

Л.А.Шевченко, В.В.Зелинська, Л.Т.Жупінська

ДОСЛІДЖЕННЯ І ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ СТАЛІ ВІД ЗАБРУДНЕНЬ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЮ ПЛАЗМОЮ

Метою роботи є дослідження методу очищення поверхні низькотемпературною плазмою, що є альтернативним традиційним засобом очищення поверхні сталю прокату від забруднень. Проведено дослідження і визначено технологічні характеристики плазмового очищення прокату від забруднень. Встановлено, що кожній конкретній потужності плазмотрону відповідає конкретна оптимальна швидкість переміщення плазмотрону, яка забезпечує якісне очищення поверхні прокату від забруднень.

сталний прокат, засоби очищення поверхні, низькотемпературна плазма, плазмотрон, технологічні характеристики

Сучасний стан проблеми. Забезпечення необхідної якості поверхні металу перед нанесенням покриття – основна вимога виробництва якісного прокату з металевими і полімерними покриттями. Необхідною умовою для цього в ідеальному випадку є відсутність забруднень поверхні прокату перед нанесенням покриття. Ця умова робить очищення поверхні сталі від забруднень найважливішою операцією при виробництві захищеного покриттям прокату.

Надійність захисту поверхні металу від корозії залежить від того, наскільки щільно шар покриття прилягає до основи металу; щільність зчеплення покриття з основою металу залежить від стану його поверхні. Перед нанесенням покриття гарячекатаний смуговий прокат піддають травленню від окалини, холодній прокатці, відпалюванню. Під час проведення кожної із зазначених технологічних операцій поверхня прокату забруднюється. Причини утворення поверхневих забруднень узагальнено можуть бути поділені на три групи: пов'язані з процесом травлення (недотрав, перетрав, промаслення та інш.); пов'язані з технологією холодної прокатки (мастильно-охолоджувальна рідина (МОР), температурні режими прокатки та інш.); пов'язані з технологією відпалювання (складом захисної атмосфери, температурно-часовим режимом відпалювання та інш.). Крім того, наявність забруднень на поверхні прокату може бути пов'язана безпосередньо з процесом очищення від забруднень, тобто з неякісним очищенням і з утворенням нових забруднень під час цієї операції.

Неоднорідність шару окалини на поверхні гарячекатаного металу визначає нерівномірність швидкості її видалення вздовж довжини і ширини смуги, у зв'язку з чим після травлення на смузі можуть бути ділянки з недотравом або перетравом. Так, наприклад, при забрудненні поверхні жерсті у 310 мг/м^2 при виникненні недотраву вона зростає до $350\text{--}400 \text{ мг/м}^2$, перетраву – до $400\text{--}450 \text{ мг/м}^2$. На поверхні травлених смуг можуть бути також відкладення солей заліза та травильного шламу, які залишаються навіть після

самої ретельної промивки. Вони є каталізаторами утворення поверхневих забруднень при прокатці: знаходячись разом з МОР у зоні деформації, під впливом тертя зазнають фізико-хімічних перетворень (частково розкладаються, коксується) і призводять до виникнення забруднень вже після прокатки. Тому кількість солей заліза на поверхні протравленого металу регламентується і не повинна перевищувати: при травленні у сірчаній кислоті – 15 мг/м^2 сульфатів; при травленні у соляній кислоті – 10 мг/м^2 іонів хлору.

На забрудненість холоднокатаних і відпалених смуг суттєво впливає також кількість, якість і склад мастила, що наноситься після травлення на поверхню прокату. Загалом забрудненість прокату після травлення залежить від ретельності дотримання технологічного процесу, попереднього стану поверхні і дорівнює $310\text{--}350 \text{ мг/м}^2$, при порушенні технологічних параметрів може сягати 600 мг/м^2 . На забрудненість холоднокатаних і відпалених смуг впливає також якість і кількість мастила, що наноситься після травлення на поверхню прокату.

