تأثیر شرایط به‌هم زدن حمام الکترولس روی کیفیت پوشش‌های ضداصطکاک کامپوزیتی نیکل، فسفر، سولفور مولیبدن

محمودمنیرواقفی* ، احمد ساعتچی** و جلال حجازی***
دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۱۳۷۴/۲/۶ - دریافت نسخهٔنهایی: ۱۳۷۵/۳/۲۰)

چکیده - به‌دلیل خواص مناسب سولفور مولیبدن از نظر قابلیت خود روغنکاری و پایداری در دماهای نسبتا" بالا، این ماده جانشین مناسبی برای ایجاد کامپوزیت نیکل فسفر با ذرات مختلف مثل گرافیت، تفلون، برای کاربردهای ضداصطکاک است [۱].
از آنجاییکه شناورکردن ذرات سولفور مولیبدن (MoS_2) در حمام الکترولس برای نشاندن ذرات روی زمینه ضروری است لذا این مقاله در برگیرنده تأثیر عوامل مختلف به‌هم زدن روی کیفیت پوشش کامپوزیتی نیکل، فسفر، سولفور مولیبدن ($Ni\text{-}P\text{-}MoS_2$) است. این بررسیها عمدتا" بر پایه اندازه‌گیری سرعت رسوب آنالیز نیکل، فسفر، سولفور مولیبدن، آزمایشهای سختی، متالوگرافی و توپوگرافی سطح توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بوده است. برای به‌هم زدن حمام از روشهای مغناطیسی و دمش گاز (هوا، اکسیژن، ازت) استفاده شد.
نتایج نشان می‌دهد گرچه به‌هم زدن حمام برای شناورکردن ذرات سولفور مولیبدن ضروری است. اما با افزایش سرعت به‌هم زدن، سرعت رسوب کاهش و در نتیجه زمان لازم برای اجرای فرآیند به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌یابد. از طرفی از میان روشهای به‌هم زدن، دمش هوا عملکرد نسبتا" مطلوبی از نظر سرعت رسوب، یکنواختی توزیع ذرات سولفور مولیبدن، پایداری حمام و توپوگرافی سطح از خود نشان داد.

The Effects of Agitation on the Properties of Antifriction Ni-P-MoS_2 Composite Coatings

M. Monir-Vaghefi, A.Saatchi and J.Hejazi
University of Science and Technology, Isfahan University of Technology

ABSTRACT- ***In this work the effects of various methods of agitation on the properties of electroless Ni-P-MoS_2 composite coatings were investigated. Magnetic stirring as well as purging the solution with gas (Air, Oxygen, Nitrogen) were used. Plating rate, chemical composition, MoS_2 distribution, and hardness of the deposit were measured. Topography of coating was studied with metallography and scanning electron microscopy. It was concluded that purging the solution with air produced optimum results, i.e. high rate of deposition, uniform distribution of MoS_2 particles and appropriate surface morphology.***

---

* دانشجوی دکترا ** دانشیار *** استاد

۱ - مقدمه

سولفورمولیبدن (MoS_2) دارای ساختار هگزاگونال بوده و یکی از جذابترین مواد در میان روغنهای جامد است[۲] که می‌تواند در پوششهای نیکلی به‌شکل ذرات وارد شود. بدین ترتیب پوشش دارای خواص ضداصطکاکی می‌شود. تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سولفور مولیبدن به‌کار رفته در آزمایشها در شکل (۱) نشان داده شده است. سولفور مولیبدن با استحکام کششی فوق‌العاده می‌تواند در اتمسفر و حتی در خلاءهای نسبتاً پایین به‌عنوان عامل کاهش دهندهٔ اصطکاک به‌ویژه در ماشینهای فضایی و یا در شرایط تابشهایی همچون γ در نیروگاههای اتمی عمل کند در حالی‌که روغنهای غیر جامد فاقد چنین پایداری در شرایط فوق هستند[۳].

اطلاعات کمی در زمینهٔ تأثیر به‌هم زدن حمامهای الکترولس در دسترس است. احتمال می‌رود سرعتهای نفوذی بیشتر و جابه‌جایی بهتر هر دو امکان واکنش یونها و ذرات سولفور مولیبدن در نزدیکی سطح قطعهٔ تحت پوشش را فراهم آورد [۴ و ۵] ضمن اینکه محصولات واکنش نیز از سطح دور می‌شوند.

