

ІМПУЛЬСНО-ПЛАЗМОВЕ МОДИФІКУВАННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛЕВИХ ШТАМПІВ ГАРЯЧОЇ ВИТЯЖКИ ВИРОБІВ ІЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВУ

Ю.М. Тюрін¹, О.В. Колісниченко¹, В.М. Коржик¹, І.Д. Гос¹, О.В. Ганущак¹, Jin Ying², Zhong Fengping²

¹ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України. 03150, м. Київ, вул. Казимира Малевича, 11. E-mail: vnkorzhyk@gmail.com
²Zhejiang Academy of Special Equipment Science. 310016, Jianggan District, Hangzhou, Zhejiang, 211, Kaixuan Road.
E-mail: jinying@zjtj.org

Розглянуто технологію модифікування імпульсною плазмою робочої поверхні штампа із інструментальної сталі марки 4Х5МФ1С (аналогі: в ЄС – Х40CrMoV5-1; в Китаї – 4Cr5MoSiV1). Вказаний інструмент застосовується для штампування заготовок з титанового сплаву ВТ6 (в мас. %: Al – 3,0...6,8; V – 3,5...5,0; Ti – основа), яке виконується при температурах до 700 °С. Поверхня штампа нагрівається, що веде до її окислення та дифузійного перерозподілу легуючих елементів. Імпульсно-плазмова обробка штампу приводить до формування пружно-пластичних деформацій поверхневого шару в інструментальній сталі, що в поєднанні з імпульсним тепловим і електромагнітним впливом забезпечує подрібнення структури сплаву та інтенсифікує механізми дифузії легуючих елементів. Дослідження показали, що модифікований шар (товщиною понад 80 мкм) в сталі 4Х5МФ1С, утворений в процесі імпульсно-плазмової обробки, містить до 2,5 % вуглецю, до 12 % кисню та до 3 % вольфраму. Встановлено наявність у вказаному шарі нанокристалічних структур з розміром менше 100 нм. Твердість модифікованого шару складає понад 700 $HV_{0,025}$. Шорсткість поверхні після імпульсно-плазмової обробки не змінилася. Досвід промислового використання даної технології показав, що модифікування поверхні штампа зі сталі 4Х5МФ1С забезпечила його високу працездатність при глибокій витяжці виробів з нагрітого (до 700 °С) листа титану ВТ-6 товщиною 3 мм. Бібліогр. 11, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: плазмова обробка, легування, інструментальні сталі, штамп, деформування титану, структурування, зносостійкість, працездатність

Відомо, що нанокристалічні матеріали мають високі характеристики міцності та теплостійкості [1], але виробництво їх у великих обсягах в даний час є проблематичним. Технологія імпульсно-плазмового модифікування дозволяє модифікувати поверхневий шар металевого виробу без його нагрівання. Процес модифікування супроводжується легуванням і наноструктуруванням поверхневого шару. Механізм цього процесу описаний в монографії [2].

У штампованого інструмента найбільшим навантаженням піддається робоча поверхня. Отже, її модифікування істотно збільшить можливості технології штампування при деформації сплавів на основі титану. Пропонується наноструктурувати та легувати поверхневий шар штампа вуглецем, киснем і вольфрамом. Наявність в поверхневому шарі штампованої сталі легуючих елементів блокує можливість окислення та дифузійних процесів при нагріванні штампа. Гранично високий вміст вуглецю та кисню в металевому сплаві виключає хіміко-термічні процеси його взаємодії з титаном навіть при високих температурах. Більш докладно імпульсно-плазмова технологія легування та наноструктурування поверхневого шару розглядається в [3].

Метою даної роботи є створення ресурсозберігаючої ефективної технології модифікування поверхневого шару штампованого інструмента, що забезпечує його високу працездатність при деформуванні хімічно активних матеріалів і сплавів, наприклад, на основі титану.

