

УДК 621.891

М. В. КИНДРАЧУК, Р. Г. МНАЦАКАНОВ, І. А. ГУМЕНЮК, Я. В. БОГАЧ,
Ю. В. ПИЩЕНКО

Національний авіаційний університет України

ФОРМУВАННЯ ТРИБОТЕХНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТТІВ НА СТАЛІ 12Х18Н10Т ЛАЗЕРНОЮ ОБРОБКОЮ

Розглянуті питання міцності зчеплення плазмових покриттів з основою і їх зносостійкості. Наведені способи покращення якості таких покриттів шляхом оплавлення покриття й тонкого поверхневого шару основи або циклічним багаторазовим їх нагріванням безперервним лазерним випромінюванням у діапазоні температур $(T(As_1) < T < T_{пл})$. У першому випадку міцність зчеплення покриття з основою досягає 400 – 430 МПа, у другому – підвищується в 4-5 раз, до 90–120 МПа, при вихідній – 15–20 МПа. Лазерне термоциклування відрізняється високою продуктивністю, не вимагає застосування наступної механічної обробки.

Ключові слова: *сталь 12Х18Н10Т, плазмове покриття, лазерне випромінювання, термоциклування, масоперенесення.*

Вступ. При виготовленні металевих деталей сучасних машин різного призначення широко використовуються технології нанесення функціональних покриттів, призначених для підвищення експлуатаційних характеристик виробів при одночасному зниженні собівартості їх виробництва. Найбільше продуктивною і широко розповсюдженою є технологія плазмового напилення порошкових матеріалів [1; 2]. Вона добре вивчена, дозволяє при достатньо високій продуктивності значно збільшити ресурс роботи деталей, які працюють в умовах тертя, за різних питомих навантажень, підвищених швидкостей ковзання, дії агресивних середовищ. Для реалізації цих технологій створені відповідні методики вибору порошкових матеріалів, способи визначення режимів їх нанесення, відповідне технологічне обладнання. Суттєвими недоліками покриттів, отриманих плазмовим або детонаційним методами, є порівняно невисока міцність їх зчеплення з основою, яка не перевищує 20, максимум 30 МПа. До того ж, такі покриття практично неможливо використовувати при дії знакозмінних навантажень, тим більш в умовах високих температур, наявності хімічно активних рідин, газів, мастил і т. ін. [3; 4].

Разом з тим відомо, що при лазерному опромінюванні, як і при дії інших концентрованих джерел енергії, в різних металевих сплавах, в поверхневих шарах спостерігається перерозподіл легуючих елементів, який має аномальний характер, тобто відбувається з набагато більшими швидкостями, ніж при звичайних умовах нагрівання [5–7]. Таке явище має місце не тільки, коли сплави під дією лазерного випромінювання знаходяться в рідинному стані, але і в тому випадку, коли всі перетворення відбуваються у твердій фазі. Тому важливим є пошук умов лазерного опромінювання плазмових покриттів, які б обумовили виникнення на межі «покриття-основа» таких процесів масоперенесення, що сприяло б значному покращенню їх експлуатаційних характеристик і розширило межі їх застосування в різних галузях промисловості.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є з'ясування основних закономірностей процесів масоперенесення в перехідній зоні між плазмовим покриттям і основою при різних умовах опромінення, що забезпечують протікання

фазових перетворень як в рідкому, так і в твердому стані, вибір найбільш ефективних параметрів лазерної обробки, які обумовлюють отримання суттєвого підвищення міцності зчеплення покриттів з основою при одночасному збільшенні їх зносостійкості.

Методика дослідження. Досліджувався вплив лазерного опромінювання на процеси оплавлення і нагрівання до температур, які не перевищують $T_{пл}$, плазмових покриттів, формування перехідних шарів до основи, їх структуру, фазовий склад та властивості. Розглядалось покриття типу ВТН (TiB_2 -VC-12X18N10T).