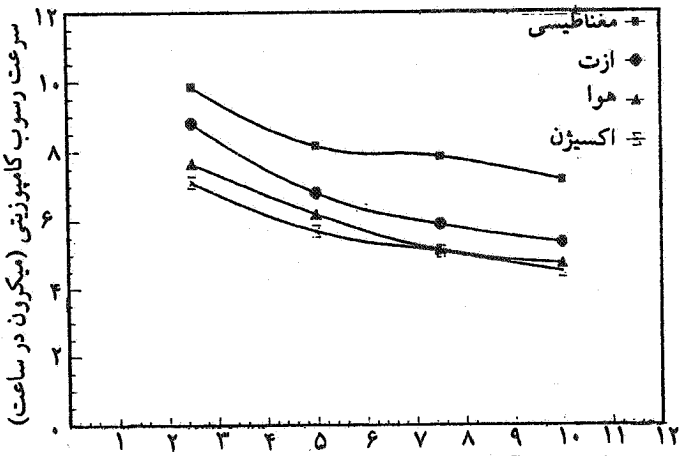
در حمامهای جدید الکترولس پمپ کردن محلول و فیلتر کردن آن به‌منظور بهبود عملکرد حمام صورت می‌گیرد تا کوچکترین ذرات خصوصاً آهن، نیکل و مس در اندازه‌های میکرون از حمام خارج و کیفیت حمام به حالت اولیه برگردد [۶]. چنین شرایطی دقیقاً مخالف اجرای فرایند پوششهای کامپوزیتی الکترولس نیکل، فسفر است زیرا در این سیستمها، عامل مورد نظر برای ایجاد پوشش کمپوزیتی، مثلاً سولفور مولیبدن، به‌صورت پودر عمداً به محلول اضافه می‌شود. بنابراین ذراتی که به‌عنوان تغییر دهندهٔ خواص پوشش در حمام وارد می‌شوند بایستی کاملاً خنثی باشند [۷]. گرچه سولفور مولیبدن از نظر خنثی بودن مطلوب است ولی وجود ناخالصیها حتی در حد بسیار اندک معمولاً اجتناب ناپذیراست. ضمن اینکه خطر رسوب ذرات نیکل و ترکیبات نیکل فسفر در طول عملیات حمام وجود داشته و پیچیدگی کار با حمامهای با ذرات شناور سولفور مولیبدن را دو چندان می‌کند. بدین لحاظ از تجهیزات ویژه‌ای برای آبکاری کامپوزیتی استفاده می‌شود. به‌کارگیری فیلترهای کیسه‌ای برای خارج کردن ذرات با اندازه‌های بیش از ۷۰ میکرون در طول عملیات لازم است. حرارت دادن بایستی از داخل یا خارج حمام همراه با پمپهای مخصوص اعمال شود. طراحیهای فوق‌العاده مؤثر خطر ایجاد "نقاط گرم" را کاهش می‌دهد ضمن اینکه دست و پاگیر بودن گرمکنهای فرورونده متداول را نیز حذف می‌کند. درحال حاضر حمامهای تجارتی اسیدی را می‌توان در حالی‌که ذرات خنثی در آن شناورند به‌وسیلهٔ عوامل احیاء کننده، کمپلکس کننده و با فر از نظر pH و پایداری مرتباً کنترل کرد. در این مقاله تأثیر نوع به‌هم زدن، سرعت به‌هم زدن، مقدار سولفور مولیبدن در حمام، زاویه استقرار نمونه در حمام در شرایط یکسان دما، زمان و pH روی خواص پوشش منجمله ضخامت، سختی، ترکیب و توپوگرافی سطح پوشش مورد مطالعه قرار گرفته است.

شکل ۱- تصویر SEM از سولفورمولیبدن به کار رفته در آزمایشها

۲ - آزمایشها

نمونه‌ها از فولادهای ساده و زنگ نزن انتخاب شدند و پس از آماده کردن، سطح تحت عملیات چربی‌زدایی و شستشوی لازم قرار گرفت و سپس در یک حمام الکترولس نیکل، فسفر تجارتی اسیدی به مدت ۵ دقیقه پوشش اولیه داده شد و کلیه نمونه‌ها به حمام الکترولس کامپوزیتی که در آن ذرات سولفور مولیبدن شناور بودند منتقل شدند. قبل از اضافه کردن ذرات سولفور مولیبدن به حمام، ذرات با استن آزمایشگاهی شستشو و سپس در محلول ۵ درصداسید نیتریک گرم، برای خروج ناخالصیهای آلی قرار گرفتند. سپس ذرات مجدداً شسته، فیلتر و خشک شدند.

برای اندازه‌گیری ضخامت از تغییرات ابعادی به وسیلهٔ



شکل ۲- تأثیر میزان بارگذاری ذرات MoS_2 در حمام روی سرعت رسوب

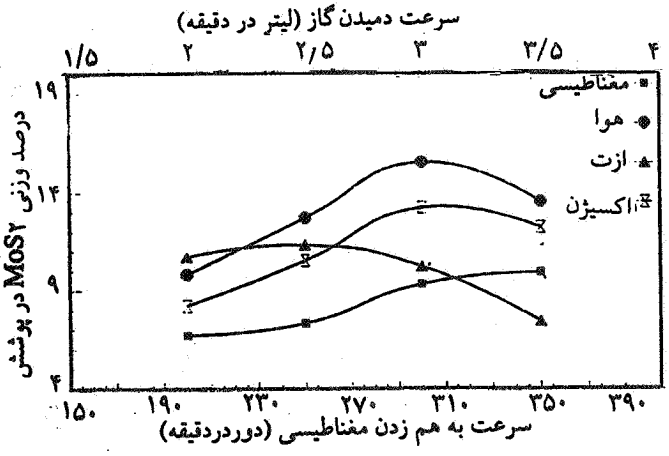
میکرومتر یا از تغییرات وزنی به وسیلهٔ ترازوهای دقیق و از میکروسکوپ الکترونی روبشی و میکروسکپ نوری برای بررسیهای توپوگرافی و متالوگرافی استفاده شد. از به‌هم زدن مغناطیسی با گرم کنندهٔ الکتریکی و در شرایط به‌هم زدن با گاز از هوا، اکسیژن و ازت همراه با سیستم گرم کنندهٔ گاز استفاده شد. دمای گاز قبل از ورود به حمام حدود ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد بود. برای تغییر در سرعت دمیدن گاز نیز از سیستم کنترل فلومتری استفاده شد.

