

УДК 621.891

DOI: 10.18372/0370-2197.3(100).17896

М. В. КІНДРАЧУК, В. В. ХАРЧЕНКО, В. Є. МАРЧУК, І. А. ГУМЕНЮК,  
М. А. ГЛОВИН, І. В. КОСТЕЦЬКИЙ

Національний авіаційний університет, Україна

## КОМБІНОВАНИЙ МЕТОД ПОВЕРХНЕВОГО ЗМІЦНЕННЯ ШВИДКОРІЗАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

*Розглянуто структуру, фазовий та хімічний склад, мікротвердість та мікрокрихкість поверхневих зон сталі Р6М5 після хіміко - термічної обробки: азотування з наступним титануванням та хромуванням. Наведено результати дослідження впливу фізико - механічних властивостей комплексних покриттів та дискретної лазерної обробки сталі на їх зносостійкість. Аналіз отриманих даних показав, що більшу зносостійкість в умовах тертя ковзання мають азотохромовані покриття з додатковим зміцненням лазерною обробкою сталі, яка слугує підкладкою для покриттів.*

**Ключові слова:** сталь Р6М5, азототитанування, азотохромування, дискретна лазерна обробка, тертя ковзання, зносостійкість.

**Вступ.** Захисні покриття на інструментах та деталях машин широко використовуються в теперішній час з метою підвищення працездатності виробів [1–3]. Дослідження останніх років направлені на покращення властивостей відомих та створення нових видів покриттів та технологій їх нанесення, розширення номенклатури матеріалів для поверхневої обробки. Для зміцнення інструментальних сталей, зокрема швидкорізальної Р6М5, широко застосовується азотування. Проте недоліками процесу азотування можна вважати тривалість обробки, невисоку якість отриманого поверхневого дифузійного шару, недостатню зносостійкість. В роботі [4] показано, що лазерна обробка (до хіміко – термічної обробки) сталей за певних умов може суттєво прискорювати процеси азотування. Перспективним методом зміцнення інструменту також є створення зносостійких дискретних композиційних покриттів із застосуванням концентрованих джерел енергії [5].

Знайшли використання як моно- так багат шарові покриття на сталях і твердих сплавах, сполуки перехідних матеріалів IV – VI груп періодичної системи (карбід титану TiC, нітрид титану TiN, борид титану TiB<sub>2</sub> тощо). Композиції покриття – сталь поєднують високу твердість та хімічну стабільність, корозійну та зносостійкість, низький коефіцієнт тертя покриттів із в'язкістю основи [6].

В роботі [7] наведено результати дослідження фазового складу та будови багат шарових покриттів за участю бар'єрів на основі карбідів та нітридів титану, ванадію, хрому. Технологія хіміко – термічної обробки поєднує два процеси – азотування і наступної дифузійної металізації. При цьому суттєво підвищується зносостійкість сталей в умовах тертя ковзанням та абразивного зношування. Проте ця технологія обмежує її використання для зміцнення важконавантажених деталей вузлів тертя та інструменту, що піддаються високим локальним навантаженням. Оскільки дифузійна металізація проводиться за температури 1050 °С, сталеві основа відпускається і не може слугувати твердою підкладкою для твердого покриття.

**Мета дослідження** полягає в отриманні на сталі Р6М5 комплексних покриттів за участю азоту титану і хрому, дискретній лазерній обробці основи під

покриттями, встановлені їх будови, фізико – механічних та триботехнічних властивостей.

**Методика дослідження.** Як об'єкт дослідження було обрано сталь Р6М5. Комплексні титаноазотовані та титанохромовані покриття наносили в закритому реакційному просторі за умов зниженого тиску [1]. Як вихідний реагент використовували порошки титану та хрому, деревне вугілля, чотирихлористий вуглець. Дифузійну металізацію проводили при температурі 1050 °С протягом 2 - 4 годин Насичення азотом відбувалося при температурі 540°С протягом 21 години в атмосфері аміаку при ступені дисоціації 40 – 45%.

Процес комплексного насичення азотом і металами складався з двох послідовних етапів: азотування та наступної металізації (титанування, хромування).

Дискретну лазерну обробку виконували на установці ЛАТУС – 31, з потужністю 103-105 Вт/см<sup>2</sup>. Фазовий склад покриттів визначали на рентгенівському дифрактометрі ДРОН УМ–1 у мідному монохроматизованому випромінюванні. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі «Neophot 21». Мікротвердість вимірювали на приладі ПМТ–3 при навантаженні на інденторі 0,5 – 1,0 Н. Рентгеноспектральний аналіз проводили на мікроскопі РЕМ – 200. Дослідження зносостійкості покриттів в умовах тертя ковзання без змащування проводили за схемою вал – вкладиш на машині тертя М22-М у парі із загартованою сталлю Р6М5 (HRC61-63).