Основним джерелом забруднення смуги під час прокатки є активні компоненти емульсії (асидол, жирні кислоти, жири та інш.). Так, до складу забруднень холоднокатаного металу входять $50\text{--}60 \%$ жирових забруднень, що містять $70\text{--}80 \%$ мінерального мастила, і $40\text{--}50 \%$ механічних, які включають приблизно 40% сполук заліза. На виникнення поверхневих забруднень під час прокатки суттєво впливає також тепловий режим роботи стану, температура змотки смуги у рулон, тривалість витримки рулонів на проміжному складі та інші показники. У табл.1 наведено забрудненість поверхні холоднокатаного металу для двох підприємств (дані Інституту чорної металургії НАН України).

Таблиця 1. Забрудненість поверхні смуги після холодної прокатки.

Забрудненість, мг/м^2 для підприємств			
А		Б	
загальна	механічні домішки	загальна	механічні домішки
651	300	660	240
540	280	350	180
570	120	340	170
520	120	540	210
390	160	370	330

Розроблена Інститутом чорної металургії «Типова технологічна інструкція виробництва тонколистового холоднокатаного прокату» регламентує наступні вимоги до забрудненості холоднокатаного прокату: забрудненість поверхні металу після прокатки не повинна перевищувати 500 мг/м^2 , у тому числі механічних домішків – 250 мг/м^2 , розчинних – у розчинниках – 200 мг/м^2 [1]. При відпалюванні холоднокатаних смуг вирішальне значення в утворенні багаточисельних різновидів забруднень у вигляді сажистої кромки, сажистого нальоту, відкладань сажі на окремих ділянках смуг має газове середовище відпалювальної печі і

залишки технологічного мастила та МОР на поверхні прокатаних смуг. У атмосфері печі залишки мастила випаровуються, коксуються; металовміщуючі продукти зносу валків і смуги є каталізаторами реакцій розкладу вуглецевих речовин з виділенням аморфного вуглецю. Відомий також вплив залишкового вуглецю на якість поверхні після відпалювання: при перевищенні кількості останнього величини у 8 мг/м^2 якість холоднокатаного металу з покриттям значно погіршується [2].

Таким чином, вищезазначені причини зумовлюють при травленні, холодній прокатці і відпалюванні утворення різних поверхневих забруднень, що відрізняються за кількісним і якісним складом. Кількість і якість забруднень різна для різних підприємств. Для даного конкретного заводу вона залежить від виконання технологічних режимів обробки прокату, але залишкова забрудненість холоднокатаного металу безпосередньо перед нанесенням покриття не повинна перевищувати 30 мг/м^2 . Якщо залишкова забрудненість буде перевищувати 30 мг/м^2 , отримати покриття з високою корозійною стійкістю неможливо.

Очищення холоднокатаного металу від забруднень здійснюється або у окремому спеціалізованому агрегаті очищення (наприклад, перед відпалюванням), або у складі агрегату покриття. До складу безперервного агрегату нанесення покриття очищення входить як обов'язкова операція у технологічному процесі і здійснюється перед нанесенням покриття. Очищення здійснюють знежиренням, яке проводять хіміко-механічним і електролітичним способами. Технологія хіміко-механічного очищення включає: очищення сольовим або луговим розчином при температурі $85\text{--}95^\circ\text{C}$; очищення щітками; промивку гарячою і холодною водою; сушку. Електролітичне очищення включає в себе сполучення процесу розчину шламу лугами (хімічна очищення) з електролізом, при якому бруд відокремлюється бульбашками кисню або водню.

Електролітичний засіб забезпечує більш високу ступінь очищення, видаляючи бруд з мікронерівностей смуги. Продуктивність цього процесу вища, ніж при хімічному очищенні. Для якісного очищення в одному агрегаті суміщують хіміко-механічне (грубе) і електролітичне (тонке) очищення.

Вищезазначені традиційні засоби очищення поверхні прокату від забруднень є високовитратними і екологічно небезпечними. Вони зумовлюють використання хімічних реагентів і пов'язаних з ними складів зі зберігання свіжих і використаних розчинів. Значних коштів потребують також регенерація і утилізація спрацьованих розчинів з дотриманням норм екологічної безпеки.

