

اعمال پوشش کروم سیاه از بهینه حمام آبکاری کروم بر روی لوله‌های فولادی مورد استفاده در نیروگاه‌های خورشیدی

رضا بازرگان لاری^{۱*}، محمد حسین شریعت^۲ و افشین نعمتی^۳

۱- استادیار، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مرودشت، گروه مهندسی مواد، مرودشت، ایران

۲- استاد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مرودشت، گروه مهندسی مواد، مرودشت، ایران

۳- کارشناس، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مرودشت، گروه مهندسی مواد، مرودشت، ایران

*rbazargan@shirazu.ac.ir

(تاریخ دریافت: ۱۳۸۹/۱۱/۱۸، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۰۳/۲۸)

چکیده

در این مقاله نحوه اعمال پوشش کروم سیاه از بهینه حمام آبکاری کروم بر روی لوله‌های فولادی مورد استفاده در نیروگاه‌های خورشیدی بررسی گردید. کروم سیاه یکی از انواع پوشش‌های انتخاب‌کننده، بوده که معمولاً در نیروگاه‌های خورشیدی از آن استفاده می‌شود. اصولاً جذب به لایه سیاه و نشر حرارتی به زیر لایه پوشش مربوط می‌شود و برای اینکه زیر لایه بتواند خواص نوری خود را بروز دهد و باعث کاهش مقدار نشر حرارتی شود، ضخامت لایه جاذب بسیار مهم می‌باشد. از طرفی مس به دلیل رسانایی بالا و سطح صاف و صیقلی که دارد، دارای کمترین میزان نشر حرارتی می‌باشد که به همین دلیل در این تحقیق مس به عنوان زیر لایه انتخاب گردید. نتایج نشان داد که آبکاری الکتریکی مس بر روی فولاد از طریق حمام اسیدی مس علی‌رغم گزارش‌ها امکان‌پذیر می‌باشد. جهت پوشش‌دهی مس بر روی لوله‌های فولادی، محلول اسیدی مس در غلظت‌های مختلف از سولفات مس تهیه شد و عملیات پوشش‌دهی در دمای اتاق و در زمان‌های مختلف صورت گرفت تا بهترین پوشش با حداقل میزان سولفات مس شناسایی گردد. سپس بر روی مس، کروم سیاه پوشش داده شد. عملیات پوشش‌دهی کروم سیاه نیز در دماها و زمان‌های مختلف و در pH طبیعی حمام انجام شد تا هیچگونه نیازی به کنترل و تنظیم pH حمام نباشد. در انتها چسبندگی و یکنواختی پوشش‌ها توسط استانداردهای مربوطه و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت.

واژه‌های کلیدی:

آبکاری الکتریکی، کروم سیاه، مس.

۱- مقدمه

خورشید وجود دارد که عبارتند از: الف) تبدیل انرژی خورشیدی مستقیماً به انرژی الکتریکی، ب) تبدیل انرژی خورشید به انرژی حرارتی و سپس به انرژی الکتریکی که این تبدیل انرژی خورشید به انرژی حرارتی توسط سیستم‌های

انرژی خورشید به دلیل فراوانی و طبیعت جاودانه‌اش، به عنوان مهمترین جایگزین سایر منابع انرژی، مانند سوخت‌های فسیلی و هسته‌ای مورد توجه است. دو راه اصلی جهت استفاده از انرژی

