

## ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ТРИБОСПОЛУЧЕНЬ ІОННО-ПЛАЗМОВИМ ПОКРИТТЯМ

Щукін О. В., Мусаєв З. Р.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Встановлено режим та параметри нанесення іонно-плазмового покриття на поверхню трибосполучень будівельних і дорожніх машин. Встановлено, що іонно-плазмове покриття  $TiN-Cr_2N$  забезпечує найбільшу зносостійкість зразків, на поверхню яких були нанесені різні види покриттів. Отримано, що для підвищення зносостійкості зразків, виготовлених із загартованої СВЧ сталі 65Г, необхідно використовувати іонно-плазмове покриття  $TiN-Cr_2N$ .

**Ключові слова:** знос, зносостійкість, іонно-плазмове покриття, іонне бомбардування, абразив, протизносні властивості.

### Вступ

Підвищення зносостійкості трибосполучень різних вузлів машин, незважаючи на певні успіхи в цьому напрямі, залишається актуальним завданням. Особливо це стосується трибосполучень, які працюють у вкрай важких абразивних умовах (наприклад, робочі органи землерійно-транспортних машин (ЗТМ), знос яких становить, в середньому, 0,15 мм/год [1]).

Для підвищення зносостійкості трибосполучень вже недостатньо збільшувати конструкційну міцність трибоповерхні, оскільки в більшості випадків зношування від впливу абразивних частинок відбувається з великою швидкістю [2].

Однією з основних властивостей, що впливають на зносостійкість, є твердість трибоповерхні, однак, єдиної думки дослідників з цього приводу немає. Це пов'язано з тим, що твердість не що інше, як функція зміни сили міжатомних зв'язків через різну концентрацію напруги при різних видах обробки [1–3]. Застосування мастильних матеріалів (там, де це за умовами експлуатації можливо), як правило, далеко не повною мірою вирішує завдання, оскільки механічна та теплова навантаженість трибосполучень постійно збільшуються з метою підвищення продуктивності машин.

### Аналіз публікацій

На сьогоднішній день основними методами нанесення зносостійких плазмових покриттів, які істотно підвищують експлуатаційні характеристики матеріалів трибоповерхонь, є хімічне осадження з газового середовища та конденсація твердої речовини в умовах іонного бомбардування (КІБ) [4, 5]. Найбільш раціональним методом є КІБ, основною

перевагою якого є можливість регулювання температури процесу (~300-800 °С). Це дозволяє наносити покриття на деталі, які виготовлені з різних матеріалів [5]. Такий принцип робить представлений метод універсальним та домінуючим серед подібних технологій, що підвищують експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема зносостійкість.

Однак даний метод для нанесення іонно-плазмового покриття (ІПП) на трибоповерхні, що працюють в умовах відсутності мастильного матеріалу, до цього часу не застосовувався. Разом з тим використання методу КІБ являє собою великий інтерес через те, що він дозволяє варіювати складом покриття і як результат, отримувати корозійностійкі та зносостійкі з високими характеристиками міцності шари, які володіють надійною адгезією з основним металом.

Спираючись на всі вищевикладені факти, актуальною проблемою є вибір раціонального складу та режиму нанесення покриття, яке дозволило б вирішити проблему підвищення недостатнього ресурсу трибосполучень при мінімальних витратах на технологію нанесення останнього.

### Мета та постановка завдання

Встановлення впливу на зносостійкість трибоповерхні (ІПП) системи  $TiN-Cr_2N$  методом конденсації твердої речовини в умовах іонного бомбардування.

### Дослідження трибосполучень з іонно-плазмовим покриттям

Необхідно виділити такі завдання лабораторних експериментальних досліджень, вирішення яких дозволить встановити склад пок-

риття, необхідного для того, щоб значно підвищити зносостійкість трибосполучень, а також ефективність цього покриття. До них віднесемо:

- вибір та обґрунтування матеріалу складу ІПП, а також технології його нанесення на трибоповерхню, наприклад, робочого органу (РО) ЗТМ;

- визначення режиму напилення ІПП на поверхню ріжучих елементів, які б забезпечили РО, що працюють в абразивному ґрунті без змащувального матеріалу, необхідними фізико-механічними властивостями;

- визначення впливу обраного покриття на знос зразків, які працюють в абразивному середовищі;

### Вибір матеріалів складу іонно-плазмового покриття

Для нанесення ІПП використовувалася установка Булат-3Т (рис. 1 та 2) [5].