Аналіз роботи інструмента зі штампованої сталі після хімічно-термічної обробки показує [4, 5], що його максимальна працездатність спостерігається після комплексного легування поверхневого шару. Термодифузійне насичення здійснюється, як правило, при високій температурі (900...1100 °С). Тривалий нагрів ускладнює термічну обробку, вимагає додаткових витрат енергії і, крім того, обумовлює зростання кристалів. В даний час розвиваються технології, які дозволяють змінювати структурно-фазовий склад поверхневого шару на глибину до десятків мікрон. Використовують технології поверхневого лазерного зміцнення, легування та азотування [5, 6], вакуумні плазмові пристрої з регульованим складом атмосфери та тиском для обробки поверхні інструментальних матеріалів [7]. Створено осьовий електромагнітний прискорювач плазми для модифікування поверхні [8], балістичний плазмотрон, заснований на принципі адіаба-

Тюрін Ю.М. <http://orcid.org/0000-0002-7901-7395>

Колісниченко О.В. – <http://orcid.org/0000-0003-4507-9050>, Коржик В.М. – <http://orcid.org/0000-0001-9106-8593>,

Гос І.Д. – <http://orcid.org/0000-0002-9469-8002>, Ганущак О.В. – <http://orcid.org/0000-0003-4392-6682>,

Jin Ying – <http://orcid.org/0000-0002-9551-5036>, Zhong Fengping – <http://orcid.org/0000-0002-2046-7199>

© Ю.М. Тюрін, О.В. Колісниченко, В.М. Коржик, І.Д. Гос, О.В. Ганущак, Jin Ying, Zhong Fengping, 2021

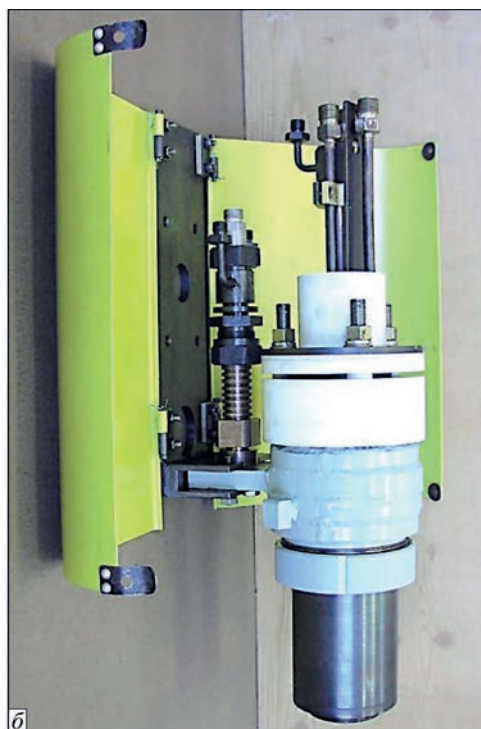
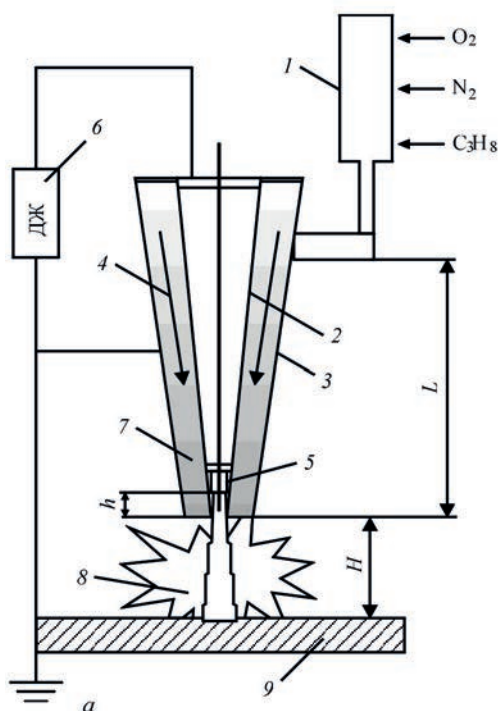


Рис. 1. Генератор імпульсної плазми для модифікування поверхні: схема працюючого генератора (а) та вигляд генератора на руці маніпулятора (б)

тичного стиснення плазмоутворюючого середовища [9].

У статті представлені результати модифікування штампованої сталі коаксіальним імпульсно-плазмовим генератором [9]. Імпульсно-плазмова обробка забезпечує швидке нагрівання ($10^{-3} \dots 10^{-4}$ с) поверхневого шару сталі з подальшим інтенсивним охолодженням. Високі швидкості нагріву та охолодження до 10^7 К/с ведуть до деформування поверхневого шару і, як наслідок, формування нанокристалічної структури та високої щільності дислокацій. У плазму можливо вводити різні легуючі елементи, що в поєднанні з імпульсним електромагнітним впливом і пружно-пластичною деформацією інтенсифікує механізми їх дифузії в поверхневий шар [10, 11].