**Результати дослідження та їх обговорення.** Першим етапом процесу азототитанування, азотохромування було проведено азотування. На другому етапі реалізовували процес дифузійної металізації, а саме, титанування та хромування. Насичення проводили в закритому реакційному просторі в середовищі хлору.

В табл. 1 наведені результати досліджень фазового складу, товщини, мікротвердості та мікрокрихкості покриттів.

Таблиця 1

**Результати рентгеноструктурного аналізу та мікромеханічні властивості покриттів на сталі Р6М5 після ХТО: азотування  $t = 540$  °С,  $\tau = 36$  год., металізація  $t = 1050$  °С,  $\tau = 4$  год**

Вид обробки	Фазовий склад	Товщина, мкм	Мікротвердість, ГПа	Показник мікрокрихкості
Азотування	Fe <sub>2-3</sub> N	8,0	6,3	12,5
	Fe <sub>4</sub> N	8,0	13,6	10,2
Азототитанування	TiC	6,3	36,4	85,2
	TiN	3,0	30,4	42,4
Азотохромування	Cr <sub>23</sub> C <sub>6</sub>	5,0	18,2	20,4
	Cr <sub>7</sub> C <sub>3</sub>	4,0	16,2	17,8
	Cr <sub>2</sub> N	4,0	8,8	15,4

Триботехнічні дослідження в умовах тертя ковзання без змащування проводили за схемою вал – вкладиш з вимірюванням лінійного зносу.

В роботі був проведений металографічний та мікрорентгеноспектральний аналізи поверхонь зношування сталі Р6М5 з різним типом покриття. Відомо, що на поверхнях тертя одночасно протікає велика кількість процесів: потік тепла,

потік речовини, фізико - хімічні процеси взаємодії тіл із середовищем, деформація, структурні і фазові перетворення та ін. В точках локального контакту покриття-контртіла виникає напруження зсуву, що перевищує межу пружності, при цьому температура матеріалу підвищується. Відбувається зрив матеріалу з верхівок виступів. При цьому ділянки контактної поверхні залишаються чистими і хімічно активними. В результаті утворюються і при подальшому русі одразу руйнуються численні містки мікрозварювання двох дотичних поверхонь. При цьому механічна енергія руху перетворюється в теплову. В результаті локального підвищення температури починається формування оксидів елементів покриття та основи. Встановлено, що на поверхні тертя азототитанованої сталі присутня значна кількість кисню (табл. 2), який зв'язаний в оксиди.

Таблиця 2

**Розподіл хімічних елементів на поверхні зношування сталі Р6М5 після азототитанування: азотування  $t = 540\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 36\text{ год.}$ , титанування  $t = 1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\tau = 4\text{ год}$**

Зона	№ спектру	Вміст елементів %, (мас)							
		C	Ti	Fe	V	W	O	Cr	Si
А	1	22,19	8,05	51,34	-	12,53	3,80	1,86	-
	2	19,30	40,71	30,68	-	1,44	7,61	0,26	-
Б	3	+	3,54	59,22	0,51	6,86	28,57	1,31	-
	4	+	2,36	60,76	0,39	7,28	27,55	1,66	-
	9	+	0,89	65,49	0,36	7,52	24,08	1,65	-
В	5	+	4,05	95,34	-	-	-	0,29	0,31
	6	+	1,92	94,14	-	-	3,37	-	0,56
	7	+	-	99,64	-	-	-	-	0,36
	8	+	-	91,49	-	1,78	6,39	0,34	-

Після азототитанування на поверхні зношування можна розрізнити три зони: темна (зона А), сіра (зона Б), біла (зона В). Більш темній зоні, зоні А, відповідає фазовий склад поверхні після азототитанування (спектр 1, 2), тобто карбід титану  $\text{TiC}$ . Крім вуглецю та титану ця зона містить кисень, залізо, вольфрам та хром. В даному випадку хром та вольфрам є складовими контртіла сталі Р6М5. Можна говорити про те, що W і Cr до даної зони потрапляють в процесі тертя з поверхні контртіла, утворюючи оксиди.