حمام مرتباً در طول آبکاری در محدودهٔ ۹۰ درجه سانتیگراد و pH حدود ۴/۶ و به کمک عوامل احیاء کننده، کمپلکس کننده و بافر از نظر ترکیب و پایداری کنترل می‌شد. در کلیه آزمایشها نمونه‌ها از نظر محل استقرار در حمام در شرایط یکسان قرار داشتند.

۳ - نتایج

۳-۱ - تأثیر میزان بارگذاری ذرات سولفور مولیبدن در حمام الکترولس روی سرعت رسوب در شرایط مختلف به‌هم‌زدن

حمام الکترولس تجارتی اسیدی در دمای ۹۰ درجهٔ سانتی‌گراد و pH حدود ۴/۶ با مقادیر مختلف سولفور مولیبدن از ۲/۵ تا ۱۰ گرم در لیتر استفاده شد. سرعت به‌هم زدن مغناطیسی ۲۵۰ دور در دقیقه و با روش دمش هوا، اکسیژن و ازت ۲/۵ لیتر در



شکل ۳- تأثیر سرعت به هم زدن حمام روی درصد وزنی MoS_2 در پوشش کامپوزیتی Ni-P-MoS_2 در حمامی با بارگذاری ۵ گرم در لیتر MoS_2 در پوشش

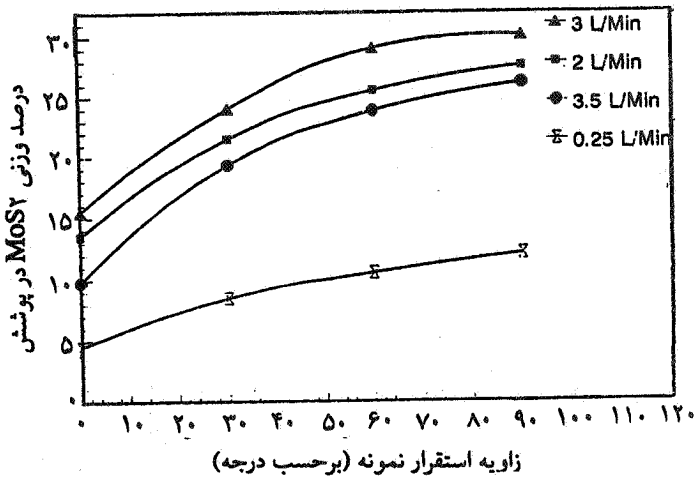
دقیقه ثابت در نظر گرفته شد. گاز قبل از ورود به حمام تا ۵۰ درجهٔ سانتی‌گراد گرم شد. زمان اجرای فرایند در هر آزمایش ۴ ساعت بود. نتایج به‌وسیلهٔ تغییرات ضخامت بر حسب زمان در شکل (۲) نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود سرعت رسوب پوشش با افزایش میزان بارگذاری در همه روشهای به‌هم زدن کاهش یافته است.

۳-۲ - تأثیر میزان به‌هم زدن حمام الکترولس روی مقدار سولفور مولیبدن در پوشش

ذرات سولفور مولیبدن یک ساعت قبل از شروع کار حمام در دمای محیط در مقادیر مورد نظر به حمام تازه اضافه شدند و با روشهای به‌هم زدن مغناطیسی، دمیدن با هوا، اکسیژن و ازت به‌منظور توزیع یکنواخت ذرات شناور شدند. مقدار سولفور مولیبدن در حمام ۵ گرم در لیتر انتخاب شد. نتایج مطابق شکل (۳) به‌دست آمد. ملاحظه می‌شود افزایش سرعت به‌هم زدن در تمامی روشهای به‌هم زدن به‌جز روش به‌هم زدن با گاز ازت منجر به افزایش درصد سولفور مولیبدن در پوشش می‌شود.

۳-۳ - تأثیر میزان به‌هم‌زدن حمام الکترولس با هوا روی مقدار سولفور مولیبدن در پوشش تحت زوایای مختلف استقرار نمونه در حمام

یک ساعت قبل از شروع کار، به میزان ۱۰ گرم در لیتر ذرات

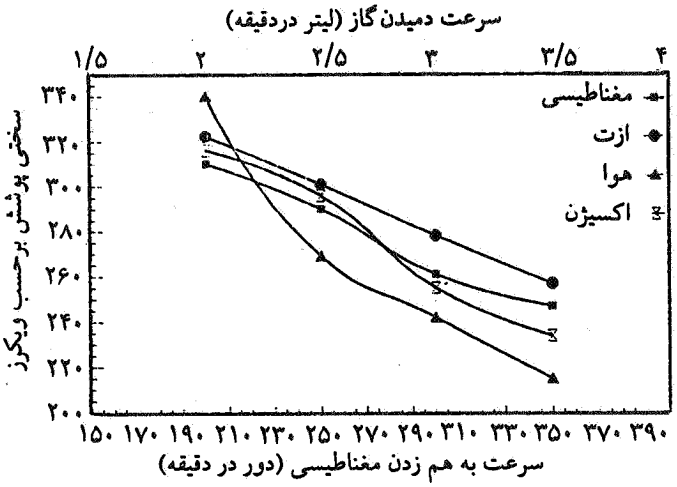


شکل ۴- تأثیر زاویه استقرا نمونه در حمام روی درصد وزنی MoS_2 در پوشش کامپوزیتی $Ni\text{-}P\text{-}MoS_2$ در حمامی با بارگذاری ۱۰ گرم در لیتر MoS_2