Для модифікування робочої поверхні штампів використали імпульсно-плазмовий генератор (рис. 1), що складається з детонаційної камери 1, в якій здійснюється формування та згоряння горючої газової суміші (C_3H_8 , O_2 , N_2) і коаксіальних електродів 2, 3. Між електродами утворюється потік продуктів згоряння 4 з частотою, яка може змінюватися в межах 1...5 Гц. По осі плазмотрона розташований витратний електрод 5, який випаровується та збагачує плазму елементами легування.

В результаті детонаційного згоряння горючої суміші в генераторі плазми утворюються іонізовані продукти згоряння 7, які замикають R-L-C контур джерела живлення. У міжелектродному зазорі генератора плазми електричний струм протікає за фронтом детонаційної хвилі по прохідному об'є-

му газу, ступінь іонізації якого згодом збільшується. Плазмовий струмінь 8 з сопла генератора натікає на модифіковану поверхню 9 (катод). Навколо центрального електрода 2 і плазмового струменя 9 утворюється азимутальне магнітне поле, яке взаємодіє зі струмом I , що протікає в міжелектродному зазорі, і створює електромагнітну силу, яка прискорює та фокусує плазму. Крім того, при протіканні електричного струму виділяється джоулеве тепло, яке за рахунок розширення нагрітого об'єму газу також підсилює газодинамічну складову плазми, здійснюючи швидке нагрівання поверхневого шару (рис. 2).

Розраховані енергетичні характеристики плазмових струменів на виході з генератора плазми мають лінійну залежність від напруженості електричного поля та довжини міжелектродного зазору. Так, при довжині міжелектродного зазо-

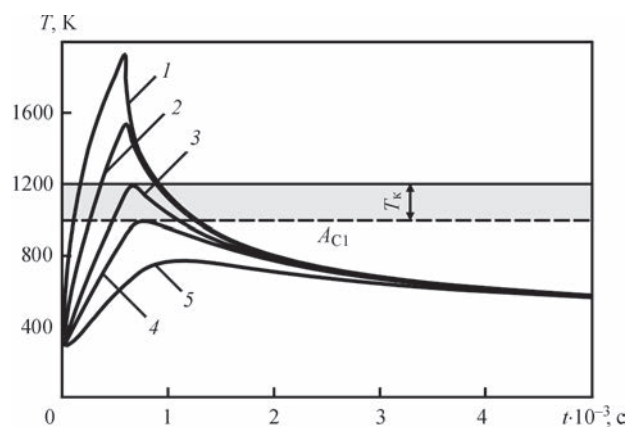


Рис. 2. Зміна температури в шарі зразка на глибині: 1 – 0; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 100 мкм

ру $L = 300$ мм і напруженості електричного поля 400 кВ/м плазмовий струмінь може мати температуру 25000 К та швидкість 8 км/с [2].

Плазмовий струмінь замикає електричний ланцюг між витратним електродом і поверхнею виробу. Тонкий шар матеріалу на торці витратного електрода перегрівається та руйнується вибухом (переходом в стабільний стан з метастабільного), що забезпечує синхронізацію введення в плазмовий струмінь нагрітих і прискорених елементів, що утворюють електрод. У зоні гальмування плазмового струменя на оброблюваній поверхні утворюється шар ударно-стислої плазми та продуктів ерозії електрода. Тривалість взаємодії цього шару з поверхнею виробу складає $0,4 \dots 0,6$ мс, тепловий потік варіюється в межах $0,3 \cdot 10^5 \dots 1,4 \cdot 10^6$ Вт/см². Тепловий потік регулюється параметрами $R-L-C$ контуру джерела живлення, відстанню H і поглибленням електрода h . Поглиблення електрода в основному впливає на діаметр плями контакту плазми з поверхнею виробу ($8 \dots 25$ мм). Це в свою чергу дозволяє регулювати щільність теплового потоку при однаковій енергії імпульсу. В ході експериментів встановили, що при імпульсно-плазмовому впливі протягом $3 \dots 5$ мс між імпульсами на поверхню натікають і конденсуються продукти плазмохімічного синтезу з міжелектродного зазору. Подальший плазмовий імпульс оплавляє тонкий поверхневий шар, перемішуючи та насичуючи його легуючими елементами. Це забезпечує можливість додаткового легування поверхневого шару шляхом попереднього нанесення легуючих елементів на поверхню виробу.