Останнє підтверджується значним вмістом на поверхні в зоні А кисню. В зоні Б, що безпосередньо примикає до основи (зона В), зафіксована максимальна кількість кисню. Скоріше за все це пов'язано з утворенням оксидів титану та заліза. Також в даній зоні, як і в зоні А присутні W, Cr і незначна кількість V. Світла зона (В) представляє собою основу сталі Р6М5. В ній присутні окремі сірі оксидні ділянки незначної площі, витянуті за напрямком ковзання. Це пов'язано з утворенням оксидів титану і заліза. Плівка оксиду титану  $\text{TiO}_2$  (рутила) має добрі захисні властивості і в зоні контакту ізолює поверхню карбіду та матеріалу основи від взаємодії з матеріалом контртіла. Окремі області сірого кольору на поверхні зношування, сформувалися шляхом перенесення часток оксиду  $\text{TiO}_2$  або зруйнованого покриття  $\text{TiC}$ .

Металографічним аналізом поверхні зношування сталі після азотохромування встановлено формування в результаті тертя трьох зон (табл. 3).

Зона А- поверхня сталі, що складається з вуглецю, азоту, хрому та заліза. На відміну від процесів азототитанування кисень в даній зоні не виявлено. Лише в

точці спектру № 3 присутня невелика кількість кисню. Мікрорентгено-спектральним аналізом встановлено, що основним елементом зони Б є кисень, залізо, вуглець та хром. Також в даній зоні знаходяться вольфрам та ванадій, які потрапили до даної зони за рахунок транспортування в процесі тертя елементів контртіла зі сталі Р6М5. Зона В представляє собою основу сталі Р6М5 після зносу. Основним елементом даної ділянки є кисень та залізо.

Таблиця 3

**Розподіл хімічних елементів на поверхні зношування сталі У8А після азотохромування: азотування  $t = 540$  °С,  $\tau = 36$  год., хромування  $t = 1050$  °С,  $\tau = 4$  год**

Зона	№ спектру	Вміст елементів %, (мас.)								
		C	N	Fe	V	W	O	Cr	Si	Mn
А	1	+	4,52	-	-	-	-	4,52	-	-
	2	+	4,70	-	-	-	-	95,30	-	-
	3	+	6,71	1,02	-	-	2,14	90,13	-	-
Б	6	+	-	56,59	0,30	4,91	31,02	7,17	-	-
	7	+	-	57,12	0,38	4,50	31,01	6,99	-	-
В	4	+	-	96,14	-	-	-	3,05	0,32	0,49
	5	+	-	98,67	-	-	-	0,98	0,36	-
	8	+	-	99,19	-	-	-	0,47	0,35	-

Очевидно, що матеріал покриття приймає активну участь у формуванні вторинних структур. Крім того, окремі елементи зруйнованого та окисленого покриття закріплюються на поверхні тертя. Таким чином, формується структура – м'яка основа з твердими включеннями карбідних та оксидних фаз, що гальмує зношування і сприяє підвищенню зносостійкості.

В табл. 4 наведено результати триботехнічних досліджень покриттів. В результаті випробувань сталі Р6М5 після різних видів обробки за схемою вал – вкладиш в умовах тертя ковзання без змащування встановлено, що за зменшенням коефіцієнта тертя та величини зносу покриття можна розташувати наступним чином: азотування, азототитанування, азотохромування. Висока зносостійкість покриттів  $Cr_{23}C_6 \rightarrow Cr_7C_3 \rightarrow Cr_2N$  визначається комплексом їх властивостей. В першу чергу низьким коефіцієнтом тертя та значною пластичністю, про що свідчить їх низька мікрокрихкість.

Варто відзначити, що при більш жорстких умовах випробування ( $P = 80$ Н) за зносостійкістю азотована сталь наближається до азохромованої та азототитанової, що обумовлено зниженням твердості сталі при високотемпературній металізації (1050 °С) до 25–30 HRC. В той час, як при азотуванні ( $t = 640$  °С) зберігається твердість вихідної загартованої сталі.

Таблиця 4

**Зносостійкість сталі Р6М5 в залежності від виду обробки та навантаження при швидкості 0,5 м/с**

Вид обробки	Знос, мкм, при навантаженні, Н		
	40	60	80
Азотування	15,2	21,5	30,5
Азототитанування	8,1	14,0	23,0
Азототитанування + л.о.	7,5	9,8	12,3
Азотохромування	6,0	10,7	20,1
Азотохромування + л.о.	5,9	7,5	10,5

Тому зразки після азототитанування і азотохромування піддавали дискретній лазерній обробці з метою гартування сталі, як підкладки під покриттями. Лазерну обробку проводили дискретно точками діаметром 3 мм із площею обробки 55-60 % від загальної площі обробленої поверхні.

