  $\Delta X_1 = 6 - 3 = 3$ ;  $\Delta X_2 = 0,48 - 0,1 = 0,38$ .

Спочатку був проведений факторний експеримент першого порядку, метою якого було отримати математичну модель залежності  $Y$  від  $X_1$  і  $X_2$  у вигляді лінійного полінома. Для цього був реалізований (при кожному значенні твердості) повний факторний експеримент типу  $2^n$ . Його результати подано в табл. 1–5.

Таблиця 1 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 42 HRC

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	6,5
2	3	0,48	7,3
3	6	0,1	3,3
4	6	0,48	4,5

Таблиця 2 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 43 HRC

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	6,3
2	3	0,48	7,0
3	6	0,1	4,0
4	6	0,48	4,4

Таблиця 3 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 44 HRC

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	5,6
2	3	0,48	6,2
3	6	0,1	3,6
4	6	0,48	4,0

Таблиця 4 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 45 HRC

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	3,5
2	3	0,48	3,8
3	6	0,1	2,1
4	6	0,48	2,4

Таблиця 5 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 46 HRC

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	4,4
2	3	0,48	4,8
3	6	0,1	3,0
4	6	0,48	3,4

Зауваження: за кожним рядком планів таблиць 1–5 проводилося два експерименти, а в таблицю в якості значення  $Y$  записувалося середнє значення.

За кожною з таблиць 1–5 розраховувалося рівняння регресії:

$$\hat{Y} = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \quad (1)$$

Результати розрахунку представлені в табл. 6.

Потім було проведено перевірку за критерієм Фішера за рівня значущості  $q=0,05$  адекватності отриманих рівнянь шляхом порівняння розрахункового критерію Фішера  $F_p$  з табличним  $F_T$ .

Таблиця 6 – Результати розрахунку коефіцієнтів лінійного рівняння регресії

Значення твердості	$b_0$	$b_1$	$b_2$
42	9,14	-1	2,63
43	11,76	-2,26	2,31
44	8,68	-0,82	1,45
45	7,62	-0,7	1,32
46	5,70	-0,47	1,05

У всіх випадках  $F_p > F_T$ , отже, рівняння не є адекватними. У зв'язку з цим було прийнято рішення продовжити експерименти, доповнивши отримані плани  $2^n$  до центральних композиційних планів другого порядку.

Реалізації цих планів подано в табл. 7–11.

Таблиця 7 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 42 HRC в результаті експериментів за планом другого порядку

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	6,5
2	3	0,48	7,3
3	6	0,1	3,3
4	6	0,48	4,5
5	4,5	0,29	5,2
6	4,5	0,1	4,8
7	4,5	0,48	5,4
8	3	0,29	6,8
9	6	0,29	4,2

Таблиця 8 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 43 HRC в результаті експериментів за планом другого порядку

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	6,3
2	3	0,48	7,0
3	6	0,1	4,0
4	6	0,48	4,4
5	4,5	0,29	5,2
6	4,5	0,1	4,8
7	4,5	0,48	5,4
8	3	0,29	6,8
9	6	0,29	4,2

Таблиця 9 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 44 HRC в результаті експериментів за планом другого порядку

№ досліджу	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	5,6
2	3	0,48	6,2
3	6	0,1	3,6
4	6	0,48	4,0
5	4,5	0,29	5,0
6	4,5	0,1	4,4
7	4,5	0,48	5,2
8	3	0,29	6,0
9	6	0,29	3,8

Таблиця 10 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 45 HRC в результаті експериментів за планом другого порядку

№ експ.	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	3,5
2	3	0,48	3,8
3	6	0,1	2,1
4	6	0,48	2,4
5	4,5	0,29	2,51
6	4,5	0,1	2,45
7	4,5	0,48	2,76
8	3	0,29	3,5
9	6	0,29	2,17

Таблиця 11 – Значення товщини покриття, шорсткості і зносу за твердості підкладки 46 HRC в результаті експериментів за планом другого порядку