На основі теоретичного аналізу нестационарного рівняння теплопровідності здійснено оцінку теплових потоків і розраховано зміну температури в часі за один імпульс тривалістю $t = 0,6$ мс та потужністю $q = 7,2 \cdot 10^8$ Вт/м² на різній відстані від поверхні при обробці сталеві поверхні. Розрахунки показали, що швидкості нагріву та охолодження досягають 10^7 К/с, а градієнти температур по товщині модифікованого шару – $2,5 \cdot 10^7$ К/м. За час між імпульсами (при частоті 2 Гц) нагріті

до температури плавлення поверхневі шари встигають охолонути. Багаторазовий імпульсно-плазмовий вплив на поверхню призводить до періодичної деформації поверхневих шарів, фазового наклепу та подрібнення структури.

Експерименти проводилися на штампованій сталі марки $4X5M\Phi 1C$ (аналоги: в ЄС – $X40CrMoV5-1$; в Китаї – $4Cr5MoSiV1$), яку використовують для виготовлення інструмента, що працює в умовах тривалих змін тепла до температур 630 °С (прес-штемпель, голки для прошивки труб, молоткові та пресові вставки, інструмент для висадки заготовок і т. п.). Для підвищення теплостійкості робочого шару інструмента пропонується підвищити вміст вольфраму, кисню та вуглецю в поверхневому шарі, а також змінити його структуру до нанокристалічної. Було встановлено наступні технологічні параметри імпульсно-плазмової обробки: індуктивність ланцюга розряду $L = 30$ мкГн, ємність конденсаторної батареї $C = 960$ мкФ і напруга на обкладках конденсаторної батареї $U = 3,2$ кВ, еродований електрод – W . Додаткове введення вуглецю здійснюється шляхом нанесення на поверхню обзамок з графіту. Витрати: пропану – $0,38$ м³/год; кисню – $1,04$; повітря – $1,13$. Здійснювалося підведення потенціалу від джерела живлення до виробу/зразка, що посилювало плазмовий вплив шляхом комутації енергії електричного розряду між електродом генератора (анод) та модифікованою поверхнею (катод). Встановлювалась кількість (5 разів) плазмових перекриттів на модифіковані поверхні. Як зазначалось вище, зміна величини поглиблення витратного електрода призводить до зміни діаметра плями обробки, та, відповідно, і щільності теплового потоку в виріб. Для імпульсно-плазмової обробки зразків і штампа було встановлено $h = 25$ мм. При цьому діаметр видимої зони обробки становив 18 мм. Зразок і штампи оброблялись на відстані $H = 50$ мм. Цей режим забезпечував досить високу щільність енергії, яка оплавляла та випаровувала матеріал з поверхні зразка.

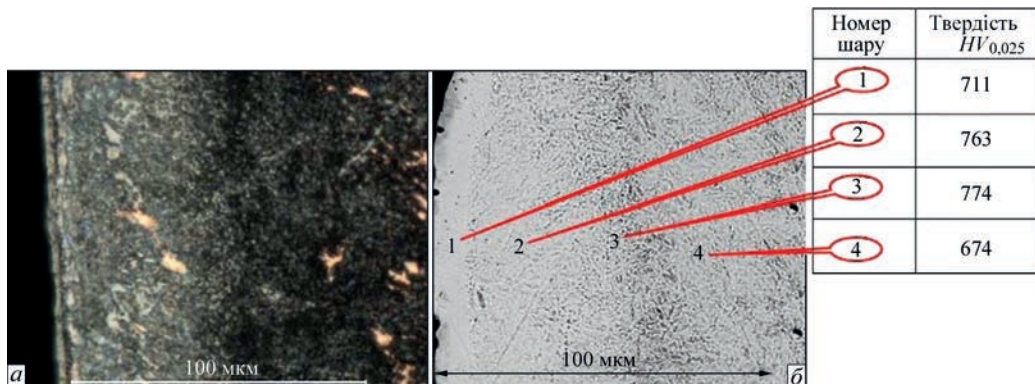


Рис. 3. Аналіз поверхні: а – за допомогою оптичного інвертованого мікроскопа OLIMPYS GX 51; б – електронно-іонного скануючого мікроскопа Quanta 200 3D