Твердість зміцнених ділянок сталі внаслідок самогартування становила 60 – 62 HRC. Результати триботехнічних випробувань свідчать про ефективність такої обробки композиції покриття – основа, яка експлуатується при високих локальних навантаженнях. Зносостійкість комплексних покриттів після дискретної лазерної обробки вища в 1,9-2,1 рази порівняно з покриттями без лазерної обробки і в 2,8-3,0 рази порівняно з азотованою сталлю. Це обумовлено тим, що дискретно загартований шар сталі, де зосереджуються максимальні напруження тертя, забезпечує рівномірний розподіл навантаження в системі «сталь – покриття», чинить опір руйнуванню покриття під дією тангенціально направлених сил тертя, демпфірує їх, тобто слугує міцною основою для покриття, підвищуючи його працездатність у екстремальних умовах експлуатації, виключаючи його продавлювання, викришування та відшарування.

**Висновки.** Встановлено, що при азототитануванні на сталі Р6М5 формується покриття з шарів карбіду титану TiC та нітриду титану TiN з мікротвердістю 38,0 – 38,5 та 27,0 – 27,2 ГПа відповідно; при азотохромуванні з шарів карбідів Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> та нітриду хрому Cr<sub>2</sub>N з мікротвердістю 18,2 – 18,5, 16,2 – 16,8 та 8,8 – 9,0 ГПа відповідно. Зносостійкість сталі Р6М5 в умовах тертя ковзання без змащування із захисними покриттями порівняно з азотуванням зростає в 1,5 – 2,0 рази, а після додаткової дискретної лазерної обробки сталі в 2,2 – 3,0 рази. Це обумовлено тим, що дискретно загартований шар сталі слугує міцною основою для покриття, підвищуючи його працездатність у екстремальних умовах експлуатації, виключаючи його продавлювання, викришування та відшарування.

#### Список літератури

1. Лоскутов В.Ф. Диффузионные карбидные покрытия / В.Ф. Лоскутов, В.Г. Хижняк, Ю.А. Куницький, М.В. Кіндрачук. – К.: Техніка, 1991. – 168с.
2. Хижняк В.Г. Диффузионные покрытия с участием хрома и алюминия на стали 12Х18Н9Т с барьерным слоем нитрида титана / В.Г. Хижняк, М.В. Аршук // Известие высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2012. № 3. – С. 69 – 70.
3. Трибологія [М.В. Кіндрачук, В.Ф. Лабунець, М.І. Пашечко, Є.В. Корбут]. – К.: НАУ – друк, 2009. – 392с.
4. Кіндрачук М. В. Комбінований метод підвищення зносостійкості деталей трибомеханічних систем/ О.І. Духота, В.В. Харченко, Н.М. Стебелецька, А.Л. Гловин // Проблеми тертя та зношування. – 2022. – №2 (95). С. 46 – 57. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.2\(95\).16556](https://doi.org/10.18372/0370-2197.2(95).16556).
5. Пат. 103476 України. Спосіб механо – хіміко – термічної обробки відновлення працездатності та отримання зносостійких шарів азотованих сталевих деталей / Кіндрачук М.В., Клімін В.В., Герасимова О.В., Костюк Є.П., Харченко В.В. та ін. № у 201404071; Заявл.16.04.2014; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24. – 4с.
6. Кіндрачук М. В. Формування дискретної структури азотованих покриттів рівної зносостійкості/ В.В. Харченко, О.І. Духота, І.А. Гуменюк // Проблеми тертя та зношування. – 2022. – №4 (97). С. 4–9. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(97\).16954](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(97).16954)
7. Хижняк В.Г. Будова та зносостійкість карбідних і нітридних покриттів титану, ванадію та хрому на сталі У8 / В.Г. Хижняк, Н.А. Курило, М.М. Шахрайчук // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2007. №3. – С. 105 – 109.

**Кіндрачук Мирослав Васильович** – д. т. н., професор, професор кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національний авіаційний університет, пр. Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Харченко Володимир Володимирович** – завідувач лабораторії кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, проспект Любомира Гузара, 1, м. Київ, Україна, 03058, +38(044)4067773, E-mail: nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>.

**Гуменюк Ігор Анатолійович** – докторант, Національний авіаційний університет, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>.

