УДК 621.785

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПЛАЗМОВОГО ПОКРИТТЯ НА СТІЙКІСТЬ МЕТАЛЕВИХ ФОРМ[7]

Путівський А. О., студент групи МС-11-23
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Анотація. *Запропоновані сталі, що можуть замінити сталь 3Х2В8 за термічною витривалістю. Встановлено, що нанесення плазмового покриття суттєво підвищує експлуатаційні характеристики сталей-замінників.*
Ключові слова: *термічна витривалість, корозійна стійкість, кількість термоциклів, плазмове покриття.*

THE INVESTIGATION OF INFLUENCE OF PLASMA`S COATING ON THE STABILITY OF METALICAL FORM

Putivskyi A.O., student of group MC-11-23
Kharkiv National Automobile and Highway University

Abstract. *It is proposed the steels, ability to substitute steel 3X2B8 on heat-treating`s durability. It is established, that application of plasma's coating rises essentially operational characteristics of steels-substituters.*
Key words: *hermal endurance, corrosion resistance, the number of thermal cycles, plasma coating.*

Вступ

Одним з перспективних способів отримання виливків є лиття під тиском (ЛПТ). Цей метод дозволяє одержувати відливки високої точності, практично виключає їх подальшу механічну обробку, забезпечує високу продуктивність праці. Разом з тим лиття під тиском має ряд істотних недоліків, головним з яких є низька стійкість дорогих прес-форм, особливо при литті мідних сплавів. До теперішнього часу основні заходи щодо підвищення стійкості прес-форм ЛПТ мідних сплавів були спрямовані на дослідження матеріалів із кращим поєднанням міцносних і пластичних характеристик. Однак галузь дії цих заходів обмежена високою вартістю і дефіцитністю нових матеріалів.

При литті під тиском сплавів на мідній основі головною причиною виходу з ладу формотворчих деталей прес-форм є термічна втома їх матеріалу, яка полягає в руйнуванні деталей під дією циклічних температурних напружень, викликаних нерівномірним розподілом температури в стінці форми. Основну відповідальність за руйнування несе тонкий поверхневий шар: у ньому створюються максимальні значення напружень і температури, він відчуває на собі агресивну дію рідкого металу. Тому рішення задачі підвищення стійкості прес-форм може бути досягнуто за рахунок впливу на тонкий поверхневий шар з метою підвищення його опору циклічним температурним напруженням і агресивному середовищу. При існуючій технології виготовлення прес-форм всі формотворчі деталі повністю виготовлені з однієї і тієї ж високолегованої сталі. Оскільки внутрішні шари працюють в менш жорстких умовах, вони можуть бути виготовлені з менш дорогих сталей, що забезпечують необхідний комплекс властивостей.

[7] Робота виконана під керівництвом професора Глушкової Д.Б.

Все це визначає актуальність завдання створення поверхневого шару, який дозволяє підвищити стійкість прес-форм і замінити вольфрамовмісні сталі економнолегованими.

Такий поверхневий шар повинен мати: низьку теплопровідність для збільшення градієнта температур, гарну адгезійну взаємодію з основним металом прес-форми, низьку адгезійну взаємодію з розплавом, високу окалиностійкість і корозійну стійкість.

Експериментальні та виробничі дані щодо впливу методів хімічної, хіміко-термічної обробки, поверхневого легування на стійкість прес-форм показують, що жоден з випробуваних методів не дає стійких промислових результатів.

На підставі відомих з літературних джерел властивостей плазмових покриттів показано перспективність їх застосування для підвищення терміну експлуатації прес-форм.

Аналіз властивостей матеріалів, які можуть бути застосовані в якості покриттів, дозволив зупинитися на нітриді титану, що володіє:

1) хорошими опірністю руйнуванню при значних коливаннях температури і напружень, окалиностійкістю і корозійною стійкістю;
2) високими модулем пружності, мікротвердістю і теплостійкістю;
3) низькими теплопровідністю і адгезійною взаємодією з мідними сплавами у всьому діапазоні робочих температур до 1000 ° С.

Крім того, розходні матеріали (титан і азот) не є дефіцитними і широко використовуються в промисловості.

Мета та постановка завдання

Метою цього дослідження був пошук можливості заміни сталі 3Х2В8 та встановлення впливу плазмового покриття на експлуатаційні характеристики запропонованих сталей-замінників.

Матеріал і методика дослідження

Матеріалом дослідження є сталі 3Х2В8, 5ХНМ, 4Х5МФС. Випробування на термічну витривалість проводилися за методикою, що імітує роботу реальних ливарних форм.

Покриття наносили за допомогою вакуумно-плазмової установки «Булат» методом конденсації із застосуванням іонного бомбардування.