سولفور مولیبدن به حمام اضافه شد. نمونه‌های پایه تحت زوایای صفر، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه نسبت به دیوارهٔ ظرف و تحت سرعتهای مختلف دمش هوا پوشش داده شدند و نتایج مطابق شکل (۴) به‌دست آمد. ملاحظه می‌شود که با افزایش زاویه استقرار نمونه‌نسبت به دیوارهٔ عمودی ظرف در تمام مقادیر مختلف دمیدن هوا برای به‌هم زدن درصد سولفور مولیبدن در پوشش افزایش می‌یابد.

۳-۴ - تأثیر میزان به‌هم زدن حمام الکترولس روی سختی پوشش

پوشش کامپوزیتی نیکل، فسفر، سولفور مولیبدن حاوی ذرات نرم در زمینهٔ سخت است. بنابراین در مقادیر سختیهای اندازه‌گیری شده پراکندگی مشاهده می‌شود. سختی سولفور مولیبدن حدود ۱ الی ۲/۵ در مقیاس موس است [۸]. میزان سولفور مولیبدن در حمام ۱۰ درصد وزنی انتخاب شد. نتایج سختی پوشش بر حسب میزان به‌هم زدن حمام مطابق شکل (۵) به‌دست آمد. ملاحظه می‌شود که با افزایش سرعت به‌هم زدن، سختی پوشش به‌دست آمده در کلیه روشهای به‌هم زدن کاهش یافته است.



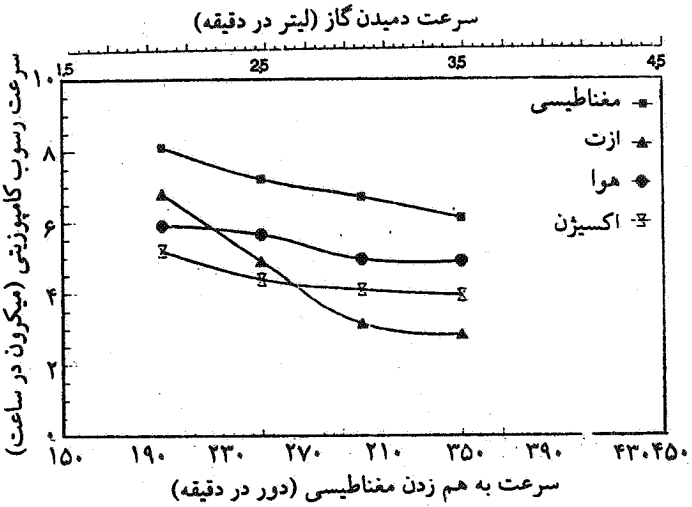
شکل ۵- تأثیر میزان به هم زدن حمام روی سختی پوشش کامپوزیتی الکترولس $Ni\text{-}P\text{-}MoS_2$ در حمامی با بارگذاری ۱۰ گرم در لیتر

۳-۵ - تأثیرشرایط به‌هم زدن حمام الکترولس بر سرعت رسوب پوشش

مقدار سولفور مولیبدن در حمام ۱۰ گرم در لیتر انتخاب شد. از سرعتهای دمیدن ۲ تا ۳/۵ لیتر در دقیقه برای روش به‌هم زدن با هوا، اکسیژن و ازت و از سرعتهای ۲۰۰ تا ۳۵۰ دور در دقیقه برای روش به‌هم زدن مغناطیسی استفاده شد. اندازه‌گیری ضخامت پوشش به‌وسیلهٔ میکرومتر و یا با استفاده از تغیرات وزنی بود و سرعتهای راسب شدن با اندازه‌گیری ضخامت بر حسب زمان به‌دست آمد. زمان اجرای فرایند آبکاری کامپوزیتی ۴ ساعت بود. در شکل (۶) تأثیر سرعت به‌هم زدن بر سرعت راسب شدن پوشش نشان داده است. با افزایش سرعت به‌هم زدن سرعت راسب شدن در همه روشهای به‌هم زدن کاهش یافته است.

۳-۶- تأثیر شرایط به‌هم زدن حمام الکترولس روی توپوگرافی سطح پوشش

مقدارسولفورمولیبدن‌درحمام ۵ گرم در لیتر انتخاب شد.برای‌شناور کردن ذرات سولفور مولیبدن از روش دمیدن با هوا، اکسیژن، ازت و روش مغناطیسی با سرعتهای مختلف استفاده شد. زمان آزمایش ۴ ساعت بود و بررسیهای توپوگرافی سطحی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مطابق شکلهای (۷، ۸، ۹ و ۱۰)به‌دست آمد.



