

УДК 620.175.2:669.15

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2023.103.0.58

ДОСЛІДЖЕННЯ НОВИХ РЕЖИМІВ ОСАДЖЕННЯ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ

Глушкова Д. Б.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. У роботі розглянуто можливість застосування іонно-плазмового напилення поверхні прес-форм. Це уможливує заміну дефіцитних дорогих вольфрамівмісних сталей іншими матеріалами. Матеріалами для прес-форм лиття під тиском мідних сплавів обрані в цій роботі сталі 4Х5МФС і 5ХНМ. Вибір зазначених марок зумовлений тим, що вони не містять вольфраму, зважаючи на різке зростання його дефіциту, і вміст молібдену обмежений, а також ці сталі задовольняють вимоги до матеріалу підкладки, на яку наноситься покриття нітриду титану. Нанесення покриттів на зразки для лабораторних досліджень та деталі прес-форм лиття під тиском здійснювалося методом конденсації речовини в умовах іонного бомбардування. Для визначення необхідного тиску азоту, що забезпечує отримання на робочих поверхнях деталей прес-форм покриттів з найкращими експлуатаційними характеристиками, нітрид титану наноситься за різних парціальних тисків азоту – від $3 \cdot 10^{-3}$ до 1 Па. Покриття, отримані за умови різних тисків азоту, розрізняються кількістю та розміром крапельної фази. Найбільша кількість крапельної фази, що містить α -Ті, спостерігається у покриттів, отриманих за тисків азоту $3 \cdot 10^{-3}$ Па, $3 \cdot 10^{-2}$ Па. Збільшення тиску азоту ($4 \cdot 10^{-1}$ Па, 1 Па) значно зменшує рівень мікроспотворень кристалічних гранок у покритті, зростає його пластичність. У зв'язку з цим знижується крихкість покриття за досить високої його твердості. Отримане в разі тиску азоту 1 Па покриття нітриду титану найбільш ефективно захищає робочі поверхні деталей прес-форм від руйнування. Як показали лабораторні випробування, нанесене за оптимальних технологічних параметрів покриття нітриду титану підвищує корозійну стійкість деталей прес-форм, на яке воно нанесено, утричі, окалинотійкість – удвічі–учетверо.

Ключові слова: іонно-плазмові покриття, поверхня, фаза, зміцнення, параметри.

Вступ

Для отримання заданої структури та властивостей застосовують різні методи оброблення матеріалів [1–3].

Одним із найбільш прогресивних способів отримання виливків є лиття під тиском. Цей метод дає змогу виготовляти виливки високої точності, практично унеможливує їх подальше механічне оброблення, забезпечує високу продуктивність праці.

Водночас широке впровадження у виробництво лиття під тиском стримується низькою стійкістю прес-форм за їх відносно високої вартості.

Нині близько 30 % собівартості виливків зі сплавів з урахуванням міді, виготовлених зазначеним способом лиття, становить відшкодування зношування оснастки [4].

Відомо, що під час лиття під тиском сплавів на мідній основі головною причиною виходу з ладу матриць і вкладишів – основних формотворчих деталей – є термічна втома [5]. Робочі поверхні прес-форм у процесі кожного нагрівання та охолодження зазнають об'ємних змін, що викликають і підсилюють напруги за умови різкої зміни температур. Максимальних значень напруги досягають у шарі завтовшки 100–200 Å [6].

Під дією знакозмінної температурної напруги утворюються тріщини розпау. У процесі експлуатації метал, що заливається, затікає в тріщини та

прискорює руйнування прес-форми. Отже, основну відповідальність за руйнування формоутворювальної поверхні деталей прес-форм несе тонкий поверхневий шар. Він визначається найбільшими значеннями температур і напруг, а також зазнає агресивного впливу рідкого металу [10]. Внутрішні шари зазнають дії перепаду температур лише в 20–30 °С за цикл, а від дії розплаву вони захищені робочою поверхнею, працюючи в менш жорстких умовах [6].

Тому посилення стійкості прес-форм може бути досягнуто з допомогою впливу лише на тонкий поверхневий шар з метою підвищення його опору циклічним температурним напруженням та агресивному середовищу. Наявність такого шару дасть змогу значно зменшити вимоги до основного металу, з якого виготовлені прес-форми. Це уможливує заміну дефіцитних і дорогих вольфрамівмісних сталей іншими матеріалами. Для впливу на робочі поверхні прес-форм використовувалися хімічні, хіміко-термічні методи, поверхневе легування [6, 7].

Ці способи оброблення допомогли вирішити такі завдання: ослабити фізичну та хімічну взаємодію форми та виливка, підвищити зносостійкість та ін. [7], що лише частково збільшує стійкість прес-форм (на 20–30 %) [6].

Аналіз публікацій

Водночас розроблено та впроваджено нові сталі типу 4X5B2C, 4X2B2MFC, 4X4BMFC, що дають змогу скоротити споживання гостродефіцитної високовольфрамової сталі 3X2B8Ф, яка вважається основним матеріалом для прес-форм лиття під тиском. Однак стійкість деталей, виготовлених із цих матеріалів, не висока [6], і в них міститься також вольфрам.