Обробку плазмових покриттів проводили безперервним випромінюванням СО лазера за потужності випромінювання, $P = 1000$ Вт, яке збиралось плоско – сферичною лінзою із ZnSe з фокусною відстанню $F=250$ мм до діаметра $d = 2,5$ – 10 мм. Зразки із нержавіючої сталі 12X18N10T та сталей 45 і У8 з покриттями переміщувались відносно лазерного променя за спеціальною програмою зі швидкістю $V = 0,5$ м/хв. Після кожного проходу зразки пересувались у напрямку перпендикулярному швидкості переміщення на крок обробки, $S = 1,5$ – 5 мм. Режим опромінення забезпечував глибину проплавлення або тільки нагрівання, які дорівнювали або перевищували товщину покриття. Зразки після нанесення покриттів і лазерної обробки піддавались металографічному та дюрOMETричному аналізу, дослідженням розподілу хімічних елементів за програмою "Lainscan", мікроаналізатора "CameBax" SX50". Міцність зчеплення покриття з основою визначали методом штифтів. В спеціальних циліндричних зразках виготовлялись отвори, в які вставлялись відповідні штифти. Після плазмового напилення покриття піддавалось лазерному термоциклуванню. Після обробки зразки встановлювались в спеціальному пристрої в розривній машині. Розмір перерізу штифта – 5 мм. Міцність зчеплення визначалась за величиною руйнуючого зусилля.

Вивчення процесів, які відбуваються при терті та зношуванні, проводились на установці торцевого тертя, яка дозволяє проводити випробування при швидкостях ковзання від 0,01 до 15 м/с, нормальних тисках від 0,5 до 30 МПа в діапазоні температур від кімнатних до 1000°C. В якості базової була обрана схема випробування на зношування – торцеве тертя кільцевих зразків з розмірами $\varnothing 30 \times \varnothing 40 \times 10$ мм. В якості контрзразка використовувались кільця із нержавіючої сталі 12X18N10T та ЖС6К.

Результати досліджень та їх обговорення. Мікроструктура плазмового покриття оплавленого лазерним опроміненням, має стовпчасто-дендритну будову. При порівнянні з вихідною мікроструктурою можна відзначити те, що метал під час лазерної обробки перебував у рідкому стані. Під впливом великої швидкості кристалізації утворились дендрити, головні вісі яких розташовані паралельно напрямку тепловідведення. Поблизу самої поверхні напрямок тепловідведення носить менш виражений характер. В мікроструктурі відсутня стовпчаста будова, що свідчить про надзвичайно високі швидкості охолодження. Подібну і структуру було отримано шляхом подвійного оплавлення при обробці з більшою швидкістю пересування (понад 1 м/хв). За таких умов опромінення в покритті утворилась мікрокристалічна структура, яка погано виявляється при хімічній обробці і має мікротвердість до 11000-12000 МПа. Характерною рисою оплавлених покриттів є зниження їх мікротвердості в порівнянні з вихідною після напилення. Основною причиною цього є реалізація в оплавлених покриттях пере-

важно композиційного механізму зміцнення на відміну від дисперсійного в плазмовому. Зміна твердості від покриття до основи носить плавний характер. Найвищою мікротвердістю характеризується оплавлене плазмове покриття на сталі У8, у порівнянні з підкладками зі сталі 45 і 12Х18Н10Т. При цьому спостерігається зростання мікротвердості в напрямку від поверхні покриття до основи. Причиною цього може бути вуглець, якого найбільше в сталі У8.

У роботі [7] встановлений факт аномального масоперенесення вуглецю в сталі У8 у твердій фазі на відстань 150-200 мкм за час дії випромінювання 4 мс, що обумовлено високими швидкостями деформацій, які мають місце в зоні термічного впливу при імпульсному лазерному нагріванні.