Рис. 1. Загальний вигляд установки Булат-3Т

Методика нанесення ІПП включає два етапи [6]:

1. Очищення поверхні зразка з наступним нагріванням і активацією поверхні підкладки бомбардуванням іонами титану, що осаджується.

2. Поступове осадження матеріалу покриття при безперервному іонному бомбардуванні конденсату в такому режимі, який забезпечив би формування плівки з потрібними фізико-механічними властивостями.

В результаті іонного бомбардування іонами та нейтральними електронами відбувається видалення газів з поверхні деталі, а також її нагрівання. Таке бомбардування дає можливість отримати атомночисту поверхню деталі, за рахунок чого значно підвищується швидкість реакції осадження матеріалу ІПП на поверхню деталі [6]. Разом з тим нагрівання, яке супроводжує іонне бомбардування, забезпечує посилення дифузійних процесів взаємодії ІПП з основним металом [5]. При

цьому температура підкладки (трибоповерхні) контролюється інфрачервоним пірометром «Смотрич».

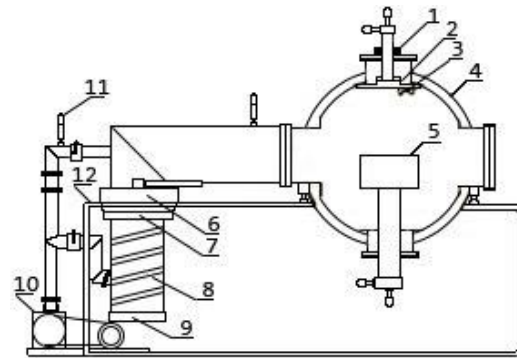


Рис. 2. Принципова схема встановлення Булат-3Т: 1 – фокусуюча котушка; 2 – катод; 3 – підпалювальний електрод; 4 – камера-анод; 5 – підкладка; 6 – азотна пастка; 7 – водяна пастка; 8 – високовакуумний агрегат; 9 – нагрівач; 10 – форвакуумний насос; 11 – манометрична лампа; 12 – система водяного охолодження установки

Перелічені вище процеси, що проходять на поверхні деталі, забезпечують відносно високу адгезію покриття [5, 7].

Покриття, що наноситься, складається з злиття п'яти шарів, що чергуються,  $\text{Cr}_2\text{N}$  і чотирьох шарів  $\text{TiN}$ . У процесі нанесення багатшарового покриття відбувається відпуск сталі 65Г (основний матеріал РО ЗТМ), що призводить до зниження твердості до HRC30. Після термообробки твердість підкладки відновлюється та становить HRC 50-54.

Для вибору складу ІПП для РО ЗТМ були проведені лабораторні випробування на машині тертя СМЦ-2 (рис. 3, 4).



Рис. 3. Загальний вигляд тертя СМЦ-2

Випробування машиною тертя СМЦ-2 проводилися за схемою «колодка-ролик» (рис. 4), яка імітує умови роботи нижчих кінематичних пар.

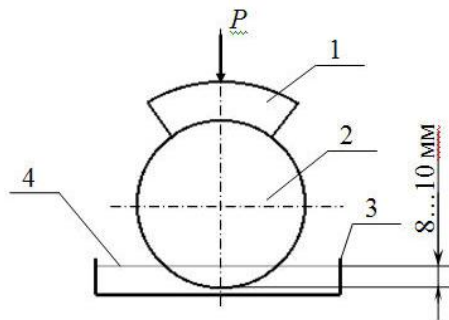


Рис. 4. Схема випробувань колодки та ролика на машині тертя СМЦ-2: 1 – колодка; 2 – ролик; 3 – кювета; 4 – рівень робочої рідини з абразивом (кварцовим піском)

Характеристика зразків була така:

– матеріал – сталь 65Г (хімічний склад наведено у табл. 1);

– твердість використовуваної сталі – 55HRC;

– чистота поверхонь – 0,4 мкм.