Метод включає два основних етапи: 1 – очищення, нагрівання і активацію поверхні підкладки бомбардуванням іонами осаджуємого матеріалу, прискореними до енергії необхідної величини; 2 – осадження покриття при безперервному іонному бомбардуванні конденсату в режимі, що забезпечує формування покриття з необхідними службовими властивостями.

В процесі іонного очищення частками, що бомбардують, досягається видалення газів і нагрівання поверхні деталей. Бомбардування поверхні дозволяє отримувати атомно чисту поверхню деталі, що підвищує швидкість поверхневих реакцій, які відбуваються при подальшому осадженні покриття. При цьому має місце нагрівання, що сприяє посиленню дифузійних процесів між покриттям і поверхнею.

Очищення іонним бомбардуванням, нагрівання і активація зміцнюваної деталі забезпечує високу адгезію до неї покриття.

Результати експерименту та їх обговорення

Наявність плазмових покриттів на деталях прес-форм впливає на рівень і характер розподілу температурного навантаження на робочих поверхнях під покриттям.

Методом математичного аналізу отримано рівняння, що виражає залежність температури формотворної деталі як функцію відстані від поверхні та від часу. Порівнюючи отримані значення температури протягом одного циклу з наведеними в літературі аналогічними значеннями температурного навантаження деталей без плазмового покриття, можна відзначити, що робочі шари прес-форм з покриттям, хоча і піддаються впливу змінних температур, але максимальна температура знижена на 100-150 °С. Зміна температурного навантаження дозволяє знизити вимоги до матеріалів прес-форм для лиття під тиском мідних сплавів. Вони можуть бути обрані із сталей, що застосовуються при литті під тиском алюмінієвих та цинкових сплавів, що мають температури розплаву 600-650 °С.

Після аналізу хімічного складу застосовуваних у даний час в якості матеріалів, з яких виготовляють прес-форми лиття під тиском напівтеплостійких сталей нами були обрані сталі сталі 4Х5МФС і 5ХНМ, що не містять дефіцитний вольфрам. Раніше проведеними на кафедрі дослідженнями доведена доцільність заміни сталі 3Х2В8Ф сталлю 4Х5МФС для прес-форм лиття під тиском алюмінієвих сплавів. Вміст хрому в цій сталі доведено до 5 % для забезпечення її глибокої прогартовуваності, що дозволяє виконувати гартування на повітрі. Високий вміст в сталі ванадію дозволяє попередити формування грубозернистої будови. В її карбідній фазі значна частка припадає на карбід $M_{23}C_6$. У літературі вказується, що така сталь має більш високу пластичність, ніж сталь 3Х2В8Ф, при однакових значеннях границі міцності [1].

Сталь 5ХНМ – напівтепллостійка сталь підвищеної в'язкості і високої прогартовуваності. Підвищена в'язкість досягається легуванням нікелем, а висока прогартовуваність – марганцем і хромом. Завдяки присутності молібдену обидві сталі мало чутливі до крихкості 2-го роду, яка виникає після відпуску при 500-560 °С.

Гартування вибраних марок сталі проводили при температурах, що забезпечують розчинення більшої частини карбідів та отримання высоколегованного мартенситу. Після гартування сталі піддавалися високотемпературному відпуску ($t_{відп}$ = 550 °С для сталі 4Х5МФС, $t_{відп}$ = 500 °С для сталі 5ХНМ) з метою отримання високих значень ударної в'язкості і границі витривалості.

Коефіцієнти термічного розширення обраних марок сталей ($\alpha_{4Х5МФС} = 10{,}1 \cdot 10^{-6}$ град$^{-6}$, $\alpha_{5ХНМ} = 8{,}9 \cdot 10^{-6}$ град$^{-6}$) близькі за своїм значенням коефіцієнту термічного розширення нітриду титану ($\alpha_{TiN} = 9{,}35 \cdot 10^{-6}$ град$^{-6}$).

З метою отримання порівняльних даних з термічної витривалості сталей, здатних замінити 3Х2В8Ф, проводилися випробування термічної витривалості на установці, що дозволяє випробовувати на термічну витривалість матеріали з будь-яким джерелом нагрівання, точно відтворювати тепловий режим роботи металевої форми, дає можливість варіювати тривалість нагріву і рівень температури, що дозволяє отримати порівняльні як якісні, так і кількісні дані з термічної втоми матеріалів. Працює установка в автоматичному режимі. Частина зразків для випробування на термічну витривалість піддана сульфоціануванню та низькотемпературному ціануванню, які за даними практичного досвіду найбільш ефективні в практиці лиття під тиском.

Перша серія випробувань включала в себе випробування зразків із сталі 3Х2В8Ф, 5ХНМ, 5ХНМ з покриттям, 4Х5МФС, 4Х5МФС з покриттям. Випробували одночасно по 4 зразка, в кожну групу випробовуваних зразків обов'язково входив еталон.