№ експ.	$X_1$	$X_2$	$Y$
1	3	0,1	4,4
2	3	0,48	4,8
3	6	0,1	3,0
4	6	0,48	3,4
5	4,5	0,29	4,0
6	4,5	0,1	3,8
7	4,5	0,48	4,1
8	3	0,29	4,6
9	6	0,29	3,4

За кожній з таблиць розраховано рівняння регресії:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{22} X_2^2. \quad (2)$$

Таблиця 12 – Значення коефіцієнтів регресії

Значення твердості	Значення коефіцієнтів регресії					
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{22}$
42	11,76	-2,26	2,31	0,35	0,13	-2,77
43	10,82	-2,02	4,01	-0,26	0,14	-2,31
44	7,21	-0,66	3,98	-0,18	0	-2,77
45	7,57	-1,79	-0,99	0,02	0,15	2,91
46	5,25	-0,31	2,3	0	-0,01	-2,31

Для наочності графічне зображення поверхні відгуку дано на рис. 1–5.

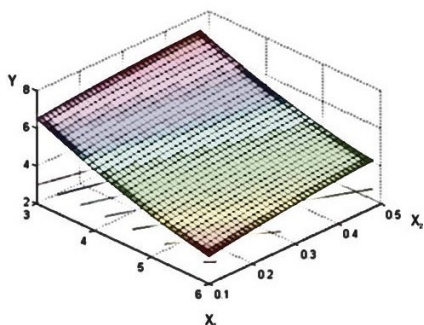


Рис. 1. Поверхня відгуку для твердості 42 HRC

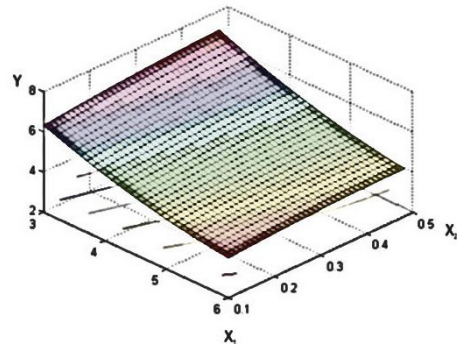


Рис. 2. Поверхня відгуку для твердості 43 HRC

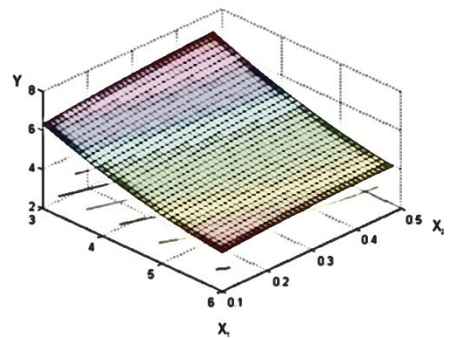


Рис. 3. Поверхня відгуку для твердості 44 HRC

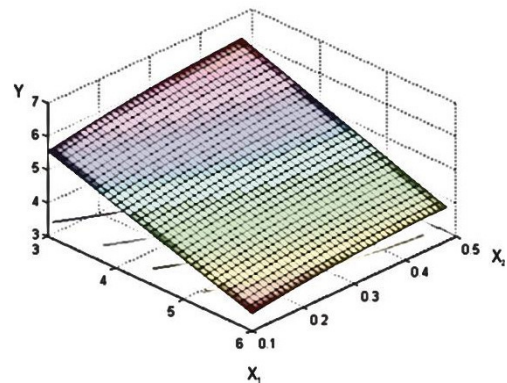


Рис. 4. Поверхня відгуку для твердості 45 HRC

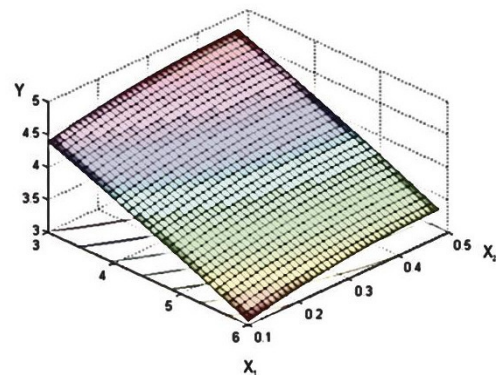


Рис. 5. Поверхня відгуку для твердості 46 HRC

Тепер знайдемо найменше значення функції  $Y$  в області:

$$\begin{cases} 3 \leq X_1 \leq 6 \\ 0,1 \leq X_2 \leq 0,4\delta. \end{cases} \quad (3)$$