شکل ۶- تأثیر سرعت به هم زدن و نوع به هم زدن حمام روی سرعت رسوب پوشش کامپوزیتی الکترولس Ni-P-MoS_2 در حمامی با بارگذاری ۱۰ گرم در لیتر

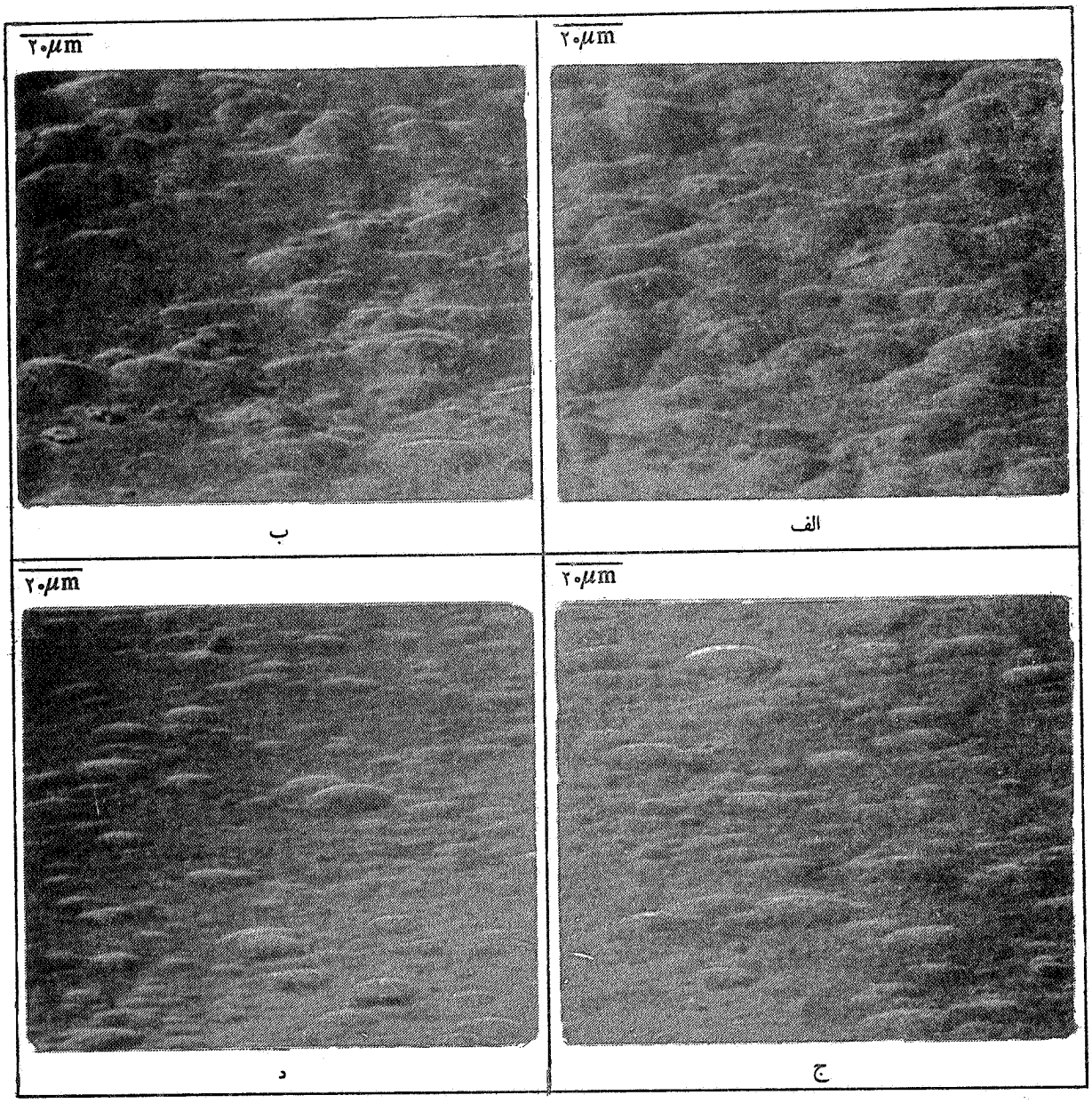
۴- بررسی نتایج

۴-۱ - افزایش میزان بارگذاری ذرات سولفور مولیبدن در حمام منجر به کاهش سرعت راسب شدن می‌شود. این کاهش در حالتی که به‌هم زدن حمام با گاز باشد بیشتر از به‌هم زدن مغناطیسی است (شکل ۲) به نظر می رسد افزایش بیش از حد ذرات سولفور مولیبدن خطر بروز ابری شدن حمام را افزایش می دهد و یا حداقل باعث کندی سرعت راسب شدن و غیر اقتصادی بودن حمام می‌شود. بنابراین در یک میزان بارگذاری مطلوب ذرات در حمام بایستی سرعت راسب شدن را به‌وسیله سایر عوامل مثلاً" تغییر در سرعت به‌هم زدن افزایش داد.