Аналіз отриманих результатів показав, що після 500 циклів сумарна довжина тріщин на зразках із сталі 5ХНМ з покриттям в 3 рази менше, ніж без покриття; на зразках із сталі 4Х5МФС з покриттям в 3,5-4 рази менше, ніж з тієї ж марки сталі без покриття. Після 1500 циклів у зразків із сталі 5ХНМ з покриттям сумарна довжина тріщин у 5 разів менше, а у сталі 4Х5МФС з покриттям – у 4 рази менше, ніж у зразків з тієї ж сталі без покриття.

У той же час сумарна довжина тріщин у зразків із сталі 3Х2В8Ф протягом усього періоду випробувань в 2,5-3 рази більше, ніж у зразків із сталей 5ХНМ та 4Х5МФС з покриттям.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що сталі марок 5ХНМ та 4Х5МФС після нанесення на них покриття нітриду титану можуть бути використані в якості матеріалів-замінників сталі 3Х2В8Ф для прес-форм для лиття під тиском мідних сплавів.

Наступною серією були випробування зразків, підданих різним видам поверхневої обробки: низькотемпературному ціануванню, сульфоціануванню і нанесенню плазмових покриттів нітриду титану товщиною від 2 до 7 мкм. Аналіз отриманих результатів показав, що найбільшу термічну витривалість мають зразки з обох марок сталі з плазмовим покриттям. Сумарна довжина тріщин у зразків після низькотемпературного ціанування і сульфоціанування мало відрізняється один від одного і значно перевершують за величиною довжину тріщин у зразків із сталі 3Х2В8Ф.

Для визначення впливу товщини покриття нітриду титану на термічну витривалість сталей 4Х5МФС і 5ХНМ на зразки з цих марок сталей після термообробки та шліфування наносили покриття 2, 3, 4, 5, 7 мкм. У зразків з покриттям товщиною 2 мкм ефект підвищення термічної витривалості виражений слабо, довжина тріщин розпалу після 500 циклів в 3 рази більше, ніж у зразків з покриттям товщиною від 3 до 5 мкм. У зразків з покриттям товщиною 7 мкм після 1000 циклів різко збільшується довжина тріщин, спостерігається повсюдне сколювання покриття через погану адгезію.

Таким чином, на підвищенні термічної витривалості найбільш ефективно позначається наявність плазмових покриттів нітриду титану товщиною 3-5 мкм.

При проведенні випробувань на термічну витривалість одночасно велося спостереження за зміною твердості випробовуваних зразків. Вихідна твердість зразків із сталей 3Х2В8Ф, 4Х5МФС, 5ХНМ становила 42-45 HRC_e. Після 2000 циклів у зразків із сталі 3Х2В8Ф твердість становить 32-35 HRC_e, а у зразків із сталей 4Х5МФС і 5ХНМ з покриттям нітриду титану товщиною 3-5 мкм – 38-40 HRC_e, без плазмового покриття 28-30 HRC_e. Це свідчить про гарну теплостійкість сталей з плазмовим покриттям, що важливо для деталей прес-форм ЛПТ.

Підбиралися тиск реакційного газу в камері установки, температура розігріву підкладки, на яку наноситься покриття і тривалість осадження.

Критерієм оцінки оптимальних параметрів нанесення покриттів була кількість термоциклів, яку витримує зразок з покриттям до руйнування.

Для визначення необхідного тиску азоту, що забезпечує отримання на робочих поверхнях деталей прес-форм покриттів з найкращими експлуатаційними характеристиками, нітрид титану наносився при різних парціальних тисках азоту – від $3 \cdot 10^{-3}$ до 1 Па (табл. 1).

Отримані покриття відрізняються кількістю краплинної фази, яка суттєво зменшується зі збільшенням тиску. Слід зазначити, що у зразків з покриттям, отриманим при тисках азоту $3 \cdot 10^{-3}$, $3 \cdot 10^{-2}$ Па, спостерігається значне налипання розплаву, яке помітно зменшується з ростом тиску і, починаючи з 1 Па, практично відсутнє.

Велика твердість призводить до збільшення крихкості покриття, що викликає швидке його руйнування під дією знакозмінних напружень і термічних ударів. Наявність значної кількості краплинної фази інтенсифікує процес руйнування.