Постановка завдання. Альтернативою традиційним засобам очищення від забруднень може бути очищення поверхні прокату низькотемпературною плазмою. Аналіз дії потоку плазми на поверхню забрудненого металу дає змогу припустити, що для очищення його поверхні від органічних забруднень є можливим використання

низькотемпературної плазми у температурних режимах, що забезпечують граничну температуру сублімації органічних сполук 300–400°C. Основою такого способу очищення є той факт, що при високій швидкості теплового нагрівання поверхні прокату потоками плазми (із щільністю $10^2\text{--}10^3$ Вт/см²) забруднення будуть випаровуватись або сублімуватись незалежно від їх складу.

Викладення основних результатів дослідження. Для теоретичного аналізу процесу випаровування і сублімації забруднень на поверхні, що підлягає очищенню, можна використати рівняння теплопровідності у вигляді

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = K \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

з наступними граничними і початковими умовами:

$$-K \frac{\partial T}{\partial x} = \begin{cases} 0 & \text{для } x = C, \quad 0 \leq t \leq t_{\text{GT}} \\ dJ(t) & \text{для } x = 0, \quad 0 \leq t \leq t_v \\ dJ(t) - \rho \alpha x_s^{\circ}(t) & \text{для } x = x_s(t) > 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$t_v \leq t \leq t_{\text{GT}}$$

$$T(x, te) = \begin{cases} 0 & \text{для } t_i = 0, \quad 0 \leq x \leq \ell \\ U(x) & \text{для } t_i = t_e, \quad x_s \leq x \leq \ell \end{cases}$$

де α – коефіцієнт поглинання; $J(t)$ – щільність теплового потоку; t_v – тривалість випаровування забруднень; t_{GT} – тривалість нагрівання початку вигорання поверхні; t_e – тривалість нагрівання, необхідна для дифундування (прогрівання забруднення до температури сублімації);

$x_s^{\circ}(t)$ – швидкість плазмового струменя; ρ – щільність випарювальної речовини; L – питома теплота сублімації забруднень.

Рішення рівняння (1) із граничними умовами (2) дає змогу отримати рівняння для оцінки температури нагрівання з урахуванням швидкості

руху плазмового струменя вздовж поверхні прокату $x_s^{\circ}(t) \cdot t_e = x_s(t)$:

$$T(x,t) = T_0 \left(1 - \frac{[x - x_s(t)]}{d(t)} \right)^2 \cdot \exp\left(- \frac{[x - x_s(t)]}{d(t)} \right), \quad (3)$$

де T_0 – температура сублімації органічних сполук.

Оцінку критичної швидкості плазмового струменя вздовж поверхні прокату, потрібної тільки для сублимації забруднень, можна отримати із інтегрального закону збереження тепла [3]:

$$Q_{nl} = Q_n + Q_{субл.} \quad (4)$$

де Q_{nl} – тепловий потік на поверхні прокату, що реалізується плазмою; Q_n – тепловий потік, необхідний для нагрівання органічних сполук до температури сублимації; $Q_{субл.}$ – питома теплота сублимації органічних сполук.

У цьому випадку потужність теплового (плазмового) джерела буде дорівнювати:

$$N_{(t)} = \rho V_n d \cdot \delta (C \Delta t + \lambda) \quad (5)$$

де ρ – щільність забруднень; V_n – швидкість переміщення плазмової плями; δ – товщина шару забруднень; d – діаметр плазмової плями; C – теплоємність забруднень; λ – питома теплота пароутворення забруднень.

Підставляємо у формулу (5) рівняння (3) і отримуємо значення критичної потужності плазмового променя, необхідної для повного очищення листового прокату від забруднень:

$$N = \rho \dot{x}_S d \delta \left[C T_0 \left(1 - \frac{[x - x_S(t)]^2}{d(t)} \right) \cdot \exp \left(- \frac{[x - x_S(t)]}{d(t)} \right) + \lambda \right] \quad (6)$$

Нижче наведені характеристики мінерального мастила I-20A (входить до складу багатьох МОР) та умови обробки, що були взяті для розрахунків:

$$\rho = 0,88 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3; \lambda = 394 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}; c = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг град}; \\ \Delta T = 2 \cdot 10^3 \text{ K};$$

довжина експериментальної пластини 0,5 м; ширина плазмової плями нагріву $2,5 \cdot 10^{-2}$ м; товщина шару забруднень $\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ м.