انواع پوشش‌های انتخاب‌کننده بوده که دارای ضریب جذب بین ۰/۹۲ تا ۰/۹۷ در محدوده طول موج تشعشعات خورشید می‌باشد [۶]. علاوه بر این پوشش کروم سیاه دارای رسانایی حرارتی بالایی بوده و همچنین پایداری حرارتی و مقاومت به خوردگی آن نیز بسیار خوب می‌باشد [۷]. از طرفی به دلیل کم بودن تنش‌های داخلی در کروم سیاه، رسوب کروم سیاه دچار ترک خوردگی و پوسته شدن نمی‌شود [۸]. یکی دیگر از مزیت‌های اصلی حمام کروم سیاه به کار برده شده، عدم نیاز به تنظیم pH حمام بوده که این مطلب نیز در سهولت تولید پوشش کروم سیاه کمک می‌کند [۹]. چون اصولاً جذب انرژی خورشید به لایه سیاه مربوط می‌شود و نشر حرارتی به زیر لایه پوشش، بنابراین ضخامت لایه جاذب باید کم باشد (کمتر از طول موج مادون قرمز) تا زیر لایه بتواند خواص نوری خود را بروز دهد و باعث کاهش مقدار نشر حرارتی شود. برای مثال نقره، طلا و مس در دمای اتاق دارای نشر حرارتی در حدود ۰/۲ می‌باشند که دلیل این کم بودن نشر حرارتی، رسانایی بالای آن‌ها و همچنین سطح صاف و صیقلی آن‌ها می‌باشد [۱۰]. از آنجایی که لوله‌های مورد استفاده در نیروگاه خورشیدی شیراز فولادی بوده و با توجه به این که از بین سه زیر لایه نقره، طلا و مس، مس از همه مقرون به صرفه‌تر است، ابتدا مس به عنوان زیر لایه (برای کروم سیاه) بر روی لوله‌های فولادی نیروگاه پوشش داده شد و سپس بر روی آن کروم سیاه پوشش داده شد.

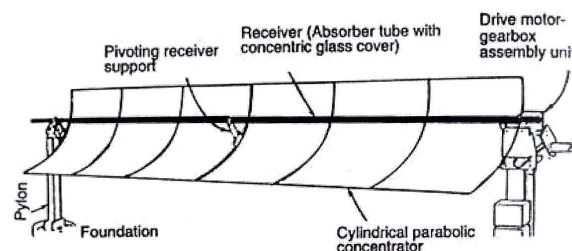
۲- مواد و روش تحقیق

موادی که جهت آماده‌سازی حمام آبکاری مس به کار برده شد شامل:

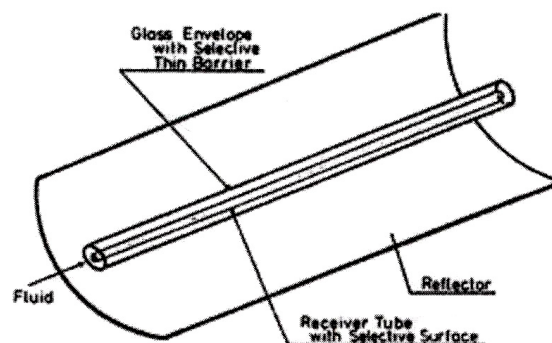
(۱) سولفات مس هیدراته ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) و (۲) اسید سولفوریک [H_2SO_4 (95-98W%)]

و موادی که جهت آماده‌سازی حمام کروم سیاه به کار برده شد شامل:

(۱) سولفات کروم ($\text{Cr}_2(\text{SO}_4)_3$)، (۲) کلرید کبالت (CoCl_2)،



شکل (۱): شماتیک یک کلکتور سیلندری [۲].



شکل (۲): شماتیک یک کلکتور سیلندری سهموی [۲].