Усе сказане визначає і важливість робіт, спрямованих на створення такого поверхневого шару, який повинен мати: низьку теплопровідність для зменшення градієнта температур і підвищення термостійкості, гарну адгезійну взаємодію з основним металом, з якого виготовлені прес-форми, що забезпечує міцність його з'єднання, та запобігає відшаруванню в процесі експлуатації, низьку адгезійну взаємодію з металом вилівка, що значно знижує налипання розплаву на робочі поверхні, гарантує високу зносостійкість і корозійну стійкість.

Широкі можливості відкриває використання плазмових покриттів із зносостійких матеріалів. На сьогодні існують різноманітні методи нанесення таких покриттів, зокрема хімічне осадження з газового середовища, конденсація речовини в умовах іонного бомбардування (КІБ) [7–9, 12–14]. Серед цих методів перевагу необхідно віддати методу КІБ, що дає змогу регулювати температуру процесу (~300–800 °C) і, отже, наносити покриття на деталі, виготовлені як із швидкорізальних сталей, так і з твердих сплавів, що робить його універсальним та провідним серед зміцнювальних технологій.

Технологія зміцнення способом осадження матеріалу покриття з газової фази завдяки високим температурам (≥ 1000 °C) успішно використовується для підвищення експлуатаційної стійкості твердосплавного інструменту.

Нині метод КІБ застосовується в автомобільній, авіаційній, електротехнічній промисловості для захисту деталей і вузлів машин від абразивного, ерозійного, корозійного та інших видів впливу робочого середовища [7].

Щодо використання цього методу для нанесення плазмових покриттів на деталі прес-форм, то це питання не вивчалось. Водночас метод КІБ викликає значний інтерес для таких цілей, оскільки дає змогу в широких межах регулювати склад покриття. Це допомагає отримати покриття з низькою теплопровідністю, зменшити температурний градієнт, створити на поверхні напругу, що стискає, забезпечити в цьому шарі високі характеристики міцності, корозійну стійкість та окали-

ностійкість, надійну адгезію покриття з підкладкою.

У зв'язку з вищевикладеним науково обгрунтований вибір матеріалу прес-форм для подальшого оброблення КІБ оптимального складу покриттів і технічних режимів їх нанесення, що підвищують надійність прес-форм та економічну доцільність запропонованої розробки, є актуальною проблемою.

Мета та постановка завдання

Метою є вивчення можливості використання методу КІБ для підвищення стійкості прес-форм лиття під тиском, установлення можливості заміни дефіцитних дорогих вольфрамовмісних сталей іншими матеріалами. Для вирішення цієї проблеми необхідно:

- здійснити науково обгрунтований вибір матеріалу прес-форм для подальшого оброблення методом КІБ;
- обгрунтувати оптимальний склад покриттів;
- визначити оптимальні режими нанесення плазмових покриттів, що забезпечують підвищення надійності прес-форм.

Матеріали та методи досліджень

Оскільки поверхневі шари деталей прес-форм піддаються впливу температурного навантаження, що циклічно змінюється та рівень якого знижений (до $t \sim 650$ °C) завдяки захисній дії плазмового покриття, то вони перебувають у таких самих температурних умовах, як і в процесі лиття під тиском сплавів із низькою температурою плавлення (алюмінієвих, цинкових). Матеріал обирали з-поміж напівтеплостійких сталей, що застосовуються під час лиття під тиском сплавів з низькою температурою плавлення (алюмінієвих, цинкових).

З-поміж цих сталей відібрано ті, що не містять вольфрам, зважаючи на різке зростання його дефіциту, і вміст молібдену обмежений, а також ті, що відповідають вимогам до матеріалу підкладки, на яку наноситься покриття нітриду титану.

Матеріалами для прес-форм лиття під тиском мідних сплавів у цій роботі обрано 4X5MFC та 5XHM (табл. 1).

Нанесення покриттів на зразки для лабораторних досліджень і на деталі прес-форм лиття під тиском здійснювалося методом конденсації речовини в умовах іонного бомбардування (КІБ). Покриття, отримані цим методом, мають високу стабільність, низьку пористість, хорошу адгезію з підкладкою.

Таблиця 1 – Хімічний склад сталей, що застосовуються для виготовлення прес-форм лиття під тиском

Сталь	Вміст елементів, %				
	C	Zr	Mo	V	Ni
5XHM	0,50–0,60	0,60–0,80	0,15–0,30	–	1,40–1,80
4X5MFC	0,37–0,44	4,50–5,50	0,80–1,10	0,80–1,20	–

Покриття наносили на установці «Булат-3Т» (рис. 1). Метод КІБ передбачає два основні етапи.

1. Очищення, нагрівання та активація поверхні підкладки бомбардуванням іонами осаджуваного матеріалу, прискореними до енергії необхідної величини.