Згідно відомої теореми це [5] значення приймається або на границі області, або у стаціонарній точці. Координати  $(X_1^0, X_2^0)$  стаціонарної точки визначаються як розв'язання системи рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Яка в нашому випадку має вигляд:

$$\begin{cases} b_1 + b_{12}X_2 + 2b_{11}X_1 = 0 \\ b_2 + b_{12}X_1 + 2b_{22}X_2 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Розв'язуємо її за формулами:

$$\begin{aligned} X_1^0 &= \frac{-2b_{22}b_1 + b_2b_{12}}{4b_{11}b_{22} - b_{12}^2}, \\ X_2^0 &= \frac{-2b_{11}b_2 + b_{12}b_1}{4b_{11}b_{22} - b_{12}^2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Отримуємо:

при $T=42$	$X_1^0=7,31$	$X_2^0=0,88$
при $T=43$	$X_1^0=7,60$	$X_2^0=0,43$
при $T=44$	$X_1^0=141,50$	$X_2^0=-3,76$
при $T=45$	$X_1^0=6,01$	$X_2^0=0,15$
при $T=46$	$X_1^0=-10,50$	$X_2^0=0,5$

Як ми бачимо, тільки в одному випадку при  $T=45$  можна вважати, що стаціонарна точка  $(X_1^0=6, X_2^0=0,15)$  належить області визначення факторів, в інших випадках найменше значень функції  $Y$  досягається на границі. Провівши прямий підрахунок, знайдемо найменше значення в кожному випадку.

У табл. 13 вказано координати екстремальної точки і значення  $Y$  в ній.

Як видно з таблиці 13, найменше значення зносу прогнозується за значення твердості, рівної 45, товщини покриття 6 і шорсткості 0,15.

Таблиця 13 – Значення відгуку в екстремальній точці

Значення твердості	Координати екстрем. точки		Значення відгуку
	$X_1$	$X_2$	
42	6	0,1	3,43
43	6	0,1	3,96
44	6	0,1	3,5
45	6	0,15	2,11
46	6	0,1	3,06

Для підтвердження цієї гіпотези був проведений експеримент з визначення зносостійкості за твердості 45, шорсткості 0,16 і товщини покриття рівній 6. Отриманий знос 2,2 дійсно виявився найменшим.

### Висновки

1. На підставі вивчення впливу плазмового покриття нітриду титану на триботехнічні характеристики деталей об'ємного гідроприводу встановлено, що необхідно враховувати такий важливий показник, як корозійна стійкість.

2. Розроблено нове покриття системи Ti-Cr-N при наступному співвідношенні інгредієнтів (% по масі) Ti від 10 до 75; Cr 5-70; N від 15-21. Методом фазового рентгенівського аналізу визначаємо склад нанесеного покриття. Новизна розробленого покриття підтверджена патентом №31864 від 25.04.08 р.

3. За допомогою теорії планування експерименту встановлено, що найменше значення зносу має місце за твердості поверхні, на яку наноситься покриття 45 HRC, шорсткості поверхні 0,16 і товщини покриття, що наноситься, 6 мкм.

### Література

- Bolshakov V. I., Hlushkova D. B., Kalinin A. V., Voronkov A. I., Nikitchenko I. N. Structural materials modification during plasmochemical, *Problems of Atomic Science and Technology*, 2018. vol. 117(5). p. 97-102.
- Аврунин Г. А., Грицай И. В., Кириченко И. Г. и др. Объемный гидропривод и гидропневмоавтоматика. *Учебное пособие*. Харьков. ХНАДУ, 2008. С. 412.
- Глушкова Д. Б. Сравнение износостойкости и нанотвердости сталей, поверхность которых упрочнена различными способами. сб. *Современные проблемы технологии металлов и качества сварных соединений. сб. наук. праць*, Харьков. ХНАДУ. 2014. С. 19 – 24.
- Налимов В. В., Чернова Н. А. Статические методы планирования экстремальных экспериментов. Москва. Наука, 1995. С. 340.