حرارتی خورشیدی صورت می‌گیرد [۱]. تمام سیستم‌های حرارتی خورشیدی^۱ دارای قسمتی به نام کلکتور^۲ می‌باشند که وظیفه اصلی آن جمع‌آوری انرژی خورشید می‌باشد [۲]. در شکل‌های (۱) و (۲) تصویر نمایشی از کلکتور سیلندری نشان داده شده است. در کلکتورها معمولاً اصل بر این است که برای جذب گرمای خورشید، یک سطح سیاه در معرض تابش خورشید قرار می‌گیرد. این سطح سیاه انرژی خورشید را جذب کرده و گرم می‌شود و سپس گرمای جذب شده را به یک سیال نظیر آب و یا روغن که درون لوله در جریان است، منتقل کرده و آن را گرم می‌کند [۳]. برای ایجاد یک سطح سیاه بر روی لوله‌ها از پوشش‌های خاصی موسوم به پوشش‌های انتخاب‌کننده^۳ استفاده می‌شود [۴ و ۵]. سطحی که دارای میزان جذب بالا در محدوده طول موج تشعشعات خورشید (۰/۳ تا ۲ میکرون) بوده و همچنین میزان نشر آن در طول موج‌های بلند (مادون قرمز) کم باشد، را سطح انتخاب‌کننده می‌نامند [۵]. کروم سیاه یکی از

جدول (۳): شرایط کاری حمام آبکاری کروم سیاه.

۳۵	دمای حمام (درجه سانتی‌گراد)
۳۵	دانسیته جریان کاتدی (آمپر بر دسی متر مربع)
۱	زمان آبکاری (دقیقه)
طبیعی	pH حمام
سرب	آند

جدول شماره (۴): ترکیب و شرایط کاری حمام اسیدشویی.

۲۵۰	اسید کلریدریک (HCl(37W%)) (گرم بر لیتر)
۴۵	دمای محلول (درجه سانتی‌گراد)
۷	مدت زمان اسیدشویی (دقیقه)

لازم به ذکر است برای اینکه مواد در حمام کروم سیاه کاملاً حل شوند، ابتدا دمای حمام به ۵۰ درجه سانتی‌گراد رسانیده و هم زده شد و سپس برای اینکه آبکاری در دمای ۳۵ درجه سانتی‌گراد صورت گیرد، بشر حاوی حمام کروم سیاه در آب سرد قرار داده شد تا دمای حمام سریع به دمای مورد نظر برسد. نحوه کار به این صورت بود که ابتدا یک لوله فولادی با سطح خارجی ۳۶ سانتی‌متر مربع را قلیاشویی و اسیدشویی نموده تا چربی‌ها و اکسیدهای سطحی از بین بروند. ترکیب و شرایط محلول اسیدشویی در جدول (۴) آورده شده است. همچنین سطح داخلی لوله توسط لاک و یا با چسب برق پوشانیده شد تا پوشش نگیرد. پس از برداشتن اکسیدهای سطحی توسط محلول اسیدشویی، لوله به حمام مس منتقل شد. آند به کار برده شده در حمام اسیدی مس، از جنس مس خالص (۹۹/۹٪) بوده و سطح آن چهار برابر سطح کاتد بود. سپس لوله (کاتد) به قطب منفی و مس (آند) به قطب مثبت منبع تغذیه dc متصل شد و شدت جریان 1 A/dm^2 برقرار گردید. قبل از آن که آند و کاتد وارد حمام شوند، ولتاژ برقرار شد و سپس آند و کاتد وارد حمام شدند. دلیل این کار جلوگیری از احیاء شدن سریع یون‌های مس موجود در حمام بر روی سطح کاتد به صورت الکترولس بود.