۴-۲ - افزایش سرعت به‌هم زدن حمام که برای شناور کردن ذرات سولفور مولیبدن صورت می‌گیرد باعث کاهش سرعت راسب‌شدن می‌شود. این کاهش هنگامی که به‌هم زدن با دمیدن گاز باشد نسبت به به‌هم زدن مغناطیسی بیشتر است (شکل ۶) . بنابراین بایستی حتی المقدور از سرعتهای به‌هم زدن کمتر استفاده کرد. البته مشروط بر اینکه شناور شدن نامطلوب ذرات سولفور مولیبدن ظاهر نشود. عدم شناور شدن کامل، خطر تجمع ذرات در پوشش را ممکن است به‌همراه داشته باشد. ضمن اینکه مطالعهٔ مقاطع پوششهای کامپوزیتی نشان می‌دهد که امکان خطر تجمع در حالتی که به‌هم زدن حمام به روش مغناطیسی باشد نسبت به روش دمیدن گاز بیشتر است. هنگامی‌که سرعت دمیدن با هوا افزایش می‌یابد سرعت راسب شدن تقریباً" ثابت می‌ماند (شکل ۶) . چنین پدیده‌ای برای آن دسته از ذرات که دانسیته بالا دارند و برای شناور ماندن نیاز به سرعتهای بالای به‌هم زدن دارند جالب است زیرا افزایش شدید به‌هم زدن با هوا سرعت رسوب را با کاهشهای کمتری مواجه می‌کند. لازم به یادآوری است که‌دانسیتهٔ سولفور مولیبدن حدود ۴/۸ گرم بر سانتی‌متر مکعب و محلول الکترولس تجارتی اسیدی به‌کار رفته دارای دانسیتهٔ حدود ۱/۰۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب است.

سرعت راسب شدن هنگامی که حمام با گاز ازت به‌هم زده شود نسبت به حالتی که حمام با هوا دمیده شود بیشتر است (شکل ۶). البته با افزایش سرعت دمیدن با ازت حمام از نظر پایداری بسیار حساس می‌شود و کنترل دقیقتری را از نظر pH می‌طلبد به‌طوریکه در این حالت روی سطح پوشش ذرات به‌طور مستقل رسوب می‌کنند. افزایش بیش از حد سرعت دمیدن گاز حمام را از کنترل خارج و ناپایدار می‌کند. در حالی‌که در حمامهای حاوی هوا و اکسیژن کنترل پایداری حمام به‌سهولت صورت می‌گیرد. از آنجایی که سرعت راسب شدن در حالتی که دمیدن با اکسیژن باشد کمتر از حالتی است که دمیدن با هوا باشد بنابراین روش دمیدن با هوا به‌عنوان بهترین روش به‌هم زدن می‌تواند مطرح باشد. بر اساس آنچه اشاره شد دمیدن با هوا، اکسیژن و ازت در حمام منجر به شرایط نسبتاً متفاوت چه از نظر وضعیت حمام از نظر پایداری و چه از نظر کیفیت رسوب می‌شود. بنابراین به‌طور قریب به یقین می‌توان این تأثیرات را عمدتاً" به نقش ازت در رفتار حمام نسبت داد.

۴-۳ - با افزایش سرعت به‌هم زدن حمام درصد ذرات شناور سولفور مولیبدن افزایش می‌یابد در نتیجه مقدار سولفور مولیبدن درپوشش‌افزایش‌می‌یابد(شکل۳).به‌نظرمی‌رسدبه‌هم‌زدن‌مغناطیسی نسبت‌به‌به‌هم‌زدن‌باگازتوانایی‌کمتری‌درشناورکردن‌ذرات‌سولفور مولیبدن داشته باشد مع‌الوصف افزایش بیش از حد به‌هم زدن ممکن است اجازه ندهد ذرات روی پایه باقی بمانند و در نتیجه درصد ذرات در پوشش کاهش می‌یابد (شکل ۳). لازم به یادآوری است که درشرایط دمیدن شدید با گاز ازت خطرابری شدن



شکل ۷- تصاویر SEM پوشش کامپوزیتی الکترولس نیکل، فسفر، سولفورمولیبدن تحت سرعتهای مختلف به هم زدن مغناطیسی، زمان آبکاری ۴ ساعت