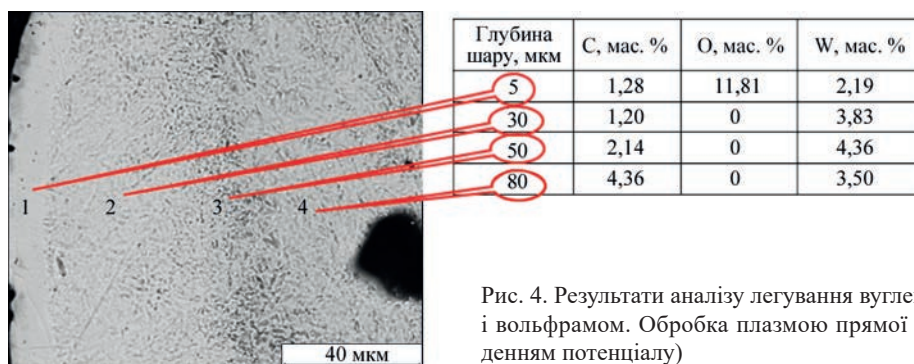


Рис. 4. Результати аналізу легування вуглецем, киснем і вольфрамом. Обробка плазмовою прямої дії (з підведенням потенціалу)

Методами оптичної металографії на зразку були виявлені видимі сліди оплавлення поверхні. Мікроскопічний аналіз модифікованого шару поверхні, отриманого з підведенням потенціалу, проведений з використанням електронно-іонного скануючого мікроскопа Quanta 200 3D, показав, що на поверхні зразка був сформований модифікований шар товщиною до 100 мкм (рис. 3), який не має чіткої межі з основним металом. Твердість поверхневого шару збільшилася в 3 рази до $774 HV_{0,025}$, а твердість матеріалу зразка на глибині 80 мкм – до $674 HV_{0,025}$, що в два рази вище твердості основи.

Висока щільність енергії забезпечила подрібнення структури поверхневого шару за рахунок високих градієнтів температур. Однак поелементний аналіз не показав в шарі наявності елементів, які становлять плазму, що мабуть обумовлено високою температурою, випаровуванням і руйнуванням тонкого поверхневого шару. Поверхня зразка мала шорсткість і сліди плавлення, окислення, осадження вуглецю та розбризкування матеріалу.

Рентгеноструктурний аналіз підтвердив значне окислення. На поверхні присутній вуглець, осаджений з графітового покриття та конденсований з продуктів згоряння. Легуючі елементи в таких умовах окислюються і видаляються з поверхні разом зі зруйнованим шаром основного металу зразка.

Дослідження зразка на просвічуючому електронному мікроскопі, забезпеченому системою енергодисперсійного мікроаналізу, дозволило визначити, що легування поверхневого шару

здійснено на глибину до 80 мкм (рис. 4). Верхній оплавлений шар на глибині до 5 мкм містить до 11,81 мас. % кисню, 2,19 мас. % вольфраму та 1,28 мас. % вуглецю. На глибині 20...80 мкм модифікований шар має (точки 2, 3, 4 на рис. 3) підвищений в 2...3 рази вміст вольфраму (3,83, 4,36 та 3,50 мас. % відповідно) і вуглецю (1,2...4,36 мас. %). Основи модифікованого шару не містять кисень. У тонкому «білому» шарі (точка 1 на рис. 4) видно неоднорідності, які, мабуть, обумовлені нерівномірним окисленням (вміст кисню до 11,81 %).

Кристалічна структура модифікованого шару містить дискретні елементи розміром менше 100 нм (рис. 5). У поверхневому шарі на глибині до 6 мкм не спостерігається наявності кристалічної структури. Модифікований шар складається з нанокристалічного сплаву, що має мабуть аморфні прошарки.