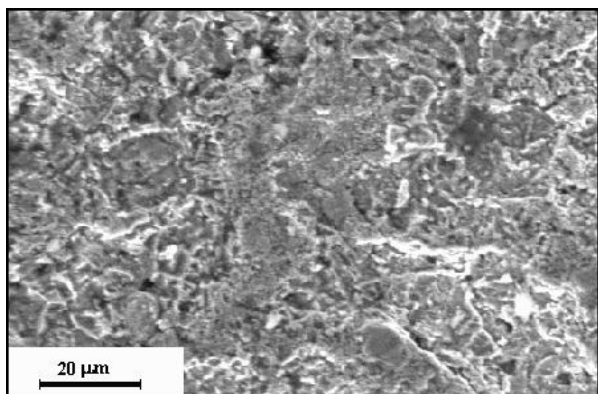
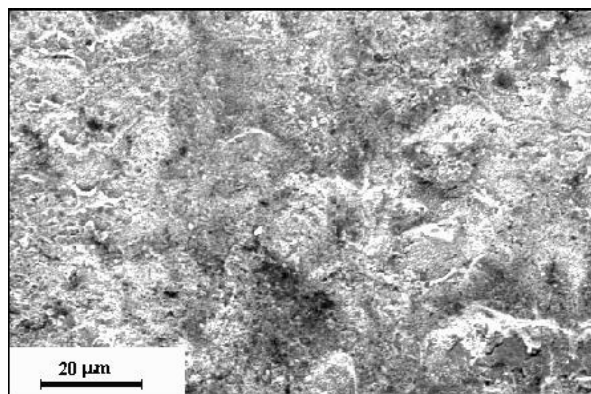
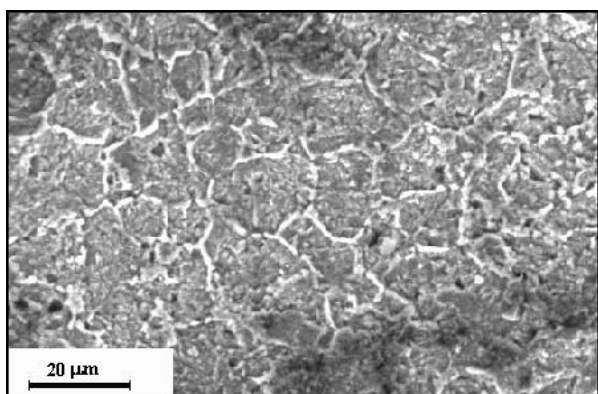
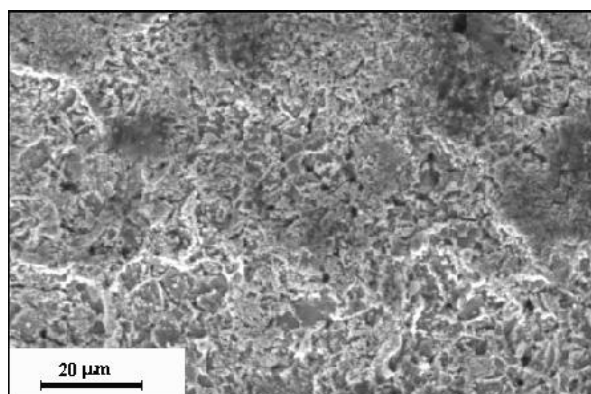
جدول (۱): ترکیب و شرایط کاری حمام آبکاری مس.

۳۰	اسید سولفوریک (۹۵-۹۸ W%) (گرم بر لیتر)
۱۰	سولفات مس هیدراته (گرم بر لیتر)
۲۴	دمای حمام (درجه سانتی‌گراد)
۱	دانسیته جریان کاتدی (آمپر بر دسی متر مربع)
۳	زمان آبکاری (دقیقه)
۱/۲	pH حمام
مس	آند

جدول (۲): ترکیب شیمیایی حمام آبکاری کروم سیاه.

ماده	غلظت بر حسب گرم بر لیتر
سولفات کروم	۱۹۶
کلرید کبالت	۳۳
هیپوفسفیٹ سدیم	۲۱
فسفات دی‌هیدروژن سدیم	۴