Розрахунки за наведеними формулами дають змогу визначити критичну потужність плазмотрону для очищення від забруднень (наприклад, мастил).

Теоретичний аналіз показав, що тривалість нагріву ділянки металу під дією плазмового струменя до температур, при яких відбувається випаровування забруднень, визначається їх теплофізичними властивостями: щільністю ρ , теплоємністю C , теплопровідністю λ , питомою теплою пароутворення (r), температурою струменя T_c і щільністю теплового потоку в зоні нагріву (q).

Процес випаровування плівки забруднень починається при деякій величині питомого теплового потоку

$$q = \frac{\sqrt{\pi \lambda \rho C} \cdot T_{\text{вип.}}}{2\sqrt{\tau}}, \quad (7)$$

де $T_{\text{вип.}}$ – середня температура випаровування плівок забруднень, $^{\circ}\text{K}$;
 $T_{\text{вип.}} = 600\text{--}700^{\circ}\text{K}$.

Тривалість нагріву плівки забруднень до температури випаровування відповідає рівнянню

$$\tau_{\text{вип.}} = 3,15 \lambda \rho C \frac{1}{\alpha^2 \left(\frac{T_c}{T_{\text{вип.}}} - 1 \right)^2}, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі плазмового струменя, $\text{Вт}/\text{м}^2\text{град}$; T_c – середньомасова температура плазмового струменя, $^{\circ}\text{K}$.

Розрахунки показують, що для забезпечення тривалості нагрівання 10^{-2} с при швидкостях переміщення плазмового струменя вздовж поверхні прокату $0,5\text{--}1,0$ м/с з діаметром плям нагрівання $0,02\text{--}0,05$ м необхідна щільність теплового потоку, що забезпечує випаровування і сублімацію органічних сполук, складає $(3\text{--}5) \cdot 10^4$ $\text{Вт}/\text{м}^2$ або $(3\text{--}5)$ $\text{Вт}/\text{м}^2$.

При заданих теплофізичних властивостях забруднень (λ , ρ , C , $T_{\text{вип.}}$) потрібна потужність плазмотрону буде визначатися швидкістю його переміщення і діаметром плями нагрівання (табл.2).

Таблиця 2. Розрахункові технологічні і енергетичні параметри плазмотрону

Діаметр плями, м	Потужність плазмотрону, кВт			
	Швидкість переміщення плазмотрону, м/с			
	0,5	0,75	1,0	1,25
0,02	15,0	22,5	30,0	37,5
0,03	22,6	35,4	45,2	56,5
0,05	37,6	56,4	75,3	94,1

Діаметр плями нагрівання плазмового струменя визначається конструктивними і режимними параметрами плазмотрону. Із зростанням діаметру сопла збільшується діаметр плазмового струменя і, отже, розмір плями нагрівання. Зміна питомого теплового потоку по радіусу плями нагрівання приблизно описується законом нормального розподілення

$$q_r = q_{\text{max}} \exp(-\delta_1 r^2), \quad (9)$$

де q_{max} – максимальний тепловий потік вздовж осі струменя;

δ_1 – коефіцієнт зосередженості, що характеризує форму кривої нормального розподілення.

Умовний діаметр плями нагрівання, який забезпечує посереднє нагрівання всієї площини, тобто розмір плями на межі якого $q=0,05 q_{max}$, дорівнює

$$d_n = \frac{3,46}{\sqrt{\delta_1}}. \quad (10)$$

Теплові характеристики плазмового струменя – температура, питомий тепловий потік, коефіцієнт тепловіддачі визначають характер і інтенсивність процесу нагрівання. Ці характеристики залежать від ряду факторів: роду плазмоутворюючого газу; режимних і конструктивних параметрів плазмотрону; відстані від зрізу сопла до поверхні, що нагрівається; кута зустрічі струменя із поверхнею.

У діапазоні потужностей 40–70 кВт, струму дуги 150–250 А, відстані від сопла до поверхні 0,03–0,004 м, діаметр плями нагрівання змінювався від 0,03 до 0,05 м.