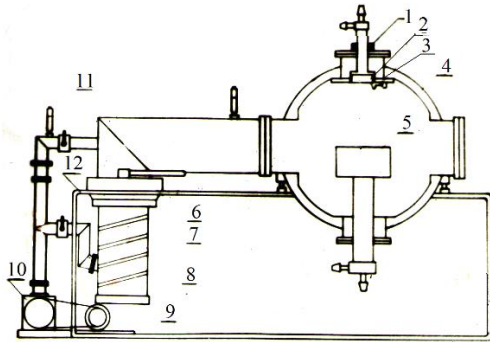


Рис. 1. Загальна схема установки «Булат-3Т»: 1 – котушка, що фокусує; 2 – катод; 3 – підпалювальний електрод; 4 – камера-анод; 5 – підкладка; 6 – азотна пастка; 7 – водяна пастка; 8 – високовакуумний агрегат; 9 – нагрівач; 10 – форвакуумний насос; 11 – манометрична лампа; 12 – система водяного охолодження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

2. Осадження покриття за умови безперервного іонного бомбардування конденсату в режимі, що забезпечує формування покриття з необхідними службовими властивостями [10].

Час нанесення покриття є також технологічним параметром, що підлягає оптимізації. Швидкість нанесення покриттів TiN на установці «Булат-3Т» становить 10 мкм/год [9].

З огляду на те, що найбільша адгезійна активність до підкладки та вплив на підвищення термічної витривалості сталей 4X5MФС і 5XНМ мають покриття нітриду титану завтовшки від 2 до 5 мікрон, час нанесення покриття коливався від 12 до 30 хв.

Загартування обраних марок сталі проводили за температур, що забезпечують розчинення більшої частини карбідів та отримання високолегованого мартенситу (табл. 2). У цьому разі сталі зберігають дрібне зерно та достатню в'язкість. Після гартування сталі піддаються високотемпературному відпуску з метою отримання великих значень ударної в'язкості, межі витривалості. Такий відпуск сприяє додатковому зміцненню внаслідок дисперсійного твердіння [11], що супроводжується виділенням дрібних карбідів та отриманням твердості 42–45 HRC.

Таблиця 2 – Режими термооброблення сталей 5XНМ, 4X5MФС

Марки сталі	Загартування					Відпуск		
	температура завантаження	температура нагрівання, °C	час витримки в процесі нагрівання	середовище охолодження	твердість, HRC _c	температура, °C	час витримки, година, разом із агріванням партії деталей	твердість HRC _c
5XНМ	700–750	830–860	1–2 хв на 1 мм з перебі- в	охоло- дження в олії	47–50	500–520	4–5	42– 45
4X5MФС		1050–1070			55–61			560–580

Примітка. Виготовлені деталі перед завантаженням у термічну піч загортають в азбестовий папір і засипають чавуною стружкою або відпрацьованим карбюратором. Товщина шару – 35 мм. Загартування та відпуск виконують за умови мінімального розриву в часі.

Результати експериментів

Як оптимальні параметри нанесення покриттів підбиралися тиск реакційного газу в камері установки, температура розігріву підкладки, на яку наноситься покриття, і час осадження.

Відповідно до розробленої методики випробувань на термічну витривалість критерієм оцінювання оптимальних параметрів нанесення покриттів є кількість термоциклів, що витримує зразок з осадженим покриттям до руйнування.

Як відомо, найважливішим параметром процесу конденсації речовини за умов іонного бомбардування є тиск реакційного газу [12].

Необхідно зазначити, що оптимальний тиск реакційного газу у вакуумній камері має визначатися в кожній конкретній ситуації та залежить від

складу катода, моделі установки, на якій наноситься покриття, умов експлуатації деталі з покриттям [9, 13, 14].

Для визначення необхідного тиску азоту, що забезпечує отримання на робочих поверхнях деталей прес-форм покриттів із найкращими експлуатаційними характеристиками, нітрид титану наноситься за різних парціальних тисків азоту – від $3 \cdot 10^{-3}$ до 1 Па (табл. 3). Цей діапазон тисків азоту був обраний на підставі літературних джерел щодо ефективності роботи деталей та інструменту з плазмовим покриттям [13, 15].

Після нанесення покриттів досліджувалися мікроструктура поверхні отриманих покриттів та їх мікротвердість (табл. 4).

Таблиця 3 – Вплив парціального тиску азоту на характеристики покриття

Тиск азоту, Па	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-1}$	1
Мікротвердість, ГПа	22	26,0	23,0	18,0
Колір покриття	сірий	жовтувато-сірий	жовтий	буро-золотистий

Таблиця 4 – Вплив парціального тиску азоту на термічну витривалість покриття

Марка сталі	Тиск				
	без покриття	$3 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-1}$	1
	термічна витривалість				
4X5MФС	2000	3000	5000	9500	12000
5ХНМ	2000	3500	5000	9000	11500

Примітка. Покриття нітриду титану завтовшки 5 мкм, нанесене за температури підкладки 500°C .