У поверхневому шарі штампованої сталі збільшувалася концентрація основних елементів (вольфрам, кисень, вуглець), що впливають на теплостійкість цього шару. Вольфрам вводили в плазмовий струмінь у вигляді продуктів ерозії металевого електрода (стрижня), вуглець вводили з поверхні у вигляді прошарку, а кисень є складовим елементом плазми. Утворення щільного окисленого шару на поверхні штампованої сталі закриває її від подальшого окислення та перешкоджає контакту металів штампованого сплаву та штампа. Розподіл легуючих елементів по товщині модифікованого шару визначали за допомогою атомно-емісійного спектрометра тліючого розряду. Прецизійний кількісний пошаровий

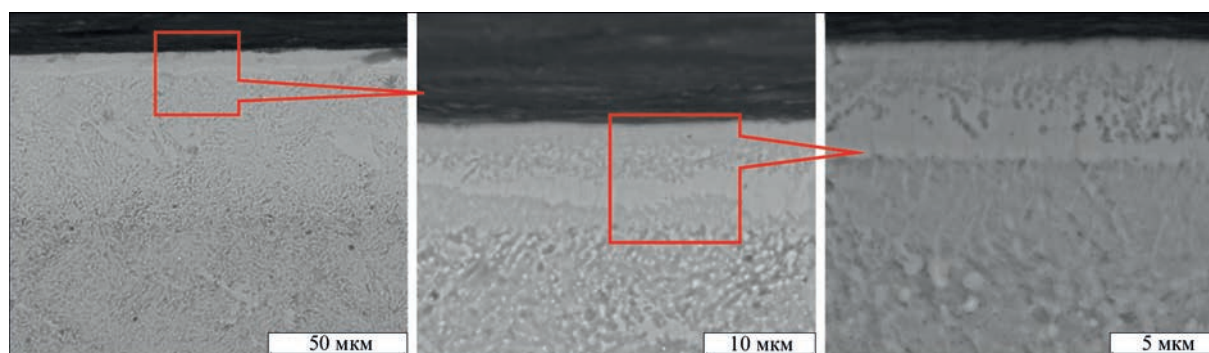


Рис. 5. Мікроскопічний аналіз модифікованого шару поверхні, отриманого з підведенням потенціалу. Електронно-іонний скануючий мікроскоп Quanta 200 3D. Травлення реактивом Ржешотарського



Рис. 6. Поверхня штампа для глибокої витяжки виробів з листа титану VT-6: а – немодифікована; б – модифікована імпульсною плазмою з комплексним легуванням вуглецем, вольфрамом і киснем

аналіз штампованої сталі після імпульсно-плазмової обробки з введенням в плазму вольфраму, вуглецю і кисню показав, що легуючі елементи розташовані на глибині до 80 мкм (див. рис. 4). У поверхневому шарі утворився новий матеріал з високим вмістом легуючих елементів.

Очікується, що додаткове легування поверхні штампованої сталі вуглецем і киснем знизить вплив кисню в процесі роботи штампів. Обробка виробу імпульсною плазмою та комплексне легування збільшить термін служби поверхні штампованого інструмента та виключить відмови через крихкі руйнування.

З урахуванням попередньо проведеної роботи були модифіковані робочі поверхні великогабаритної матриці штампа для гарячої витяжки титанового листа зі сплаву VT-6, товщиною 3 мм (рис. 6). Робоча зона штампа (матриця) була виготовлена зі штампованої сталі 4X4ВМФС (ДІ-22), термічно обробленої за стандартною технологією. Поверхня штампа шліфувалася після термічної обробки $R_z = 1,6$.

Матриця штампа до штампування нагрівається до температури 650...690 °С. При температурі 500 °С і вище на поверхні матриці утворюється окалина, що істотно погіршує ковзання заготовки при витяжці форми. Спостерігається руйнування поверхні штампа, налипання титану на поверхні, окислення та порушення шорсткості (див. рис. 6, а).

Для підвищення працездатності штампованого інструмента було проведено модифікування поверхні імпульсною плазмою. Обробка здійснювалася імпульсно-плазмовим генератором «Імпульс» (рис. 1).