В результаті виконаних досліджень визначені основні раціональні режимні, конструктивні параметри плазмотрону, енергетичні і технологічні характеристики процесу очищення прокату від забруднень плазмовим струменем.

Нижче наводяться визначені параметри.

Потужність плазмотрону, кВт	– 40–70.
Напруга дуги, В	–250–300
Сила струму дуги, А	– 200–250.
Відстань від сопла до поверхні, що нагрівається, м	– 0,035–0,4.
Діаметр сопла, м	– 0,01–0,015.
Діаметр плями нагрівання, м	– 0,03–0,05.
Щільність теплового потоку у плямі нагрівання, Вт/см ²	– 5–10.
Середньомасова температура плазмового струменя, °К	–2300–2800.
Коефіцієнт корисної дії плазмотрону, %	– 70–75.
Потужність очищення, м/ч	– 35–70.
Енергоємність процесу очищення, кВт–год/м ²	– 0,8–1.
Продуктивність очищення, м ² /год	– 70.

Для визначення якісних показників поверхні після її плазмового очищення, зразки прокату з масою забруднень від 50 до 1000 мг/м² обробляли плазмовим струменем з вищезазначеними характеристиками. Як показали проведені дослідження, незалежно від маси забруднень на вихідній поверхні прокату, плазмовий потік не залишає на поверхні органічних сполук.

Висновки. Таким чином, встановлено, що на поверхні смугового прокату шириною 0,03–0,05 м у діапазоні швидкостей його переміщення, що дорівнює 0,5–1,0 м/с, потужності – 40–70 кВт, середньомасових температур плазмового струменя 2300–2800°К здійснюється повне

очищення поверхні від органічних сполук, у тому числі, мастил. Встановлено, що кожній конкретній потужності плазмотрону відповідає конкретна оптимальна швидкість переміщення плазмотрону, яка забезпечує якісне очищення поверхні прокату від забруднень. Для плазмотрону потужністю 40 кВт оптимальна швидкість переміщення складає 0,5 м/с, а для потужності у 70 кВт – 1м/с. Процес очищення поверхні від забруднень проходить без її перегрівання і оплавлення, без змін структури і поверхневих шарів металу.

Таким чином, плазмова обробка з визначеними раціональними параметрами здійснює повне очищення поверхні прокату від органічних забруднень. Проведені дослідження показали, що механічні забруднення не можуть бути видалені плазмовим струменем. З огляду на це, після вузла плазмового очищення потрібне механічне доочищення. Плазмова обробка за визначеними технологічними параметрами і наступне механічне доочищення прокату дає змогу здійснити повне і якісне очищення його поверхні від забруднень.

1. *Типовая технологическая инструкция. Производство холоднокатаного конструкционного проката. ТТИ 1.11-15-20-90, Днепропетровск, 1990. – 66 с.*
2. *В.Е.Злов, А.В.Горбунов, Н.И.Малова. Уменьшение загрязнений поверхности холоднокатаного проката. // Сталь. – 2001. – № 5. – С.37-39.*
3. *В.Е.Булат, М.Х.Эстерлис. Очищення металлических изделий от окалины, окисной пленки и загрязнений электродуговым разрядом в вакууме. // Физика и химия обработки материалов. – 1987. – № 3. – С.49-53.*

*Статья рекомендована к печати:
ответственный редактор
раздела «Прокатное производство»
канд.техн.наук И.Ю.Приходько
рецензент канд.техн.наук О.С.Касьян*

Л.А.Шевченко, В.В.Зелинская, Л.Т.Жупинская

Исследование и определение технологических параметров очищения поверхности стали от загрязнений низкотемпературной плазмой

Целью работы является исследование метода очистки поверхности низкотемпературной плазмой, альтернативного традиционным средствам очистки поверхности стального проката от загрязнений. Проведено исследование и определены технологические характеристики плазменной очистки проката от загрязнений. Установлено, что каждой конкретной мощности плазмотрона отвечает конкретная оптимальная скорость его перемещения, обеспечивающая качественную очистку поверхности проката.