(۳) فلورید سدیم (NaF)، (۴) هیپوفسفیٹ سدیم (NaH_2PO_2) و (۵) فسفات دی‌هیدروژن سدیم (NaH_2PO_4). نحوه آماده‌سازی حمام آبکاری مس اینگونه بود که ۳۰ گرم بر لیتر اسید سولفوریک و ۱۰ گرم بر لیتر سولفات مس هیدراته به درون بشر به حجم ۸۰۰ سی‌سی ریخته شد و سپس حجم محلول با آب مقطر به ۶۰۰ سی‌سی رسانده شد. شرایط کاری حمام آبکاری مس در جدول (۱) آورده شده است. نحوه آماده‌سازی حمام آبکاری کروم نیز به این گونه بود که ابتدا مواد مطابق غلظت‌هایی که در جدول (۲) آورده شده با یکدیگر ترکیب و سپس درون یک بشر به حجم ۸۰۰ سی‌سی ریخته شدند. سپس با آب مقطر حجم محلول به ۶۰۰ سی‌سی رسانده شد. نقش اصلی فلورید سدیم و فسفات دی‌هیدروژن سدیم در حمام کروم سیاه، ایجاد سطحی تیره، چسبنده و یکنواخت بوده است و این دو ماده باعث می‌شوند که پوشش به دست آمده بیشترین مقدار جذب در محدوده طول موج خورشید را دارا باشد [۶]. شرایط کاری حمام آبکاری کروم سیاه در جدول (۳) آورده شده است.

شکل (۵): ریزساختار پوشش مس ($J = 2 \text{ A/dm}^2$).شکل (۳): ریزساختار پوشش مس ($J = 0.5 \text{ A/dm}^2$).شکل (۶): ریزساختار پوشش مس ($J = 3 \text{ A/dm}^2$).شکل (۴): ریزساختار پوشش مس ($J = 1 \text{ A/dm}^2$).

می‌دهند و سپس این فولاد که دارای یک لایه نازک مس می‌باشد را به حمام اسیدی مس می‌برند تا ضخامت لایه مس را زیاد کنند. دلیل این کار این است که یون‌های مس در حمام اسیدی خیلی سریع بر روی سطح فولاد به صورت الکترولس، احیاء می‌شوند و مانع چسبیده شدن دیگر یونها به سطح از طریق آبرکاری الکتریکی می‌شوند. بنابراین پوشش مس به دست آمده به راحتی از سطح فولاد کنده می‌شود و چسبندگی خوبی به سطح نخواهد داشت [۱۱ و ۱۲]. علاوه بر این حمام اسیدی مسی که در صنعت به کار برده می‌شود، معمولاً حاوی ۱۹۵ الی ۲۴۸ گرم بر لیتر سولفات مس هیدراته ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) می‌باشد [۱۱ و ۱۲]، در حالی که حمام اسیدی مس طراحی شده در این مقاله حاوی ۱۰ گرم بر لیتر سولفات مس هیدراته بوده که این نشان می‌دهد از نظر میزان سولفات مس مصرفی، حمام طراحی

ساختار میکروسکوپی پوشش مس در جریان‌های ۰/۵، ۱، ۲ و ۳ آمپر بر دسی متر مربع، به ترتیب در شکل‌های (۳)، (۴)، (۵) و (۶) نشان داده شده است. بعد از آن که سطح لوله توسط مس پوشش داده شد، لوله سریعاً به حمام کروم سیاه منتقل گردید. آند به کار برده شده در حمام کروم سیاه، سربی و سطح آن هشت برابر سطح کاتد بود. سپس آند را به شکل استوانه درآورده و کاتد به صورت عمودی در مرکز آن قرار داده شد. با این کار تمام سطح جانبی لوله در معرض آند قرار می‌گیرد. ساختار میکروسکوپی پوشش کروم سیاه در شکل‌های (۷) و (۸) نشان داده شده است.