**Марчук Володимир Єфремович** – д. т. н., професор, професор кафедри логістики Національний авіаційний університет, пр. Гузара Любомира, 1, м. Київ, Україна, 03058, E-mail: [sunduk\\_2005@ukr.net](mailto:sunduk_2005@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-0140-5416>.

**Гловин Михайло Андрійович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9767>.

**Костецький Іван Володимирович** – аспірант кафедри прикладної механіки та інженерії матеріалів Національного авіаційного університету, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.

*M. V. KINDRACHUK, V. V. KHARCHENKO, V. Ye. MARCHUK, I. A. HUMENIUK,  
M. A. HLOVYN, I. V. KOSTETSKYI*

### COMBINED METHOD OF SURFACE HARDENING OF HIGH-SPEED STEELS

The structure, phase and chemical composition, microhardness, and microbrittleness of the surface zones of P6M5 steel after chemical and thermal treatment: nitriding followed by titanium and chromium plating are considered. Metallographic and micro-X-ray spectral analyzes of wear surfaces of P6M5 steel with different types of coating were carried out. It is shown the dependence of physical and mechanical properties of complex coatings and discrete laser treatment on wear-resistance. The analysis of the obtained data showed that azochromic coatings with additional strengthening by laser treatment of steel, which serves as a substrate for coatings, increase its performance in extreme operating conditions, excluding its crushing, chipping and peeling.

**Keywords:** steel P6M5, nitro-titanizing, nitro-chromizing, discrete laser treatment, friction, wear resistance.

### References

1. Loskutov V.F. , Hizhnyak V.G. Kunickij Yu.A, Kindrachuk M.V. Diffuzionnye karbidnye pokrytiya, K.: Tehhnika, 1991, 168p.
2. Hizhnyak V.G., Arshuk M.V. Diffuzionnye pokrytiya s uchastiem hroma i alyuminiya na stali 12H18N9T s barenym sloem nitrida titana , , Izvestie vysshih uchebnyh zavedenij. CHernaya metallurgiya, 2012. No3, P. 69 – 70.
3. Kindrachuk M.V., Labunec V.F., Pashechko M.I., Korbut E.V., Tribologiya , K.: NAU – druk, 2009, 392p.
4. Kindrachuk M. V. Kombinovanyi metod pidvyshchennia znosostiikosti detalei trybomekhanichnykh system/ O.I. Dukhota, V.V. Kharchenko, N.M. Stebeletska, A.L. Hlovyn // Problemy tertia ta znoshuvannia. - 2022.- №2 (95). S. 46 – 57.
5. Pat. 103476 Ukrainy. Sposib mekhano – khimiko – termichnoi obrobky vidnovlennia pratsezdatsnosti ta otrymannia znosostiikykh shariv azotovanykh stalevykh detalei / Kindrachuk M.V., Klimin V.V., Herasymova O.V., Kostyuk Ye.P., Kharchenko V.V. ta in. № u 201404071; Zaiavl. 16.04.2014; opubl. 25.12.2015, Biul. № 24. – 4s.
6. Kindrachuk M. V. Formuvannia dyskretnoi struktury azotovanykh pokryttiv rivnoi znosostiikosti/ V.V. Kharchenko, O.I. Dukhota, I.A. Humeniuk // Problemy tertia ta znoshuvannia - 2022. - №4 (97). S. 4-9. [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(97\).16954](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(97).16954)
7. Hizhnyak V.G. Budova ta znosostijkist karbidnih i nitridnih pokryttiv titanu, vanadiyu ta hromu na stali U8 , V.G. Hizhnyak, N.A. Kurilo, M.M. Shahrajchuk ,, Naukovi visti NTUU «KPI», 2007. No3, P. 105 – 109.

**Kindrachuk Myroslav** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, nau12@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0002-0529-2466>.

**Kharchenko Volodymyr** – head of laboratory of the Dep. of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0001-6383-5337>.

**Volodymyr Marchuk** – doctor of Technical Sciences, professor Department of Logistics National Aviation University, [sunduk\\_2005@ukr.net](mailto:sunduk_2005@ukr.net), <https://orcid.org/0000-0003-0140-5416>.

**Humeniuk Ihor** – doctoral student, , National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0002-4352-7035>.

**Hlovyn Mykhailo** – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0003-2525-9767>.

**Kostetskyi Ivan** – PhD student of the Department of Applied Mechanics and Materials Engineering, National Aviation University, <https://orcid.org/0000-0003-2815-0230>.