5. Хикс. Ч. Основные принципы планирования эксперимента. Москва. Мир, 2007. С. 406.
6. Глушкова Д. Б., Роик Т. А., Рыжков. Ю. В. Повышение износо- и коррозионной стойкости деталей объёмного гидропривода. Киев, КПИ. 2012. С. 138.
7. Павлов В. С. Визначення чинників, що впливають на граничне значення критерію міцності. *Вісник Хмельницьк. нац. ун-ту. Техніка науки*. Хмельницький, 2008. Вип. 1. С. 37-43.
8. Нахайчук О. В. Применение теории деформируемости к задачам технологической механики. *Проблемы трибологии*. Київ, 2006. Вип. 3. С. 83-87.
9. Мощевитый Ю. М. На пути устойчивого развития научных исследований. *Проблемы машиностроения*. Киев, 2002. Т.5. Вип. 2. С. 5-18.
10. Буше Н. А. Решенные и нерешенные задачи по совместимости трибо систем. *Трение и износ*. Москва, 1993. Т. 14. Вип. 1. С. 25-33.
11. Войтов В. А., Стадниченко Н. Г., Джус Р. Н., Билык А. П. Технология триботехнического восстановления. *Обзор и анализ перспектив. Проблемы трибологии*. Київ, 2005. Вип. 2. С. 86-94.
12. Ситников А. А. Назначение параметров точности при разработке конструкции деталей с износостойким покрытием. *Изд. Вузов. Машиностроение*. Москва, 2004. Вип. 10. С. 54-59.
13. Балтерм А. Упрочнение деталей машин. *Машиностроение*. Москва, 1978. С. 184.
14. Груздев В. В. Учет условий эксплуатации машин при решении задачи унификации технологических комплексов. *Проблемы техники*. Киев, 2003. Вип. 1. С. 77-81.
15. Костецкий Б. И. Фундаментальные основы и комплексный метод решения задач трибологии. *Надежность и долговечность машин и сооружений. Респ. межвед. сб.* Киев. Наукова думка. 1990. Вип. 18. С. 47-60.
4. Nalimov V. V., Chernova N. A. (1995) Statische metody' planirovaniya e'kstremal'ny'h e'ksperimentov. [Static methods for planning extreme experiments]. Moskva. Nauka, 340. [in Russian].
5. Hiks. Ch. (2007) Osnovny'e principy' planirovaniya e'ksperimenta. [Experimental Planning Fundamentals]. Moskva. Mir, 406. [in Russian].
6. Glushkova D. B., Roik T. A., Ry'jkov. YU. V. (2012) Povy'shenie iznoso- i korrozionnoy stoykosti detaley ob'e'mnogo gidroprivoda. [Improving the wear and corrosion resistance of volumetric hydraulic drive parts]. Kiev, KPI. 138. [in Russian].
7. Pavlov V. S. (2008) Vznachennya chinniki'v, sch'o vplivayut' na granichne znachennya kriteri'yu mi'cnosti'. [Determination of factors influencing the limit value of the strength criterion]. Vi'snik Hmel'nic. nac. un-tu. Tehni'ka nauki. Hmel'nic'kiy, 1. 37-43. [in Ukrainian].
8. Nahaychuk O. V. (2006) Primenenie teorii deformiruemosti k zadacham tehnologicheskoy mehaniki. [Application of the theory of deformability to problems of technological mechanics]. Problemi tribologi'i. Kii'v, 3. 83-87. [in Russian].
9. Mosch'evity'y YU. M. (2002) Na puti ustoychivogo razvitiya nauchny'h issledovaniy. [Towards Sustainable Research]. Problemy' mashinostroeniya. Kiev, 5. 2. 5-18. [in Russian].
10. Bushe N. A. (1993) Reshenny'e i nereshenny'e zadachi po sovместимости tribo sistem. [Solved and unsolved problems on tribo system compatibility]. Trenie i iznos. Moskva, 14. 1. 25-33. [in Russian].
11. Voytov V. A., Stadnichenko N. G., Djus R. N., Bily'k A. P. (2005) Tehnologiya tribotekhnicheskogo vosstanovleniya. [Tribotechnical Recovery Technology]. Obzor i analiz perspektiv. Problemi tribologi'i. Kii'v, 2. 86-94. [in Russian].
12. Sitnikov A. A. (2004) Naznachenie parametrov tochnosti pri razrabotke konstrukcii detaley s iznosostoykim pokry'tiem. [Assignment of accuracy parameters when designing parts with wear-resistant coating]. Izd. Vuzov. Mashinostroenie. Moskva, 10. 54-59. [in Russian].
13. Balterm A. (1978) Uprochnenie detaley mashin. [Hardening of machine parts]. Mashinostroenie. Moskva, 184. [in Russian].
14. Gruzdev V. V. (2003) Uchet usloviy e'kspluatacii mashin pri reshenii zadachi unifikacii tehnologicheskikh kompleksov. [Consideration of operating conditions of machines when solving the problem of unification of technological complexes]. Problemi tehniki. Kiev, 1. 77-81. [in Russian].
15. Kostec'kiy B. I. (1990) Fundamental'ny'e osnovy' i kompleksny'y metod resheniya zadach tribologii. [Fundamentals and a comprehensive method for solving tribology problems]. Nadejnost' i dolgovechnost' mashin i sooruzheniy.