В сталі аустенітного класу 12Х18Н10Т навпаки лазерне опромінення не викликає істотних змін у її структурі. Мікротвердість в зоні нагрівання не відрізняється від твердості вихідної структури і становить близько 2700 МПа. Оплавлені покриття стають практично безпористими (пористість 0,5-1,0%), міцність зчеплення з основою підвищується до 400-450 МПа. Значний інтерес представляє розподіл легуючих елементів в поверхневих шарах основи, де всі процеси відбувались у твердому стані. При дослідженні оплавлених плазмових покриттів зі сплаву ВТН на сталі У8 виявлено суттєвий перерозподіл елементів. На границі покриття - підкладка відбувається утворення складних сполук типу V – Cr, Fe – Cr, V – Fe – Cr. Крім цього, як свідчать дані рентгеноспектрального аналізу, в цій зоні спостерігається підвищений вміст вуглецю. Це обумовлює з одного боку підвищення крихкості покриття в прилеглих до границі ділянках, з другого - підвищення мікротвердості в перехідній зоні і значний її перепад від покриття до основи.

Вивчення особливостей, оплавленого покриття на сталі 12Х18Н10Т показало відсутність мікротріщин і наявність чіткої границі розділу – «покриття-основа». При дослідженні її мікроструктури була виявлена сіра зона товщиною 1,5–2 мкм, що примикає до границі розділу з боку матриці. В цій зоні відбувається значний перерозподіл легуючих елементів – значне підвищення вмісту хрому, марганцю і ванадію.

Більш детально дослідження розподілу хімічних елементів на границі «покриття-основа» свідчить про їх взаємне розчинення. Так, залізо основи взаємодіє із хромом і ванадієм, а потім розчиняється в покритті. Завдяки такій взаємодії можливе утворення сполуки Fe – Cr – V. Нікель не бере участі у цих процесах, а тільки розчиняється в покритті. У покритті відзначається досить великий вміст титану, який взаємодіє і потім розчиняється в хромі. Вимірювання мікротвердості показує її рівномірну зміну по лінії «покриття-основа».

Таким чином, навіть отримані дані вже свідчать про те, що при певних умовах лазерним опроміненням на режимах, які не викликають оплавлення покриття, можна ініціювати на межі «основа – підкладка» досить суттєве масоперенесення із покриття в основу і навпаки, що безумовно буде сприяти підвищенню міцності їх зчеплення і покращенню триботехнічних властивостей.

В зв'язку з вище викладеним, було проведено спеціальне дослідження. На зразки із нержавіючої сталі 12Х18Н10Т плазмовим способом наносилось покриття системи V – Ti – Ni, яке потім оброблялось випромінюванням CO₂ лазера при потужності випромінювання – 1 кВт, швидкості відносного пересування 0,5 м/хв, діаметрі плями фокусування 5–10 мм, крок обробки становив 5 мм. При цьому процес лазерного нагрівання чергувався з процесом автоохолодження.

Термоциклічна обробка (ТЦО) проводилась в діапазоні температур $1000 \leftrightarrow 600^\circ\text{C}$, що охоплюють температури фазових перетворень.

Температура верхньої межі циклу складала $0,75T_{пл}$. Така температура припускає відсутність морфологічних змін в евтектичних кристалах фаз втілення, в той же час може вплинути на розпадання металевої матриці, коагуляцію дисперсних кристалів фаз втілення, які знаходяться в білих шарах, що виникають при напиленні, а також процеси масоперенесення в зоні покриття-підкладка. Кількість термоциклів вибиралася з урахуванням отримання різних рівнів структурного стану.

Необхідно відзначити, що мікротвердість евтектичних областей знижується тільки після чотирьох термоциклів з 9750 МПа до 8740 МПа. Зниження мікротвердості викликано розпадом металевої матриці. Для білих шарів характерним є постійне зниження мікротвердості зі збільшенням кількості термоциклів з 13400 МПа до 9100 МПа (4 термоцикли). При цьому, після шести циклів твердість білих шарів і евтектичних областей стають приблизно рівними. Мікротвердість покриття після такої обробки дещо нижча напиленого без ТЦО, але вища ніж оплавленого лазером. Подальше збільшення кількості обробок призводить до зменшення мікротвердості білих шарів в порівнянні з евтектичними складовими. Мабуть коагуляція фаз втілення, що продовжується в білих шарах, призводить до зниження їх міцності.

ТЦО супроводжується розвитком релаксаційних процесів, які підвищують пластичність напиленого покриття, що підтверджується відсутністю тріщин на відбитах при вимірюванні мікротвердості.