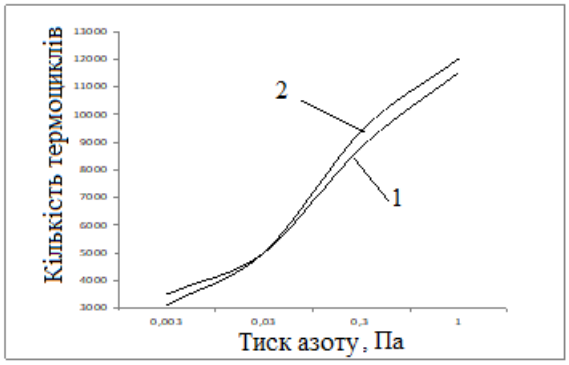
На рис. 1 представлена залежність термоциклів деталей з плазмовим покриттям від тиску азоту. З графіка випливає, що покриття нітриду титану, отримане при тиску азоту 1 Па, найбільш ефективно захищає робочі поверхні деталей прес-форм від руйнування і для двох сталей спостерігається практично однакова залежність числа термоциклів від тиску азоту.

Іншим важливим параметром, що має істотний вплив на стійкість деталей з плазмовим покриттям, є температура робочої поверхні при іонному бомбардуванні, яка змінювалася від 300 до 700 °С. Найбільшу стійкість при експлуатації мають деталі з плазмовим покриттям,

нанесеним при температурі підкладки 500 °С. Цій температурі відповідає і найкраща адгезія з основою (табл. 2).

Таблиця 1 – 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	23	18
Колір покриття	сірий	жовтувато-сірий	жовтий	буро-золотистий
Стійкість деталей з покриттям (цикл) сталь 5ХНМ	3500	5000	9000	11500
Сталь 4Х5МФС	3000	5000	9500	12000



1 – сталь 5ХНМ, 2 – сталь 4Х5МФС

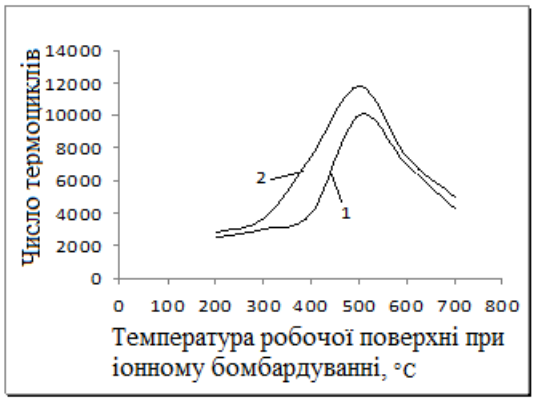
Рисунок 1 – Залежність між парціальним тиском азоту і кількістю термоциклів

Таблиця 2 – Вплив температури іонного бомбардування на адгезію покриття з підкладкою і стійкість деталей при експлуатації

Марка сталі	Адгезія (в чисельнику) і стійкість, цикл (у знаменнику) при температурі, °С						
	без покриття	200	300	400	500	600	700
4Х5МФС	- / 2000	0,50 / 2500	0,65 / 3500	0,75 / 7500	1 / 12000	0,75 / 7500	0,5 / 5000
5ХНМ	- / 2000	0,50 / 2100	0,60 / 3400	0,70 / 4000	1 / 11000	0,70 / 7000	0,5 / 4000

На рис. 2 представлена залежність числа термоциклів від температури іонного бомбардування. Наочно видно, що оптимальною температурою є 500 °С. Спостерігається однакова закономірність для сталей 5ХНМ та 4Х5МФС.

При більш низьких температурах спостерігається тенденція повного відшаровування покриття, при цьому стійкість деталей прес-форм збільшується незначно. При температурах вище температури відпустки спостерігається зниження матеріалу прес-форм, що призводить до зниження стійкості.



1 - сталь 5ХНМ, 2 - сталь 4Х5МФС

Рисунок 2 – Залежність числа термоциклов від температури робочої поверхні при іонному бомбардуванні

Висновки

1. Сталі марок 5ХНМ та 4Х5МФС після нанесення плазмового покриття можуть бути використані в якості матеріалів-замінників сталі 3Х2В8 для прес-форм для лиття під тиском мідних сплавів.

2. На підвищення термічної витривалості найбільший вплив мають плазмові покриття нітриду титану товщиною 3...5 мкм.

3. Найбільша стійкість при експлуатації деталей досягається з плазмовим покриттям, нанесеним при температурі підкладки 500 °С. Цій температурі відповідає і найкраща адгезія з основою.

Література

1. Камель Г.І., Гасило Ю.А. Конспект лекцій з дисципліни «Наплавлення та напилення» для студентів напряму 6.050504 «Зварювання». Кам, янське: ДДТУ, 2017. 108 с.

2. Гасій О.Б. Розвиток технології вакуумного йонно-плазмового напилення та напрями її вдосконалення. Науковий вісник НЛТУ України. 2018. Т. 28, № 10. С. 85 – 91.

3. Рожков О.Д. Технологія нанесення покриттів. Частина ІІ: Навч. посібник. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2008. 38 с.