### References

1. Bolshakov V. I., Hlushkova D. B., Kalinin A. V., Voronkov A. I., Nikitchenko I. N. (2018) Structural materials modification during plasmochemical, *Problems of Atomic Science and Technology*, 117(5). 97-102.
2. Avrunin G. A., Gricay I. V., Kirichenko I. G. i dr. (2008) Ob'emny'y gidroprivod i gidropnevmoavtomatika. Uchebnoe posobie. [Volumetric hydraulic drive and hydropneumatic automatic teak]. Har'kov. HNADU, [in Russian].
3. Glushkova D. B. (2014) Svravnenie iznosostoykosti i nanotverdosti staley, poverhnost' kotory'h uprochnena razlichny'mi sposobami. [Comparison of wear resistance and nanohardness of steel, the surface of which is hardened in various ways]. sb. Sovremenny'e problemy' tehnologii metallov i kachestva svarny'h soedineniy. sb. nauk. prac', Har'kov. HNADU. 19 - 24. [in Russian].

Resp. mejved. sb. Kiev. Naukova dumka. 1990.  
Vy'p. 18. S. 47-60. [in Russian].

**Глушкова Діана Борисівна**<sup>1</sup>, д.т.н., проф., зав. кафедри технології металів та матеріалознавства, 057-707 37-29, [diana.borisovna@gmail.com](mailto:diana.borisovna@gmail.com),

**Багров Валерій Анатолійович**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 063 420 84 07, [ha-vetabanca@ukr.net](mailto:ha-vetabanca@ukr.net)

**Рижков Юрій Володимирович**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. 067-577-14-35, [Grizlidze@gmail.com](mailto:Grizlidze@gmail.com).

**Степанюк Андрій Іванович**<sup>1</sup>, аспірант, кафедра технології металів та матеріалознавства, тел. +38 097-525-85-13, [Dioxid26@meta.ua](mailto:Dioxid26@meta.ua)

<sup>1</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 6102, Україна, м. Харків, вул. Ярослава Мудрого, 25

### Применение теории математического планирования при выборе оптимальных режимов поверхностного упрочнения

**Аннотация.** Установлены оптимальные значения твёрдости, шероховатости поверхности стали 38Х2МЮА, толщины наносимого покрытия с точки зрения износостойкости деталей объёмного гидропривода. При обработке результатов эксперимента использовался метод математической модели.