В зв'язку з цим значний інтерес представляє дослідження пористості, міцності зчеплення покриття з підкладкою, процесів масоперенесення на межі з основою після 2-6 кратної ТЦО, коли зберігається відносно висока мікротвердість білих шарів покриття в цілому.

Результати досліджень показали, що лазерне термоциклування знижує пористість і суттєво підвищує міцність зчеплення плазмових покриттів з основою (табл.).

Таблиця

Залежність мікротвердості, пористості та міцності зчеплення покриття ВТН з підкладкою зі сталі 12Х18Н10Т від виду обробки

Стан покриття	Мікротвердість, МПа	Пористість, %	Міцність зчеплення, МПа
Плазмове напилення	12400	10-12	16-20
Оплавлення лазером	8200	0,5-1,0	400-450
Плазмове напилення з лазерною ТЦО (4 цикл.)	10050	7-9	90-110

Підвищення міцності зчеплення напиленого покриття безумовно пов'язано з процесами масоперенесення, ініційованими лазерною термоциклічною обробкою.

Для вивчення процесу масоперенесення на межі «покриття-матриця» в умовах лазерного термоциклування було проведено локальний мікрорентгеноспектральний аналіз. Аналіз проводився в п'яти точках по довжині відрізка, перпендикулярного до зони розділу покриття з основою. Діаметр зонда становив 2,5 мкм, глибина зондування 1,5 мкм.

В результаті проведених досліджень були одержані дані про перерозподіл в покритті і підкладці після чотирикратної ТЦО основних елементів: V, Cr, Fe і Ni. У покритті виявлено взаємодію типу Fe – V і Fe – Cr – V.

Згідно даним кількісного аналізу було визначено характер розподілу елементів. Перепади у вмісті хімічних елементів свідчать про неоднорідність покриття. Аналіз концентраційних кривих на межі "покриття - основа" показує, що термоциклічна обробка викликає протікання процесів взаємного масоперенесення елементів між покриттям і підкладкою з утворенням між ними елементів металургійного зв'язку (рис.1). При цьому спостерігається дифузія ванадію, бору, титана в основу, марганцю – в покриття. Цьому свідчать дані вимірювання міцності зчеплення таких покриттів з основою, яка підвищується з 16-20 МПа до 90-110 МПа, тобто в 5-6 разів.

Дослідження тертя і зношування плазмових покриттів у вихідному стані і після ТЦО показало різну їх зносостійкість (рис.2). ТЦО дозволяє змінювати структурний стан і термодинамічну рівновагу білих шарів, підвищуючи при цьому кількість областей з пластичнішою евтектичною структурою. Така структура здатна сприймати велику частку енергії і в більшій мірі релаксувати напруження при терті. Крім того, збільшення модуля пружності білих шарів при розпаданні повинно збільшувати його зносостійкість [8].

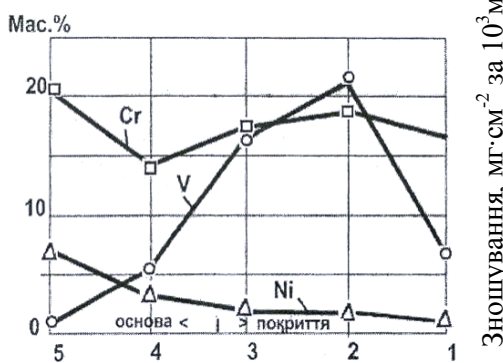


Рис. 1. Розподіл елементів по товщині плазмового покриття ВТН і поверхневому шарі сталі 12Х18Н10Т після чотирикратної термоциклічної обробки