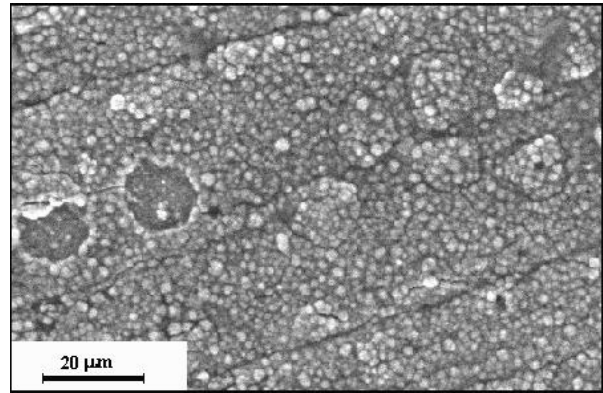
۱-۲- یافته‌ها

آزمایشات انجام شده نشان داد که می‌توان از حمام اسیدی مس جهت پوشش مس بر روی فولاد استفاده نمود. معمولاً در صنعت برای این که بر روی فولاد پوشش مس بدهند ابتدا با کمک حمام سیانیدی مس، یک لایه نازک مس بر روی فولاد پوشش

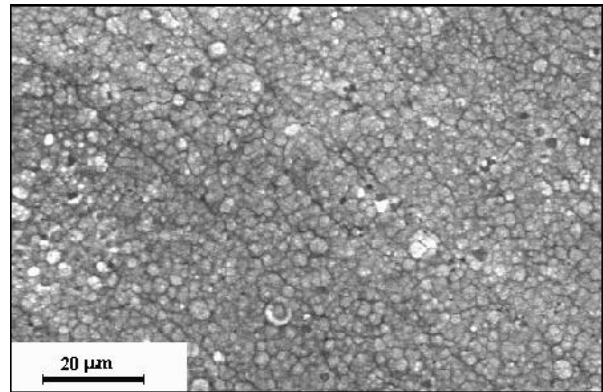
رنگ دیده می‌شود. با توجه به آنالیز کیفی که از این مناطق به دست آمد، مشاهده شد، مناطقی که به صورت لکه‌های سیاه رنگ در ساختار میکروسکوپی دیده می‌شوند دارای مقدار کبالت بیشتری نسبت به کل پوشش می‌باشند. همچنین مناطق خاکستری رنگ دارای مقدار فسفر بیشتری نسبت به کل پوشش به دست آمده هستند.

۳- نتایج و بحث

در اکثر گزارشات گفته شده که به دلیل عمل سممتاسیون مس بر روی فلزات فعال‌تر از مس، استفاده از محلول اسیدی مس جهت تولید پوشش مسی بر روی فولاد و فلزات فعال‌تر از مس امکان‌پذیر نیست و معمولاً در چنین حالتی ابتدا با استفاده از حمام سیانیدی یک لایه مس نازک بر روی سطح فولاد و یا فلزات فعال‌تر از مس ایجاد می‌کنند و سپس برای افزایش ضخامت لایه مس پوشش داده شده از حمام اسیدی مس استفاده می‌گردد [۷ و ۸]. لازم به ذکر است که حمام سیانیدی بسیار سمی و خطرناک می‌باشد. این موضوع باعث گردید که با تغییر ترکیب شیمیایی حمام اسیدی مس و همچنین تغییراتی در نحوه اعمال جریان، بتوان یک پوشش مناسب با چسبندگی بالا را بر روی فولاد ایجاد کرد. پس از این که چندین بار با حمام اسیدی مس که در گزارشات آورده شده بود کار گردید، نتیجه‌گیری شد که وقتی فولاد وارد حمام اسیدی می‌شود، بدون برقراری جریان و به صورت الکترولس یون‌های مس درون حمام سریعاً بر روی سطح فولاد احیاء می‌شوند و یک لایه مس بر روی سطح فولاد رسوب می‌کند که هیچ چسبندگی خوبی به سطح زیرین خود (فولاد) ندارد و پس از اعمال جریان دیگر یون‌های مس موجود در حمام به این لایه مس رسوب کرده بر روی سطح پرتاب می‌شوند و به آن می‌چسبند به طوری که پس از پایان آزمایش یک ورق بسیار نازک از مس ایجاد می‌شود که به راحتی از روی سطح فولاد کنده می‌شود. به عبارتی حالت الکتروفورمینگ پیدا می‌کند. این موضوع نشان داد که قدرت پرتاب حمام خوب بوده و تنها مشکل سممتاسیون سریع مس بر



شکل (۷): ریزساختار پوشش کروم سیاه با زیر لایه فولادی.