**Ключевые слова:** подложка, адгезия, отслаивание, шероховатость, износостойкость, математическая модель.

**Глушкова Диана Борисовна**<sup>1</sup>, д.т.н., заведующая кафедрой технологии металлов и материаловедения,

тел. 097-481-15-93, [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua)

**Багров Валерий Анатольевич**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, кафедра технологии металлов и материаловедения, тел. +38 063 420 84 07, [havetabanca@ukr.net](mailto:havetabanca@ukr.net)

**Рыжков Юрий Владимирович**<sup>1</sup>, к.т.н., доцент, кафедра технологии металлов и материаловедения, тел. 067-577-14-35, [Grizlidze@gmail.com](mailto:Grizlidze@gmail.com).

**Степанюк Андрей Иванович**<sup>1</sup>, аспирант, кафедра технологии металлов и материаловедения, 097-525-85-13, [Dioxid26@meta.ua](mailto:Dioxid26@meta.ua)

<sup>1</sup>Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, 61002, Украина, г. Харьков, ул. Ярослава Мудрого, 25.

### Application of the theory of mathematical planning when choosing the optimal modes of surface hardening

**Abstract.** The application of plasma coatings by the condensation of a substance under the conditions of ion bombardment opens up wide possibilities. The effect of nano-coatings on the properties of the material depends not only on the composition of the coat-

ing, but also on such parameters as the hardness of the base material, the purity of its surface and the thickness of the coating applied. The paper analyzes various models of the structure of the applied coatings. It has been established that the structure of the surface layers exerts a very strong influence on the process of friction and wear due to various mechanisms of energy relaxation. Chemical-thermal treatment is carried out in order to increase fatigue strength, hardness, corrosion resistance, wear resistance. One of the widely used methods of chemical-thermal treatment is cementation. Cementation is performed on steel with a carbon content of not more than 0.2%. When using a solid carburizer (it saturates the medium), heating is carried out in furnaces, when using a gas carburizer, in hermetic shaft furnaces. All methods of chemical-thermal treatment are laborious, differ in the duration of the processes, and the results do not always justify the costs. An analysis of the experience of a number of machine repair enterprises shows the effectiveness of using ion-plasma technologies. In order to obtain high wear and corrosion resistance, the formation of their stable characteristics, which contribute to increasing the durability of machine parts and mechanisms, it is necessary to determine the optimal coating conditions. In this regard, using the theory of experimental design, a study was made of the parameters of coating deposition and a relationship was established between the hardness of the substrate material, the surface roughness of the coating, the coating thickness and wear. As one of the indicators, hardness was chosen. It is easily verifiable anywhere in the product without compromising integrity, both before and after use. The practice of operating products made of steel with the application of plasma coatings on the working surfaces has shown that the surface roughness of the product on which the coating is applied should be at least 0.48 Ra. Otherwise, peeling of the coating is observed, which is applied due to poor adhesion of it and the substrate.

**Key words:** pads, adhesion, roughness, wear resistance, mathematical model.

**Hlushkova Diana**<sup>1</sup>, Doct. Sc., Chef of Department of Technology of Metals and Materials Science, tel: 057-707-37-29, [diana@khadi.kharkov.ua](mailto:diana@khadi.kharkov.ua)

**Bagrov Valery**<sup>1</sup>, Cand.Tech.Sci., the sen. lect, chair of technology of metals and materials technology, phone+38 063 420 84 07, [ha-vetabanca@ukr.net](mailto:ha-vetabanca@ukr.net)

**Ryzhkov Yuri**<sup>1</sup>, candidate of technical sciences, docent, department of technology of metals and materials science, tel.: 067-577-14-35, [Grizlidze@gmail.com](mailto:Grizlidze@gmail.com).

**Stepaniuk Andrey**<sup>1</sup>, Graduate student, Department of Metal Technology and Materials Science, tel.: +38 097-525-85-13, [Dioxid26@meta.ua](mailto:Dioxid26@meta.ua)

<sup>1</sup>Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.