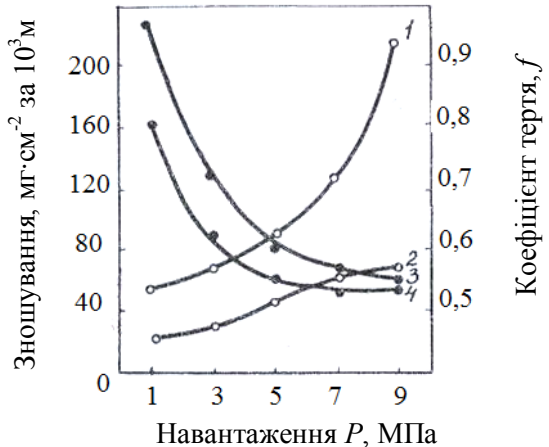


Рис. 2. Залежність триботехнічних властивостей плазмового покриття ВТН без (1, 3) і з ТЦО (2, 4) від навантаження: 1, 2 – приведена величина зносу; 3, 4 – коефіцієнт тертя

Зниження крихкості і підвищення пластичності покриття після ТЦО збільшує його здатність до утворення вторинних структур, що свідчить про його сприятливі реологічні властивості. Утворення вторинних структур забезпечує підвищення зносостійкості покриттів. При цьому вони є метастабільними і мають ультрадисперсну орієнтовану будову, а їх міцність наближається до міцності компактних матеріалів. На поверхнях тертя з покриттями, що піддавалися ТЦО, утворюються суцільні плівки, тоді як на покриттях без ТЦО утворюються плівки у вигляді окремих ділянок.

Висновки. При лазерному оплавленні плазмового покриття в результаті взаємодії розплаву і твердої підкладки відбувається масоперенесення ванадію і

бору, в меншій мірі титана і хрому в основу, розчинення заліза основи розплавом покриття. Межа між покриттям і основою стає розмитою і є твердими розчинами вказаних легуючих елементів в залізі. Покриття стає практично безпористим, міцність зчеплення підвищується до 400–450 МПа. При цьому також підвищується шорсткість поверхні, що потребує додаткової механічної обробки.

Показано, що при лазерній термоциклічній обробці відбувається значне масоперенесення легуючих елементів із основи в покриття і в деякій мірі навпаки, спостерігається розпад білих шарів і пересичених твердих розчинів.

Встановлено, що термоциклічною обробкою в діапазоні температур, що охоплюють фазові перетворення можна підвищувати міцність зчеплення плазмових покриттів з 15–20 МПа до 90–120 МПа, тобто в 4–5 раз, зберігаючи при цьому необхідний рівень структурного стану і цілеспрямовано керувати їх триботехнічними властивостями.

Дослідження триботехнічних властивостей показує, що лазерне термоциклування істотно підвищує зносостійкість плазмових покриттів, знижує їх крихкість і підвищує пластичність структурних складових, а також збільшує здатність утворювати вторинні структури.

Список літератури

1. Кузнецов В.Д. Фізико-хімічні основи створення покриттів / В.Д. Кузнецов, В.М. Пашенко. – К., НМЦ ВО, 1999. – 176 с.
2. Ющенко К.А. Інженерія поверхні // Ющенко К.А., Борисов Ю.С., Кузнецов В.Д., Корж В.М. – К., Ч Наукова думка, 2007. – 559 с.
3. Sheng L.Y. et al. Investigation on microstructure and wear behavior of the NiAl-TiC-Al₂O₃ composite fabricated by self-propagation high-temperature synthesis with extrusion // *J. Alloys Compd.* 2013. Vol. 554. P. 182-188.
4. Umanskyi O. Poliarus O. et al. Effect of ZrB₂ CrB₂ and TiB₂ Additives on the Tribological Characteristics of NiAl-Based Gas-Thermal Coatings // *Key Eng. Mater.* 2014. Vol. 604. P. 20-23.
5. Герцрикен Д.С. Импульсная обработка и массоперенос в металлах при низких температурах / Д.С. Герцрикен, В.Ф. Мазанко, В.М. Фальченко. - К. : Наук, думка, 1991. – 208 с.
6. Боровский И.Б. Массоперенос при обработке поверхности металлов оплавлением непрерывным лазерным излучением./ Боровский И.Б., Городский Д.Ж., Шарафеев И.Н., Морящев С.Ф. // Доклады АН СССР. – 1982. – Т. 263. – С. 616-687.
7. Коваленко В.С. Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов / Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., Подчерняева И.А. – М.: Наука, 1986 – 276 с.
8. Трибологія: підручник / Кіндрачук М.В., Лабунець В.Ф., Пашечко М.І., Корбут Є.В. вид-во Нац.авіац.ун-ту "НАУ-друк".–2009. –392с.