الف - ۲۰۰ دور در دقیقه　　ب - ۲۵۰ دور در دقیقه

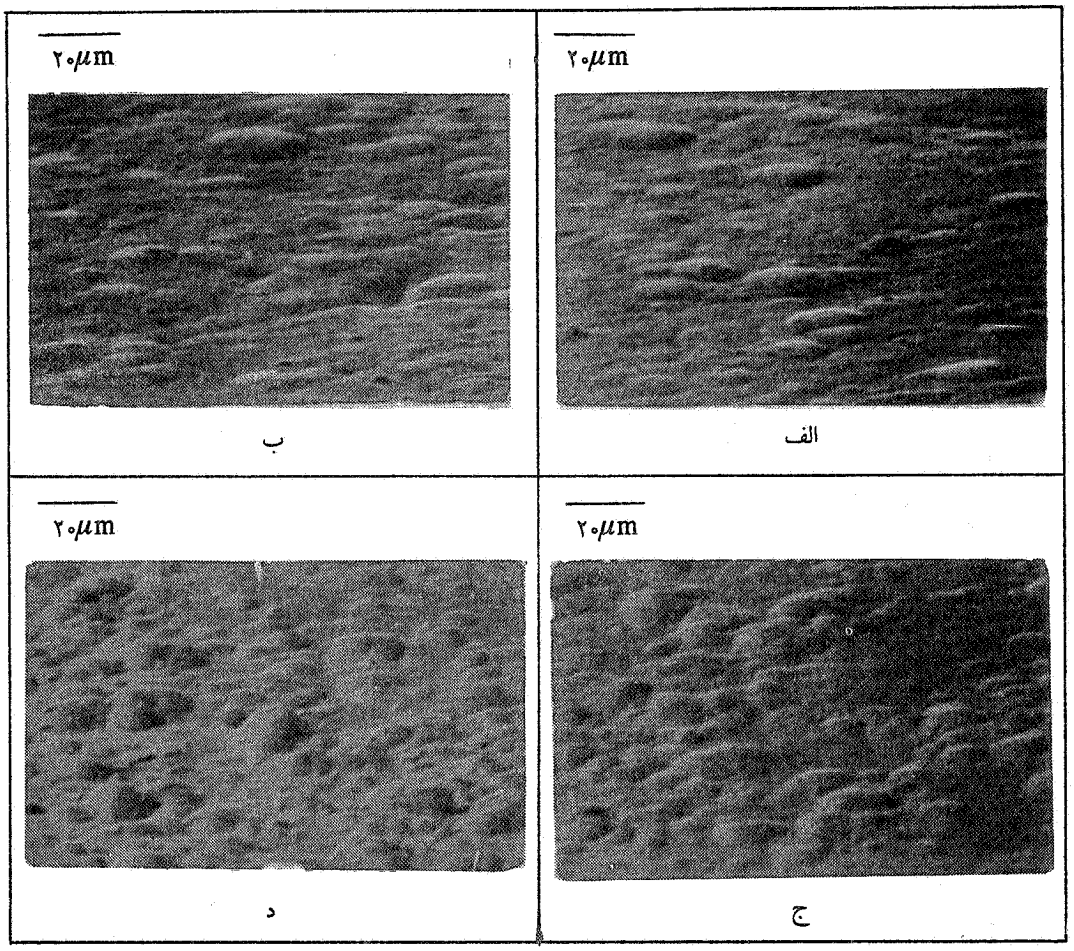
ج - ۳۰۰ دور در دقیقه　　د - ۳۵۰ دور در دقیقه

حمام وجود دارد.

۴-۴ - گر چه با افزایش سرعت به‌هم زدن حمام درصد ذرات شناور سولفور مولیبدن افزایش و در نتیجه مقدار سولفور مولیبدن درپوشش‌افزایش‌می‌یابدمع‌الوصف‌زاویه‌استقرارنمونه‌درحمام‌هم‌روی مقدار نشست سولفور مولیبدن در پوشش اثر می‌گذارد (شکل ۴) .

نتایج نشان می‌دهد که درصد ذرات سولفور مولیبدن در پوشش تابع زاویه نمونه پایه نسبت به وضعیت قائم در حمام است. البته این‌تأثیردرحالتی‌که‌به‌هم‌زدن‌حمام‌شدیدباشد بیشتر است (شکل ۴).

۴-۵ - افزایش سرعت به‌هم زدن حمام باعث کاهش سختی پوشش می‌شود (شکل ۵) . از آنجایی که با افزایش سرعت به‌هم



شکل ۸- تصاویر SEM پوشش کامپوزیتی الکترولس $Ni\text{-}P\text{-}MoS_2$ تحت سرعتهای مختلف دمیدن هوا در حمام زمان آبکاری ۴ ساعت

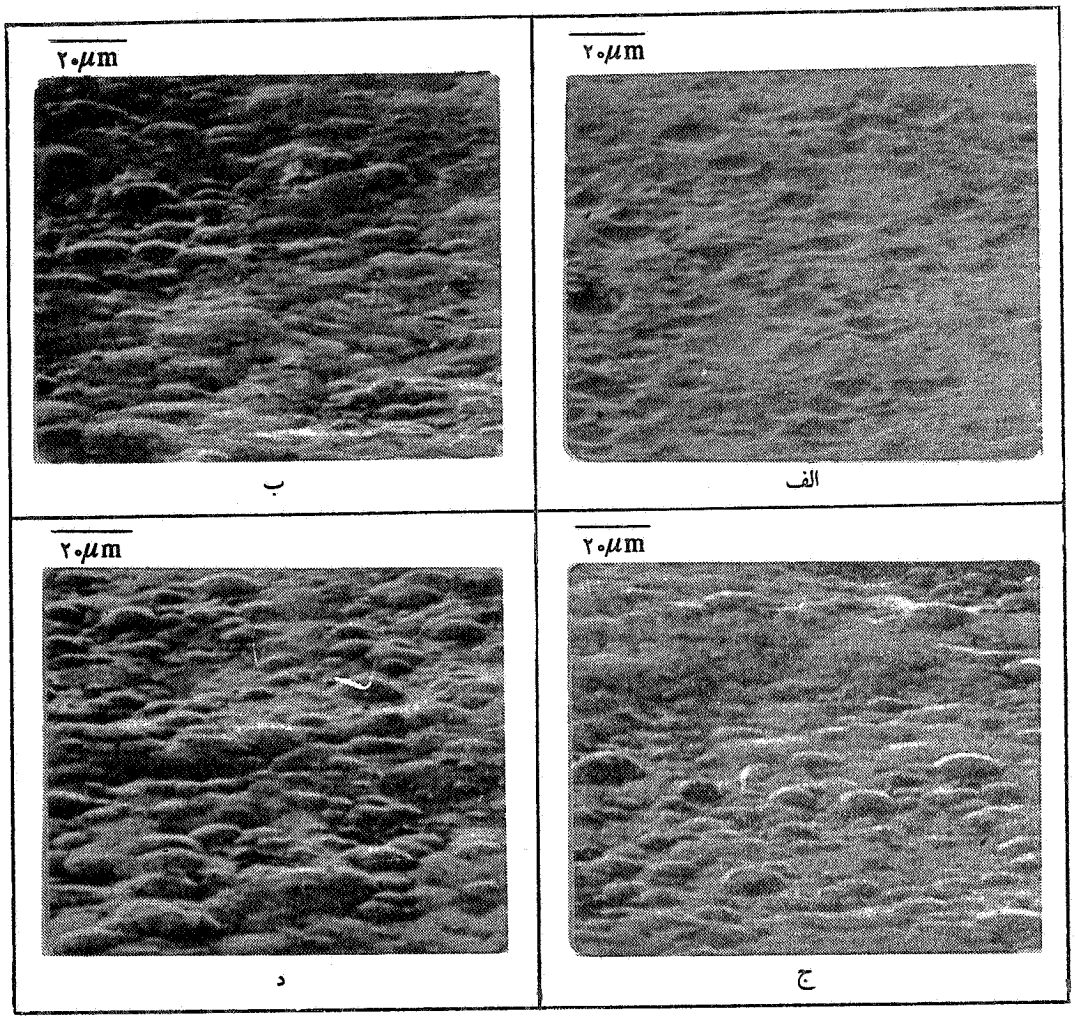
الف - ۲ لیتر در دقیقه　　ب - ۲/۵ لیتر در دقیقه