Покриття, отримані за різних тисків азоту, відрізняються кількістю та розміром крапельної фази. Найбільша кількість крапельної фази, що містить $\alpha\text{-Ti}$, спостерігається у покриттів, отриманих за тисків азоту $3 \cdot 10^{-3}$ Па, $3 \cdot 10^{-2}$ Па

(рис. 2, а, б). Вони мають сірий і жовтувато-сірий колір. Зі збільшенням тиску азоту до 1 Па покриття набувають буро-золотистого кольору, кількість крапельної фази на поверхні помітно зменшується (рис. 2, г).

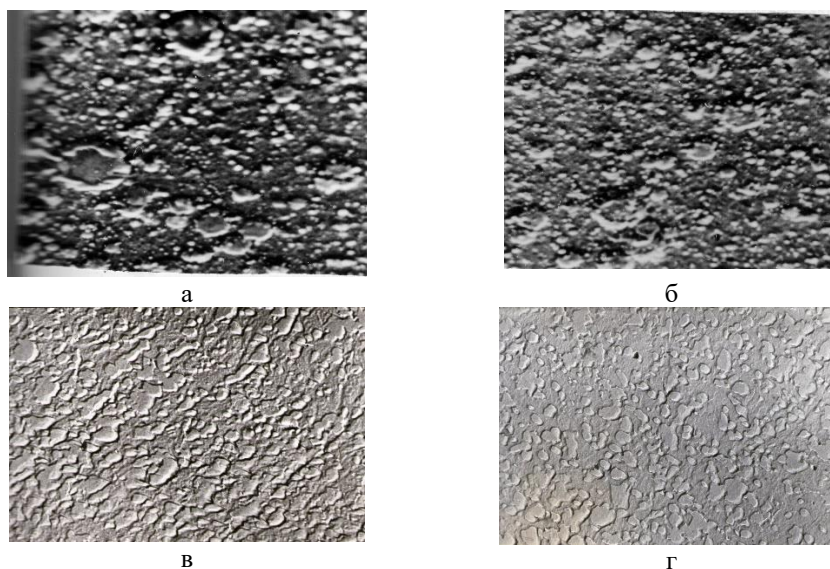


Рис. 2. Мікроструктура поверхні покриттів нітриду титану, отриманих за різного тиску реакційного газу: а – $3 \cdot 10^{-3}$ Па; б – $3 \cdot 10^{-2}$ Па; в – $4 \cdot 10^{-1}$ Па; г – 1 Па

Найбільшу мікротвердість мають покриття, отримані за умови тиску азоту $3 \cdot 10^{-3}$ Па, $3 \cdot 10^{-2}$ Па (до 26 ГПа). Зі зростанням тиску мікротвердість зменшується та за тиску 1 Па становить 18 ГПа. Лабораторні випробування на термічну витривалість зразків із покриттями, нанесеними за різних тисків азоту, показали, що найбільшу кількість циклів витримують зразки з покриттям нітриду титану, отриманим у разі тиску 1 Па. Варто зазначити, що зразки з покриттям, отриманим за тисків азоту $3 \cdot 10^{-3}$ Па, $3 \cdot 10^{-2}$ Па, спостерігається значне налипання розплаву, яке помітно зменшується, якщо збільшується тиск і, починаючи з 1 Па, воно практично відсутнє. За умови тисків $3 \cdot 10^{-3}$ Па, $3 \cdot 10^{-2}$ Па біля покриттів разом із найвищою мікротвердістю спостерігається також збільшення ширини дифракційних максимумів (333), що характеризують мікроспотворення кри-

сталічної ґратки хімічних сполук, які містяться в складі покриттів.

Це, мабуть, пояснюється впровадженням атомів азоту, діаметр яких більший за діаметр сфери, вписаної в ґратки титану [16]. Велика твердість і високий рівень мікроспотворень призводять до зростання крихкості покриття, що спричиняє швидке руйнування під дією знакозмінної напруги та технічних ударів.

Наявність на поверхні значної кількості крапельної фази робить процес руйнування інтенсивним.

Збільшення тиску азоту ($4 \cdot 10^{-1}$ Па, 1 Па) значно зменшує рівень мікроспотворень кристалічних ґраток у покритті, зростає його пластичність [8]. У зв'язку з цим знижується крихкість покриття за досить високої його твердості.

Отримане за умови тиску азоту 1 Па покриття нітриду титану найбільш ефективно захищає робочі поверхні деталей прес-форм від руйнування (табл. 4).

Іншим важливим параметром, що істотно впливає на стійкість деталей із плазмовим покриттям, є температура робочої поверхні під час іонного бомбардування, тому що енергія іонів у процесі бомбардування значно вища за енергію іонів у разі конденсації покриття [9].

Відповідно до технічних показників температура поверхні підкладки в камері установки «Булат-3Т» під час іонного бомбардування змінювалася від 300 до 800 °С.