Такі показники сталі, і навіть її хімічний склад (табл. 1) повністю відповідають матеріалу, з якого виготовляються реальні РО ЗТМ.

Таблиця 1 – Хімічний склад роликів та колодок, виготовлених із сталі марки 65 Г та використаних при випробуваннях

Найменування деталі	Вміст елементів, %				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
Ролики і колодки	0,68	0,22	1,05	0,03	0,07

Діаметр роликів становив 50 мм, ширина – 12 мм, ширина колодки – 10 мм, частота обертання ролика – 500 об/хв. Ролики занурювалися в кювету з густим абразивним середовищем, що складається з мастила І-Г-А-32 і кварцового дрібнозернистого піску з середнім розміром абразивних частинок 0,4 мм. Концентрація абразиву (кварцового піску) у мастилі становила 30% за обсягом.

Як показали пошукові експерименти та досвід проведення аналогічних випробувань на машині тертя СМЦ-2, навантаження на випробуванні зразки не повинно перевищувати 200 Н, оскільки в іншому випадку спостерігається утворення задирів на трибоповерхні зразків [8].

Режим випробувань зразків, виходячи з виснажених міркувань, був наступний. Чотири партії роликів і колодок зазнавали приробку протягом 15 хвилин при навантаженні, що відповідає вазі каретки машини. Потім випробування тривали протягом 4 годин 45 хвилин для кожної з чотирьох партій колодок при навантаженні 50 Н (перша партія), 100 Н (друга партія), 150 Н (третя партія) та 200 Н (четверта партія).

Зношування зразків визначали за втратою ними маси за час випробування за допомогою зважування на аналітичних вагах ВЛА-200г-М з точністю до  $\pm 0,0001$  г з доведенням зразків до постійної маси.

Кожна з чотирьох партій роликів була поділена на чотири групи:

– перша група – 8 роликів із гартуванням СВЧ при температурі 910°C на глибину 3–4 мм;

– друга група – 8 роликів з ІПП TiN;

– третя група – 8 роликів із ІПП MoN;

– четверта група – 8 роликів із ІПП TiN-Cr<sub>2</sub>N.

Вибір таких матеріалів покриття пояснюється тим, що дані ІПП найчастіше використовуються для деталей ЗТМ з метою зниження їх зносу [4, 9].

Для отримання достовірних результатів експериментів проводилися по вісім разів із використанням нових зразків кожної групи та нових порцій абразивного середовища. Така повторюваність експериментів обумовлена досвідом проведення зносних випробувань [10, 11] та розраховувалася ітераційним методом згідно з [12]:

$$n = \frac{t^2 \cdot \sigma^2}{\Delta^2}, \quad (1)$$

де  $t$  – норма, що визначає гарантовану вірогідність відхилення середньої малої вибірки від середньої генеральної сукупності;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення;  $\Delta$  – абсолютна помилка.

Результати випробувань на машині тертя СМЦ-2 наведено на рис. 5.

З графіків, поданих на рис. 5, слід, що сумарне зношування зразків після випробувань на машині тертя СМЦ-2 збільшується прямо пропорційно підвищенню навантаження на них. При цьому найбільше зношування при всіх навантаженнях має місце при випробуваннях зразків, підданих гартуванню СВЧ, а найменший – у загартованих СВЧ зразків, на які було нанесено ІПП TiN-Cr<sub>2</sub>N (у 2,78 рази

при навантаженні 50 Н і в 2,08 разу при навантаженні 200 Н). Привертає увагу той факт, що в міру підвищення навантаження різниця у зносі всіх чотирьох партій зразків збільшується.