Пружнопластичні деформування поверхневого шару в поєднанні з імпульсним тепловим і електромагнітним впливом забезпечує подрібнення структури сплаву та інтенсифікує механізми дифузії легуючих елементів. Попередні дослідження зразків-представників показали, що модифікований шар містить легуючі елементи – вуглець, вольфрам та кисень, має підвищену в три рази твердість і знижені характерні розміри кристаліч-

Результати промислових випробувань модифікованого імпульсною плазмою штампованого інструмента

Найменування інструмента	Без мод. т/од.	Після мод. т/од.	Ефективність, %
Відрізна матриця	24,4	79,35	325
Матриця опорна	4,5	29,23	650
Пуансон прорізний	1,8	7,08	393
Пуансон деформування	10,85	22,5	207
Матриця формуюча	18,0	54,0	300

них структур (< 100 нм). Модифікована поверхня відрізняється низькою шорсткістю.

Штампи використовували в технологічному процесі глибокої витяжки титанового листа товщиною 3 мм. Лист нагрівався до температури 700 °С. Після використання штампів за призначенням на їх поверхні не спостерігалось слідів окислення та порушення шорсткості (див. рис. 6, б).

Технологію та технологічне обладнання для імпульсно-плазмового зміцнення інструмента застосовують в метизному виробництві ВАТ «Череповецький сталепрокатний завод». Досвід промислової експлуатації показав, що працездатність інструмента з штампованої сталі, підданої імпульсно-плазмовій обробці, підвищилася в 2...6 разів (див. таблицю [10]).

Висновки

Запропоновані технологія та устаткування для імпульсно-плазмового модифікування забезпечують легування та наноструктурування поверхневого шару інструментальних сталей на глибину понад 80 мкм.

Промислові випробування підтвердили ефективність модифікування. Після імпульсно-плазмової обробки робочих поверхонь великогабаритної матриці штампа для гарячої витяжки титанового листа зі сплаву VT-6 товщиною 3 мм інструмент з штампованої сталі 4X5МФ1С при нагріванні до температури 700 °С не мав відмов через зношування захопленням, крихкого руйнування або зламу. Працездатність інструмента була збільшена в 2...6 разів. Причиною відмови інструмента слугує тільки розжарення робочих поверхонь.

Список літератури

1. Гусев А.И. (2009) *Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии*. 2-е изд., испр. и дополн. Москва, ФИЗМАТЛИТ.
2. Тюрин Ю.Н., Жадкевич М.Л. (2008) *Плазменные упрочняющие технологии*. Киев, Наукова думка.
3. Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. (2009) Plasma-Detonation Technology for Modification of the Surface Layer of Metal Parts. *The Open Surface Science Journal*, **1**, 13–19.
4. Ляхович Л.С., Ворошнин Л.Г., Панич Г.Г., Щербаков Э.Д. (1974) *Многокомпонентные диффузионные покрытия*. Минск, Наука и техника.
5. Ершов Г.С., Позняк Л.А. (1993) *Структурообразование и формирование свойств сталей и сплавов*. Киев, Наукова думка.
6. Abboud, J., Benyounis, K., Olabi, A. (2007) Laser surface treatments of iron-based substrates for automotive application. *Journal of Materials Processing Technology*, **182**, 427–431.
7. Cherenda, N.N., Uglov, V.V., Anishchik, V.M. et al. (2005) Structure-phase transformations in high-speed steel treated by compression plasma flow. *Vacuum*, **78**, 483–487.
8. Rott, M., Raif, M., Igenbergs, E. (2006) Surface modification processes by hypervelocity plasma pulses. *International Journal of Impact Engineering*, **33**, 691–702.
9. Shmelev, V., Podoynitsyn, S., Vasilik, N. (2006) Application of the ballistic plasmatron of superadiabatic compression for surface treatment. *Surface & Coatings Technology*, **200**, 4939–4946.
10. Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Цыганков Н.Г. (2001) Импульсно-плазменное упрочнение инструмента. *Автоматическая сварка*, **1**, 38–44.
11. Korzyk, V., Changgen, Feng, Tyurin, Y. et al. (2020) Pulse-plasma technologies of modification and increasing durability of metal working tool. *The 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology*, 325–339.