Контроль температури здійснювався за допомогою зразка-свідка із вмонтованою в нього хромель-алюмелевою термопарою, що вимірює температуру поверхні осадження.

Іонне бомбардування має найбільш сприятливий вплив на підкладку, виготовлену зі сталей 4Х5МФС та 5ХНМ за її температури 500 °С, що відповідає найкращій адгезії покриття з підкладкою і, відповідно, найбільшій стійкості деталей із таким покриттям під час експлуатації.

За нижчих температур спостерігається тенденція зниження адгезії покриття, що супроводжується відшаровуванням покриття в процесі експлуатації та значним зниженням стійкості.

Особливо помітно це явище, коли температура розігріву поверхні, на яку наноситься покриття, перевищує температуру відпуску сталі внаслідок зміцнення останньої.

Покриття, що наносяться на робочі поверхні деталей прес-форм з метою підвищення їх стійкості, мають надійно захищати деталі прес-форм від впливу зовнішніх факторів, тобто мати низьку адгезійну активність до матеріалу вилівка, високу окислювальну стійкість та корозійну стійкість і одночасно забезпечувати найбільшу міцність з'єднання покриття з підкладкою.

Для визначення адгезійної активності покриття до матеріалу вилівка методом краплі визначалася взаємодія між досліджуваними вставками зі сталей 4Х5МФС і 5ХНМ з покриттям нітриду титану завтовшки 4 мікрони й розплавами міді, свинцю, цинку, оскільки це метали латуні.

Отримані значення крайових кутів змочування (табл. 5) свідчать про незначну адгезійну взаємодію покриття нітриду титану, нанесеного за умови оптимального режиму, з міддю, свинцем, цинком.

Отже, покриття значно знижує адгезійну взаємодію сталей, що використовуються як матеріал для прес-форм, із розплавом латуні.

Таблиця 5 – Змочування покриття нітриду титану розплавом

Розплав	Атмосфера	0°
Cu	вакуум	134
Pb	вакуум	138
Zn	вакуум	130

Зі зростанням товщини покриття підкладка має бути надійніше захищена від зовнішніх факторів завдяки збільшенню твердості, температурної стійкості проти окислення та корозії. Але водночас зростає ймовірність появи на покритті таких небезпечних дефектів, як макро- і мікропори, мікротріщини, що здатні спричинити руйнацію покриття. Тому товщина покриття є параметром, який підлягає оптимізації в кожному конкретному випадку [9, 17–19].

Для визначення оптимальної товщини покриття, що забезпечує його міцне зчеплення з робочою поверхнею деталей, виготовлених зі сталей марок 4Х5МФС та 5ХНМ, досліджено залежність міцності з'єднання покриття з підкладкою від товщини покриття (рис. 3). Найкращою адгезією мають покриття завтовшки 2–5 мікронів. Якщо покриття завтовшки понад 5 мікронів, відбувається його лускате відшарування (рис. 4). У процесі експлуатації деталей прес-форм з покриттям завтовшки 1 мікрон спостерігається його руйнування протягом кількох годин роботи.

Проведено випробування на корозійну стійкість зразків зі сталей 4Х5МФС та 5ХНМ з покриттям нітриду титану та без покриття. Випробування проводилися у воді за температури 20°С протягом $\tau=1000$ год. Швидкість корозії спочатку під час взаємодії з водним середовищем (перші 24 год) висока в обох досліджуваних матеріалах, хоча помітно, що показник швидкості корозії у зразків з покриттям зростає повільніше. Така залежність має місце в перші 24 год. Потім спостерігається значне зниження показника швидкості корозії. Надалі значення показника швидкості корозії стабілізується і згодом лише повільно знижується (рис. 5, 6).