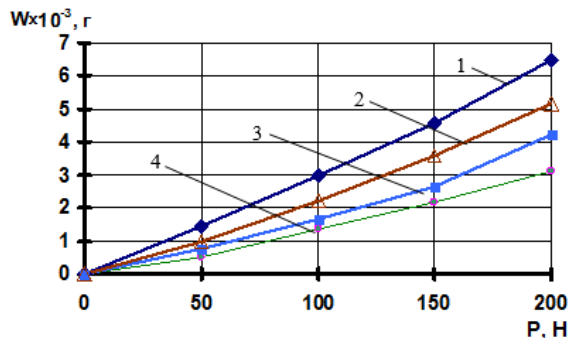


Рис. 5. Залежність зносу  $W$  досліджуваних матеріалів від навантаження  $P$ , що додається: 1 – сталь 65Г із гартуванням СВЧ; 2 – сталь 65Г із покриттям MoN; 3 – сталь 65Г із покриттям TiN; 4 – сталь 65Г з покриттям TiN-Cr<sub>2</sub>N

Зношування зразків з ППІ MoN і TiN при всіх навантаженнях менше порівняно зі зразками після гарту СВЧ, але більше, ніж при використанні ППІ TiN-Cr<sub>2</sub>N.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що для підвищення зносостійкості зразків, виготовлених із загартованої СВЧ сталі 65Г, необхідно використовувати ППІ TiN-Cr<sub>2</sub>N.

### Висновки

Покриття системи TiN-Cr<sub>2</sub>N збільшує зносостійкість випробуваних зразків (трисполучень) за рахунок наявності нітриду титану і сприяє підвищенню корозостійкості за рахунок наявності хрому.

Отримані результати лабораторних випробувань дають змогу прогнозувати підвищення зносостійкості трисполучень у реальних умовах їх експлуатації (особливо при обмеженому змащуванні або взагалі без нього).

### Література

1. Пилюшина Г.А. Особенности изнашивания рабочих органов строительных и дорожных машин. Новые материалы и технологии в машиностроении. БГИТА, 2009.
2. Мощенок В.И., Тарабанова В.П., Лалазарова Н.А., Проскурня Н.А., Выбор материала и метода повышения износостойкости режущих элементов бульдозеров. Вестник ХНАДУ. 2007. № 38, С. 122–125.

3. Е.С. Венцель, А.В. Шукин, Повышение износостойкости рабочих органов землеройно-транспортных машин. Харьков, 2015.
4. Т.А. Роик, Д.Б. Глушкова, Ю.В. Рыжков, Повышение износо- и коррозионной стойкости деталей объемного гидропривода нанесением ионно-плазменных покрытий. Харьков, 2012.
5. Роик Т.А., Глушкова Д.Б. Повышение стойкости пресс-форм литья под давлением медных сплавов. Харьков, 2013.
6. Мухин В.С., Киреев Р.М., Шехтман С.Р., Технология нанесения вакуумных ионно-плазменных наноструктурированных покрытий Ti-TiN. Технология машиностроения. 2011, Вип 4, С. 212-214.
7. С.С. Дяченко, І.В. Пономаренко, Іонно-плазмова обробка як фактор підвищення конструкційної міцності сталевих виробів. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2009. № 1. С. 71–77,
8. С.С. Венцель, О.В. Орел, О.В. Щукін, Підвищення якості мастил, палив і трибовузлів машин. Харків: ФОП Бровін О.В., 2017.
9. Гладков В.Ю., Карцев С.В., Кравченко И.Н., Афонин Н.В. Современная технология воздушно-плазменного напыления износостойких покрытий. Строительные и дорожные машины. 2003. № 5. С. 30-34.
10. Венцель Е.С., Жалкин С.Г., Данько Н.И., Улучшение качества и повышение сроков службы нефтяных масел. Харьков : УкрГАЗТ, 2003.
11. Григорьев Ю.Д. Методы оптимального планирования эксперимента. St. Petersburg: «Lan», 2015.
12. Меледина Т.В., Данина М.М. Методы планирования и обработки результатов научных исследований. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО; ИХиБТ, 2015.