References

1. Gusev, A.I. (2009) *Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies*. 2nd Ed. Moscow, FIZMATLIT [in Russian].
2. Tyurin, Yu.N., Zhadkevich, M.L. (2008) *Plasma hardening technologies*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
3. Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V. (2009) Plasma-detonation technology for modification of the surface layer of metal parts. *The Open Surface Sci. J.*, **1**, 13–19.
4. Lyakhovich, L.S., Voroshnin, L.G., Panich, G.G., Shcherbakov, E.D. (1974) *Multicomponent diffusion coatings*. Minsk, Nauka i Tekhnika [in Russian].
5. Ershov, G.S., Poznyak, L.A. (1993) *Structure formation and formation of properties of steels and alloys*. Kiev, Naukova Dumka [in Russian].
6. Abboud, J., Benyounis, K., Olabi, A. (2007) Laser surface treatments of iron-based substrates for automotive application. *J. Mater. Proc. Technology*, **182**, 427–431.
7. Cherenda, N.N., Uglov, V.V., Anishchik, V.M. et al. (2005) Structure-phase transformations in high-speed steel treated by compression plasma flow. *Vacuum*, **78**, 483–487.
8. Rott, M., Raif, M., Igenbergs, E. (2006) Surface modification processes by hypervelocity plasma pulses. *Int. J. of Impact Engineering*, **33**, 691–702.
9. Shmelev, V., Podoynitsyn, S., Vasilik, N. (2006) Application of the ballistic plasmatron of superadiabatic compression for surface treatment. *Surface & Coatings Technology*, **200**, 4939–4946.
10. Tyurin, Yu.N., Kolisnichenko, O.V., Tsygankov, N.G. (2001) Pulse-plasma hardening of tools. *The Paton Welding J.*, **1**, 38–44.
11. Korzyk, V., Changgen, Feng, Tyurin, Y. et al. (2020) Pulse-plasma technologies of modification and increasing durability of metal working tool. *In: The 394th Young Scientists Forum of China Association for Science and Technology*, 325–339.

PULSE-PLASMA MODIFICATION OF THE SURFACE OF METAL STAMPS OF HOT DRAWING OF TITANIUM ALLOY PRODUCTS

Yu. M. Tyurin¹, O.V. Kolisnichenko¹, V.M. Korzhik¹, I.D. Gos¹, O.V. Ganushchak¹, Jin Ying², Zhong Fengping²

¹ E.O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, 11 Kazymyr Malevych Str., 03150, Kyiv, Ukraine.

E-mail: vnkorzhyk@gmail.com

² Zhejiang Academy of Special Equipment Science. 310016, Jiangan District, Hangzhou, Zhejiang, 211, Kaixuan Road.

E-mail: jinying@zjtj.org

The technology of pulse plasma modification of the working surface of the stamp of 4Kh5MF1S tool steel (analogues: in the EU - X40CrMoV5-1; in China - 4Cr5MoSiV1) is considered. The mentioned tool is used for stamping billets of titanium VT6 alloy (wt.%: Al – 3.0...6.8; V – 3.5...5.0; Ti – base), which is performed at temperatures up to 700 °C. The surface of the stamp is heated, which leads to its oxidation and diffusion redistribution of alloying elements. Pulse-plasma stamping leads to the formation of elastic-plastic deformations of the surface layer in tool steel, which in combination with pulsed thermal and electromagnetic effects provides refinement of the alloy structure and intensifies the diffusion mechanisms of alloying elements. Studies showed that the modified layer (over 80 μm thickness) in 4Kh5MF1S steel, formed in the process of pulse-plasma treatment, contains up to 2.5% carbon, up to 12% oxygen and up to 3% tungsten. In the mentioned layer the presence of nanocrystalline structures with a size of less than 100 nm was revealed. The hardness of the modified layer is more than 700 HV 0.025. The surface roughness after pulse-plasma treatment did not change. Experience of industrial use of this technology showed that modification of a surface of a stamp from 4Kh5MF1S steel provided its high efficiency at deep drawing of products from the heated (to 700 °C) sheet of VT-6 titanium of 3 mm thickness. 11 Ref., 1 Tabl., 6 Fig.

Keywords: plasma treatment, alloying, tool steels, stamp, titanium deformation, structuring, wear resistance, operability

Надійшла до редакції 29.04.2021

**XX МІЖНАРОДНИЙ
ПРОМИСЛОВИЙ ФОРУМ – 2021**
МІЖНАРОДНІ СПЕЦІАЛІЗОВАНІ ВИСТАВКИ

16 - 19
листопада