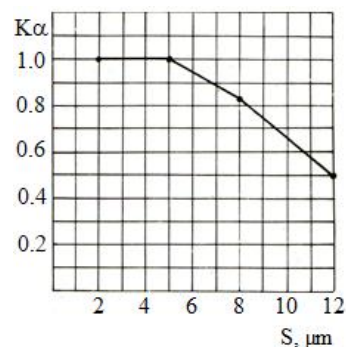


Рис. 3. Вплив товщини покриття S на адгезію $K\alpha$

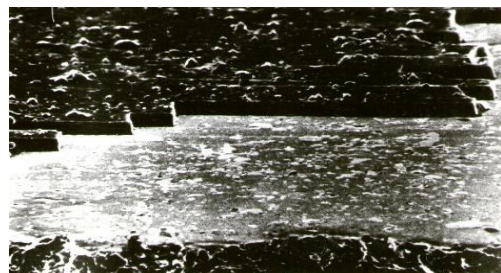


Рис. 4. Початкова стадія відшарування покриття завтовшки 8 мкм, $\times 1000$

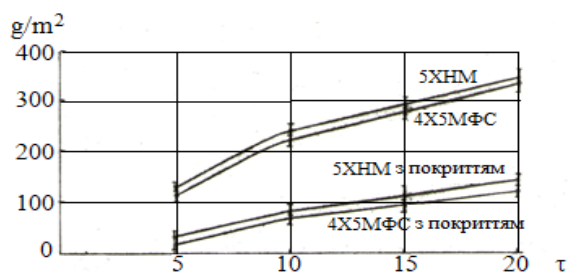


Рис. 5. Окалиностійкість сталей залежно від часу τ (год) 4Х5МФС, 5ХНМ

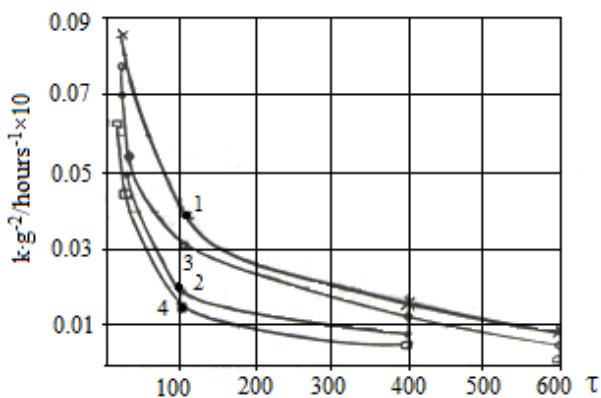


Рис. 6. Залежність показника швидкості корозії Z сталей 4Х5МФС, 5ХНМ від часу випробувань (год): 1 – сталь 5ХНМ; 2 – сталь 5ХНМ з покриттям нітриду титану; 3 – сталь 4Х5МФС; 4 – сталь 4Х5МФС з покриттям нітриду титану

Таблиця 6 – Вплив товщини покриття нітриду титану на окиснюваність зразків зі сталей 4Х5МФС та 5ХНМ ($t = 850\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau = 20$ год, безперервне нагрівання на повітрі)

Матеріал	Середня величина приросту ваги зразка, $\text{г}/\text{м}^2$, якщо товщина покриття, $\mu\text{м}$					
	1	2	3	4	5	6
4Х5МФС	160	140	110	120	140	220
5ХНМ	190	150	135	140	160	250

Як показали лабораторні випробування, нанесене за оптимальних технологічних параметрів покриття нітриду титану забезпечує підвищення корозійної стійкості деталей прес-форм, на яке воно нанесено, утричі, окалиностійкість – удвічі-четверо.

Висновки

Узагальнюючи здобуті результати, можемо дійти висновку, що максимальна стійкість деталей прес-форм з плазмовими покриттями досягається за умови розігрівання робочої поверхні під час іонного бомбардування до високих температур, але не вище за температуру відпуску матеріалу прес-форм у разі забезпечення хорошої адгезії покриття з підкладкою і подальшої конденсації на цю розігріту поверхню покриття з мінімальним вмістом крапельної фази для запобігання налипанню покриття матеріалу виливка.

У разі нанесення покриття нітриду титану на установці «Булат-3Т» на робочі поверхні деталей

Найбільша швидкість корозійного руйнування має місце в перші 12 год і водночас має свою захисну дію проти корозії покриття нітриду титану. Ці результати належать до зразків, що мають покриття завтовшки понад 3 мікрони. У зразків з покриттям 1–2 мікрони спостерігалось відшарування покриття та бурхливий розвиток корозії після 30 год від початку випробування.

У процесі визначення окалиностійкості матеріалів із покриттям про його захисні властивості можна судити за ваговими показниками.

Установлювалася окалиностійкість сталей 4Х5МФС і 5ХНМ після термооброблення без покриття та після нанесення покриття нітриду титану. Наведені на рис. 6 результати свідчать про сильний вплив покриття нітриду титану на опір окиснюваності сталей 4Х5МФС і 5ХНМ: вже за 10 год роботи приріст ваги у зразків з покриттям утричі менший, ніж у зразків без покриття.

Досліджувався також вплив товщини покриття на окиснюваність сталей 4Х5МФС та 5ХНМ (табл. 6). Видно, що за умови товщини покриття 3 $\mu\text{м}$ помітно підвищується опір обраних марок сталі окислення, до того ж спостерігається безперервне посилення цього ефекту аж до товщини 6 $\mu\text{м}$. Подальше збільшення товщини покриття спричиняє зниження опірності сталей окисленню. Унаслідок досліджень виявлено, що деталі прес-форм із нанесеним на їх робочі поверхні плазмовим покриттям мають максимальну стійкість, коли покриття осідає за температури підкладки $500\text{ }^\circ\text{C}$ і парціального тиску азоту 1 Па.

прес-форм, виготовлених з економно-легованих сталей, найкраща адгезія покриття до підкладки, мінімальна взаємодія його з розплавом латуні, значне підвищення термічної витривалості матеріалу підкладки досягається за температури $500\text{ }^\circ\text{C}$ та конденсації покриття за парціального тиску азоту 1 Па.