M. V. KINDRACHUK, R. G. MNATSAKANOV, I. A. HUMENIUK, I. V. BOGACH,
Y. V. PYCHENKO

FORMATION OF TRIBOTECHNICAL PROPERTIES OF PLASMA COATINGS ON STEEL 12C-Cr18-Ni10-Ti BY LASER TREATMENT

The questions of the strength of adhesion of plasma coatings with the base and their durability. These ways of improving the quality of such coatings by melting coating and thin surface layer or base their repeated cyclic heating continuous laser radiation in the range of temperatures ($T(A_{sl}) < T < T_{PL}$). In the first case the bonding strength of coating base reaches 400 - 430MPa, the second - in 4-5 times increases to 90-120MPa, while the original-15-20MPa. Laser thermal cycling are high performance, does not require the subsequent machining.

Key words: steel 12C-18CR-9Ni – Ti (type 316), plasma coating, laser radiation, thermal cycling, mass transfer

References

1. Kuznetsov V.D. Fyzyko-khimichni osnovy stvorennya pokryttiv / V.D. Kuznetsov, V.M. Pashchenko. – K., NMTs VO, 1999. – 176 s.
2. Yushchenko K.A. Inzheneriya poverkhni // Yushchenko K.A., Borysov Yu.S., Kuznetsov V.D., Korzh V.M. - K., Ch Naukova dumka, 2007. – 559 s.
3. Sheng L.Y. et al. Investigation on microstructure and wear behavior of the NiAl-TiC-Al2O3 composite fabricated by self-propagation high-temperature synthesis with extrusion // J. Alloys Compd. 2013. Vol. 554. P. 182–188.
4. Umanskyi O. Poliarus O. et al. Effect of ZrB₂ CrB₂ and TiB₂ Additives on the Tribological Characteristics of NiAl-Based Gas-Thermal Coatings // Key Eng. Mater. 2014. Vol. 604. P. 20–23.
5. Gercriken D.S. Impul'snaja obrabotka i massoperenos v metallah pri nizkikh temperaturah / D.S. Gercriken, V.F. Mazanko, V.M. Fal'chenko. – K. : Nauk, dumka, 1991. – 208 s.
6. Borovskij I.B. Massoperenos pri obrabotke poverhnosti metallov oplavleniem nepreryvnym lazernym izlucheniem./ Borovskij I.B., Gorodskij D.Zh., Sharafiev I.N., Morjashhev S.F. // Doklady All SSSR. – 1982. –Т. 263. – S. 616-687.
7. Kovalenko B.C. Lazernoe i jelektroerozionnoe uprochnenie materialov / Kovalenko B.C., Verhoturov A.D., Golovko L.F., Podchernjaeva I.A. – M.: Nauka, 1986 – 276 s.
8. Trybolohiya: pidruchnyk / Kindrachuk M.V., Labunets' V.F., Pashechko M.I., Korbut Ye.V. vyd-vo Nats.aviats.un-tu "NAU-druk".–2009. –392 s.

Кіндрачук Мирослав Васильович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри машинознавства, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058, тел./факс: +38 044 406 77 73, E-mail: nau12@ukr.net

Мнацаканов Рудольф Георгійович – д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри організації авіаційних робіт та послуг, Національний авіаційний університет, пр. Космонавта Комарова, 1, м.Київ, Україна, 03058, тел.: +38 044 406 68 75, E-mail: mnatsakanov@bk.ru.

Гуменюк Ігор Анатолійович – здобувач, Національний авіаційний університет, пр. космонавта Комарова, 1, м. Київ, Україна, 03058

Богач Яна Вячеславівна – студентка 5 курсу Аерокосмічного інституту, Національний авіаційний університет.

Пищенко Юлія Віталіївна – студентка 5 курсу Аерокосмічного інституту, Національний авіаційний університет.