شکل (۸): ریزساختار پوشش کروم سیاه با زیر لایه مسی.

شده بسیار مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. برای بررسی میزان چسبندگی پوشش مس به دست آمده به سطح فولاد، از استاندارد شماره ASTM D3359 استفاده شد که پس از بازرسی‌های چشمی مشخص گردید که نرخ چسبندگی بر طبق معیار ارائه شده 4B بوده است که نشان‌دهنده چسبندگی بسیار خوب پوشش مس به سطح فولاد می‌باشد. همین تست نیز برای پوشش کروم سیاه به کار برده شد و مشاهده گردید که نرخ چسبندگی کروم سیاه به زیر لایه مسی طبق استاندارد فوق 5B بوده که نشان‌دهنده چسبندگی عالی کروم سیاه به زیر لایه مسی می‌باشد. همانگونه که در شکل‌های (۵) و (۶) مشاهده می‌شود پوشش کروم سیاه از یکنواختی بسیار خوبی نیز برخوردار می‌باشد. در این تصاویر یک سری مناطق به صورت لکه‌های سیاه رنگ و یک سری مناطق به صورت لکه‌های خاکستری

۴- نتیجه گیری

۱- بر خلاف گزارش‌های قبلی مبنی بر عدم توانایی ایجاد پوشش مس بر روی فولاد از حمام اسیدی مس، با طراحی یک حمام اسیدی مس جدید این کار انجام گرفت.

۲- حمام اسیدی مس طراحی شده از نظر میزان سولفات مس هیدراته مصرفی بسیار مقرون به صرفه‌تر بوده و میزان سولفات مس هیدراته مصرفی از ۲۲۰ گرم بر لیتر (به طور متوسط) به ۱۰ گرم بر لیتر کاهش یافته است.

۳- جایگزینی حمام اسیدی مس طراحی شده به جای حمام سیانیدی مس که در صنعت به طور وسیع از آن استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که حمام سیانیدی بسیار خطرناک و سمی بوده و خطرات زیست محیطی زیادی را دارا می‌باشد.

۴- پوشش مس به دست آمده از حمام اسیدی مس طراحی شده، بسیار یکنواخت بوده و طبق استاندارد به شماره ASTM D33590 دارای چسبندگی بسیار خوبی به زیر لایه فولادی می‌باشد.

۵- پوشش کروم سیاه که بر روی مس داده شد نیز بسیار یکنواخت بوده و طبق استاندارد به شماره ASTM D33590، دارای چسبندگی بسیار خوبی به زیر لایه مسی (که بر روی فولاد پوشش داده شده) می‌باشد.

۶- عدم نیاز به تنظیم pH حمام کروم سیاه.

۵- مراجع

- [1] A. Abbas, "Solchrome Solar Selective Coating and Effective Way for Solar Water Heaters Globally", Renewable Energy, Vol. 19, pp. 145-154, 2000.
- [2] T. Tadayosh, "Solar Thermal Electric Power Systems in Japan", Solar Energy, Vol. 25, pp. 97-104, 1980.
- [3] K. D. Lee, W. C. Jung and J. H. Kim, "Thermal Degradation of Black Chrome Coating", Sol Energy Mater Sol Cells, Vol. 63, pp. 37-125, 2000.
- [4] P. M. Driver, R. W. Jones, C. L. Riddiford and R. J. Simpson, "A New Chrome Black Selective Absorbing Surface", Sol Energy, Vol. 19, pp. 6-301, 1977.
- [5] A. E. Dixon and J. D. Leslie, "Solar Energy Conversion and Introductory Course Selected Lectures From The 5th Course on Solar Energy Conversion", Canada, Pergamon Press, 1978.