Література

1. Residual Stresses and Structure of Titanium and Chromium Nitride Coatings Obtained by a Method of an Ion-Plasma-Enhanced Deposition / L.I. Gladkikh et al. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2003. № 6 (25). P. 763–776.
2. Tsyvirko E.I., Pedash A.A. Grinding the structure of internal surfaces of cooling parts, VMD. *Visnyk dvizhnoboduvaniya*. 2010. № 1. P. 99–103.
3. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*.

2022. № 4 (140). P. 125–130. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-125>
4. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment / V.S. Vahrusheva et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2022. № 4 (140). P. 137–140. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-137>
 5. Vynogradov O.M. Reduction of costs for foundry production. *Casting of Ukraine*. 2005. № 3. P. 5–8.
 6. Hoffman M. What you should know o mold steels. *Plast. Technol.* 2005. № 28 (4). P. 28–30.
 7. Smirnov O.M., Leprechaun I.V. Production of castings / *Donetsk National. technical Univ.*, Donetsk: Nard-Press, 2005. 244 p.
 8. Kostin V.A., Grigorenko H.M., Zhukiv V.V. Modification of the structure of welds of high-strength, low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Collection of scientific works "Construction, materials science, mechanical engineering"*. 2016. № 89. P. 93–98.
 9. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys / N.E. Kalinina et al. *Functional Materials*. 2019. № 3 (26). P. 514–518. URL: <https://doi.org/10.15407/Fm26.03.514>
 10. Hardening of leading edges of turbine blades by electrospark alloying / N.E. Kalinina et al. // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2019. № 2 (120). P. 151–154.
 11. Hlushkova D.B., Volchuk V.M. Fractal study of the effect of ion plasma coatings on wear resistance. *Functional Materials*. 2023. № 3 (30). P. 453–457. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.03.453>
 12. Kostin V.A., Grigorenko H.M., Zhukiv V.V. Modification of the structure of welds of high-strength, low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Collection of scientific works "Construction, materials science, mechanical engineering"*. 2016. № 89. P. 93–98.
 13. Selection of steel for forms of LPD of aluminum alloys / A.M. Petrychenko et al. *Foundry production*. 1990. № 3. P. 8–9.
 14. Kalinin V.T., Fedotov V.A. Synthesis and application of nanodisperse powders – modifiers. *System technologies*. 2002. № 1. P. 67–71.
 15. The choice of material for strengthening of leading edges of working blades of steam turbines / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. № 1 (113). P. 181–188.
 16. Brodyanskyi O.P. Strengthening of the tool on the "Pusk" and "Bulat" installation. *Technology and organization of production*. 2003. № 2. P. 1–25.
 17. Bolshakov V.I., Vaganov V.E. Carbon containing structural and functional coatings. *Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2014. № 10. P. 34–43.
 18. Nersisyan H.H., Lee J.H., Wok C.W. Self-propagating high – temperature synthesis of nano – sized titanium carbide powder. *J. Mater. Res.* 2002. № 11(17). P. 2859–2864.
 19. Increase of wear resistance of the critical parts of hydraulic hammer by means of ion-plasma treatment / D.B. Hlushkova et al. *Problems of Atomic Science and Technology*. 2018. № 1 (113). P. 208–211.

References

1. Tsyvirko E.I., Pedash A.A. (2010). Grinding the structure of internal surfaces of cooling parts, VMD. *Visnyk dvizhnoboduvaniya*, no. 1, p. 99–103 (in Ukrainian).
2. Hlushkova D.B., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Volchuk V.M., Kalinin O.V., Kalinina N.E. (2022). Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 4 (140), p. 125–130. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-125>
3. Vahrusheva V.S., Hlushkova D.B., Volchuk V.M., Nosova T.V., Mamhur S.I., Tsokur N.I., Bagrov V.A., Demchenko S.V., Ryzhkov Yu.V., Scrypnikov V.O. (2022). Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 4 (140), p. 137–140. URL: <https://doi.org/10.46813/2022-140-137>
4. Vynogradov O.M. (2005). Reduction of costs for foundry production. *Casting of Ukraine*, no. 3, p. 5–8 (in Ukrainian).
5. Hoffman M. (2005). What you should know o mold steels. *Plast. Technol.*, no. 28 (4), p. 28–30.
6. Smirnov O.M., Leprechaun I.V. (2005). Production of castings. Donetsk National. technical Univ. Donetsk: Nard-Press. 244 p.
7. Kostin V.A., Grigorenko H.M., Zhukiv V.V. (2016). Modification of the structure of welds of high-strength, low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Collection of scientific works "Construction, materials science, mechanical engineering"*, no. 89, p. 93–98.
8. Kalinina N.E., Glushkova D.B., Voronkov A.I., Kalinin V.T. (2019). Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys. *Functional Materials*, no. 3 (26), p. 514–518. URL: <https://doi.org/10.15407/fm26.03.514>
9. Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Hrinchenko O.D., Kalinin V.T., Voronkov V.A., Kostina L.L., Nikitchenko I.N., Nosova T.V., Reznikov F.F. (2019). Hardening of leading edges of turbine blades by electrospark alloying. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 2 (120), p. 151–154.
10. Hlushkova D.B., Volchuk V.M. (2023). Fractal study of the effect of ion plasma coatings on wear resistance. *Functional Materials*, no. 3 (30), p. 453–457. URL: <https://doi.org/10.15407/fm30.03.453>