### References

1. Pilyushina G.A. Features of wear of the working bodies of construction and road machines. New materials and technologies in mechanical engineering. BGI-TA, 2009.
2. Moshchenok V.I., Tarabanova V.P., Lalazarova N.A., Proskurnya N.A., Choice of material and method for increasing the wear resistance of bulldozer cutting elements. Bulletin of HNA-DU. 2007. No. 38, pp. 122–125.
3. E.S. Wenzel, A.V. Shchukin, Improving the wear resistance of the working bodies of earth-moving machines. Kharkov, 2015.
4. T.A. Roic, D.B. Glushkova, Yu.V. Ryzhkov, Improving the wear and corrosion resistance of parts of a volumetric hydraulic drive by applying ion-plasma coatings. Kharkov, 2012.
5. Roik T.A., Glushkova D.B. Improving the durability of molds for pressure casting of copper alloys. Kharkov, 2013.
6. V. S. Mukhin, R. M. Kireev, and S. R. Shekhtman, Technology for deposition of vacuum ion-plasma

- nanostructured Ti-TiN coatings. Engineering technology. 2011, VIP 4, pp. 212-214.
7. S.S. Dyachenko, I.V. Ponomarenko, Ion-plasma processing as a factor in the development of the structural strength of steel mills. New materials and technologies in metallurgy and machine-building. 2009. No. 1. pp. 71-77,
  8. E.S. Vencel, O.V. Orel, O.V. Shchukin, Advancement of oily oil, fire and tribovuzliv machines. Kharkiv: FOP Brovin O.V., 2017.
  9. Gladkov V.Yu., Kartsev S.V., Kravchenko I.N., Afonin N.V. Modern technology of air-plasma spraying of wear-resistant coatings. Construction and road machines. 2003. No. 5. pp. 30-34.
  10. Vencel E.S., Zhalkin S.G., Danko N.I. Improvement of quality and increase of service life of petroleum oils. Kharkov: Ukr-GAZhT, 2003.
  11. Grigoriev Yu.D. Methods for optimal planning of the experiment. St. Petersburg: Lan, 2015.
  12. Meledina T.V., Danina M.M. Methods of planning and processing the results of scientific research. St. Petersburg: NRU IT-MO; IKiBT, 2015.

**Щукін Олександр Вікторович**, к.т.н., доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, alexhome88@gmail.com, тел. +38 097-996-76-41,

**Мусаєв Заур Разілович**, к.т.н., асистент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, zaur.musaiev92@gmail.com, tel. +38 098-044-43-84.

#### **Increase in wear resistance of tribo-couplers due to ion-plasma coating**

**Abstract. Problem.** Determination of the impact on the wear resistance of the tribosurface (IPP) of the TiN-

Cr<sub>2</sub>N system by the method of solid matter condensation under ion bombardment conditions. **Goal.** The goal is studying of the effect on the wear resistance of the tribosurface of the TiN-Cr<sub>2</sub>N system by the method of solid substance condensation under ion bombardment conditions. **Methodology.** The choice of the composition for ion-plasma pavement for tribocouplers laboratory tests were carried out on the SMC-2 friction machine. The wear test samples were subjected to ion-plasma coatings such as MoN, TiN and TiN-Cr<sub>2</sub>N. **Results.** As a result of laboratory tests it was found that ion-plasma coating of TiN-Cr<sub>2</sub>N improves the wear resistance of the tribocouplers by about 2.0 times. Furthermore, the wear of the samples with the ion plasma coating TiN and MoN at all loads is less than of the samples after quenching by high frequency but higher than when using the coating TiN-Cr<sub>2</sub>N.

**Originality.** The coating of the TiN-Cr<sub>2</sub>N system increases the wear resistance of the tested samples (tribocompounds) due to the presence of titanium nitride and contributes to the increase in corrosion resistance due to the presence of chromium. **Practical value.** The obtained results of laboratory tests make it possible to predict an increase in the wear resistance of tribocombinations in real conditions of their operation (especially with limited lubrication or without it at all).

**Key words:** wear, wear resistance, ion-plasma coating, ion bombardment, abrasive, anti-power.

**Shchukin Oleksandr**, Cand. of Technical Sciences, Assistant Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, alexhome88@gmail.com tel. +38 097-996-76-41,

**Musaiev Zaur.**, Cand. of Technical Sciences, Assistant Professor, Kharkiv National Automobile and Highway University, tel. +38 098-044-43-84, zaur.musaiev92@gmail.com