روی سطح فولاد بوده است. لذا برای حل این مشکل تصمیم گرفته شد که قبل از ورود فولاد به عنوان کاتد در حمام، ولتاژ برقرار شود تا از همان ابتدا یون‌های مس توسط آبکاری الکتریکی (و نه الکترولس) بر روی سطح فولاد بنشینند. اما بعد از آزمایش دیده شد که هنوز هم چسبندگی پوشش مس بسیار کم است و عامل اصلی همچنان احیاء سریع یون‌های مس بر روی سطح فولاد می‌باشد. بنابراین تصمیم گرفته شد که غلظت یون‌های مس موجود در حمام کم گردد، بدین صورت که غلظت سولفات مس هیدراته از ۲۲۰ گرم بر لیتر به ۱۰ گرم بر لیتر کاهش یافت. بعد تمام مراحل فوق تکرار گردید و دیده شد که چسبندگی لایه مس به سطح افزایش یافته است. سپس برای این که پوشش متراکم و یکنواخت‌تری به دست آید، زمان پوشش دهی ثابت نگه داشته شد (۳ دقیقه) و دانسیته جریان از 0.5 A/dm^2 تا 3 A/dm^2 تغییر داده شد. پس از آزمایشات فوق مشاهده گردید که بهترین پوشش از نظر تراکم و یکنواختی در دانسیته جریان 1 A/dm^2 تولید می‌شود که این موضوع از مقایسه شکل‌های (۳)، (۴)، (۵) و (۶) به وضوح قابل مشاهده می‌باشد. در ارتباط با پوشش کروم سیاه هم چندین مرتبه پوشش کروم سیاه مستقیماً و بدون زیر لایه مسی بر روی سطح فولاد پوشش داده شد و مشاهده گردید که پوشش کروم سیاه داده شده بر روی مس به مراتب تیره‌تر و یکنواخت‌تر از پوشش کروم سیاه داده شده بر روی فولاد می‌باشد. علاوه بر این دانسیته جریان جهت تولید پوشش کروم سیاه در محدوده 35 A/dm^2 تا 40 A/dm^2 مورد بررسی قرار گرفت و مشخص گردید که با زیاد شدن دانسیته جریان، در لبه‌های لوله پوشش کروم سیاه تولید نمی‌شود، زیرا همواره تمرکز جریان در گوشه‌ها و لبه‌ها نسبت به مرکز زیادتر می‌باشد. بنابراین کمترین دانسیته جریان (35 A/dm^2) که یک پوشش کاملاً یکنواخت و چسبنده ایجاد کرده و تمام سطح را پوشانده، انتخاب گردید.

- [6] M. R. Bayati, M. H. Shariat and K. Janghorban, "Design of Chemical Composition and Optimum Working Conditions for Trivalent Black Chromium Electroplating Bath Used for Solar Thermal Collectors", *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 2163-2178, 2005.
- [7] C. Anandan, V. K. William Grips, K. S. Rajam, V. Jayaram and P. Bera, "Investigation of Surface Composition of Electroplated Black Chrome Coatings by X-Ray Photoelectron Spectroscopy", *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 191, pp. 60-254, 2002.
- [8] U. S. Patents No. 4262060, 1981.
- [9] T. K. Lee, D. H. Kim and P. Chungmoo Auh, "The Optical Characteristics of Black Chrome Solar Selective Films Coated by the Pulse Current Electrolysis Method", *Sol Energy Mater Sol Cells*, Vol. 29, pp. 61-149, 1993.
- [10] U. S. Patents No. 2844530, 1958.
- [11] F. Mattie McFadden, *Metals Handbook*, 8th ed, Ohio, ASM International, Vol. 2, p. 424, 1964.

[۱۲] م. قربانی، پوشش دادن فلزات، جلد اول، ص. ۹۸-۹۹، انتشارات دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ۱۳۷۹.

۶- پی‌نوشت

- 1- Solar Thermal Systems
- 2- Collector
- 3- Selective