11. Kostin V.A., Grigorenko H.M., Zhukiv V.V. (2016). Modification of the structure of welds of high-strength, low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Collection of scientific works "Construction, materials science, mechanical engineering"*, no. 89, p. 93–98.
12. Petrychenko A.M., Novyk O.O., Krylov V.I. et al. (1990). Selection of steel for forms of LPD of aluminum alloys. *Foundry production*, no. 3, p. 8–9.
13. Kalinin V.T., Fedotov V.A. (2002). Synthesis and application of nanodisperse powders – modifiers. *System technologies*, no. 1, p. 67–71.
14. Hlushkova D.B., Hrinchenko O.D., Kostina L.L., Cholodov A.P. (2018). The choice of material for strengthening of leading edges of working blades of steam turbines. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 1 (113), p. 181–188.
15. Brodyanskyi O.P. (2003). Strengthening of the tool on the "Pusk" and "Bulat" installation. *Technology and organization of production*, no. 2, p. 1–25.
16. Bolshakov V.I., Vaganov V.E. (2014). Carbon containing structural and functional coatings. *Bulletin of Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture*, no. 10, p. 34–43 (in Ukrainian).
17. Nersisyan H.H., Lee J.H., Wok C.W. (2002). Self-propagating high – temperature synthesis of nano – sized titanium carbide powder. *J. Mater. Res.*, no. 11 (17), p. 2859–2864.
18. Hlushkova, D.B., Ryzhkov, Yu.V., Kostina, L.L., Demchenko, S.V. (2018). Increase of wear resistance of the critical parts of hydraulic hammer by means of ion-plasma treatment. *Problems of Atomic Science and Technology*, no. 1 (113), p. 208–211.
19. Gladkikh L.I., Malykhyn S.V., Pugache A.T., Reshetnyak O.M., Glushkova D.B., D'Yachenko S.S., Kovtun G.P. (2003). Residual Stresses and Structure of Titanium and Chromium Nitride Coatings Obtained by a Method of an Ion-Plasma-Enhanced Deposition. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*, no. 6 (25), p. 763–776.

Глушкова Діана Борисівна, д.т.н., проф., завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. 057-707-37-29,
e-mail: diana@khadi.kharkov.ua,

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, м. Харків, 61002, Україна.

Studying the new modes of deposition of plasma coatings

Abstract. Problem. This paper considers using ion-plasma spraying of mold surfaces. This makes it possible to replace scarce and expensive tungsten-containing steels with other materials. **Purpose.** The purpose is to study the possibility of using the KIB method to increase the stability of die-casting molds, to establish the possibility of replacing scarce, expensive tungsten-containing steels with other materials. **Materials and methods.** 4X5MΦC and 5XHM steel grades were chosen as materials for copper alloy die-casting molds in this work. The choice of these steel grades is due to the fact that these steels do not contain tungsten due to its sharply increased scarcity and limited molybdenum content, and they also meet the requirements for the substrate material on which the titanium nitride coating is applied. Coatings were applied to samples for laboratory tests and die-casting mold parts by the condensation method with ion bombardment. Titanium nitride is applied at different partial nitrogen pressures – from $3 \cdot 10^{-3}$ to 1 Pa to determine the required nitrogen pressure, which ensures that the working surfaces of mold parts receive coatings with the best performance characteristics. The coatings obtained at different nitrogen pressures differ in the amount and size of the droplet phase. **Results of experiments.** The largest amount of the droplet phase containing α -Ti is observed in coatings obtained at nitrogen pressures of $3 \cdot 10^{-3}$ Pa, $3 \cdot 10^{-2}$ Pa. An increase in nitrogen pressure ($4 \cdot 10^{-1}$ Pa, 1 Pa) significantly reduces the level of microdistortions of the crystal lattice in the coating, and its plasticity increases. In this regard, the coating's brittleness is reduced at a sufficiently high hardness. **Results.** The titanium nitride coating obtained at a nitrogen pressure of 1 Pa is the most effective in protecting the working surfaces of mold parts from destruction. Laboratory tests have shown that the titanium nitride coating applied under optimal process parameters increases the corrosion resistance of mold parts to which it is applied by 3 times and the scale resistance by 2–4 times.

Key words: ion-plasma coatings, surface, phase, hardening, parameters.

Hlushkova Diana, DrSci. (Tech.), Head of the Department of Technology of Metals and Materials Science, Phone: 057-707-37-29,
e-mail: diana@khadi.kharkov.ua,
Kharkov National Automobile and Highway University, Str. Yaroslava Mudrogo, 25, Kharkiv, 61002, Ukraine.