ج - ۳ لیتر در دقیقه　　د - ۳/۵ لیتر در دقیقه

زدن، سرعت رسوب کاهش می‌یابد در نتیجه سختیهای به‌دست آمده از پوششهای با ضخامت کمتر پایین خواهد بود.

۴-۶ - تغییر در شدت به‌هم زدن و نوع به‌هم زدن روی توپوگرافی سطحی پوشش کامپوزیتی $Ni\text{-}P\text{-}MoS_2$ اثر می‌گذارد (شکلهای ۷، ۸، ۹ و ۱۰). در حالتی که پوشش کامپوزیتی در حمام با به‌هم زدن با گاز تشکیل شده باشد توپوگرافی سطحی از پستی و بلندی کمتری نسبت به حالت به‌هم زدن مغناطیسی برخوردار است (مقایسهٔ شکل ۷ با شکلهای ۸، ۹ و ۱۰). این را شاید بتوان به شرایط جابه‌جایی بهتر و سرعت رسوب کمتر نسبت داد.

هنگامی که سرعت به‌هم زدن مغناطیسی پایین باشد پستی و بلندی توپوگرافی سطحی نشان دهندهٔ حالت جریان اغتشاشی حمام است که با افزایش سرعت به‌هم زدن و ایجاد حالت جریان لایه‌ای در حمام توپوگرافی سطحی نیز تغییر می‌کند. دراین حالت وضعیت پستی و بلندیها بر وجود جریان لایه‌ای در حمام تأکید می‌کند. شکل (۷ - ج و د) . از طرفی در روش دمیدن با هوا و یا اکسیژن و با سرعتهای پایین دمیدن حالت جریان در حمام لایه‌ای بوده و با افزایش سرعت دمیدن ازت از آنجایی که حمام با ناپایداری مواجه می‌شود وضعیت پوشش مطلوب نخواهد بود (شکل ۱۰) . بنابراین نتایج مبین اثر منحصربه‌فرد ازت بر رفتار حمام است. به‌منظور حفظ کیفیت سطح از نظر توپوگرافی بایستی از سرعتهای به‌هم زدن شدیدبرای مقابله با جریان اغتشاشی اجتناب کرد و از طرفی دیگر سرعتهای به‌هم زدن اندک ممکن است منجر به عدم



شکل ۹- تصاویر SEM پوشش کامپوزیتی الکترولس $Ni\text{-}P\text{-}MoS_2$ تحت سرعتهای مختلف دمیدن اکسیژن در حمام، زمان آبکاری ۴ ساعت

الف - ۲ لیتر در دقیقه **ب - ۲/۵ لیتر در دقیقه**

ج - ۳ لیتر در دقیقه **د - ۳/۵ لیتر در دقیقه**

شناور ماندن ذرات سنگین سولفور مولیبدن با وزن مخصوص ۴/۸ در حمام با وزن ۱/۰۵ شود. بنابراین در روش به‌هم زدن مغناطیسی سرعت مطلوب حدود ۲۵۰ الی ۳۵۰ دور در دقیقه و از میان روشهای به‌هم زدن با هوا، اکسیژن و ازت روش به‌هم زدن با هوا و با سرعت حدود ۲/۵ الی ۳ لیتر در دقیقه به‌عنوان بهترین روش پیشنهاد می‌شود. آنچه گفته شد یک راهنمای کلی و برای هر فرایند آبکاری کامپوزیتی مطالعات گسترده‌تری را می‌طلبد.

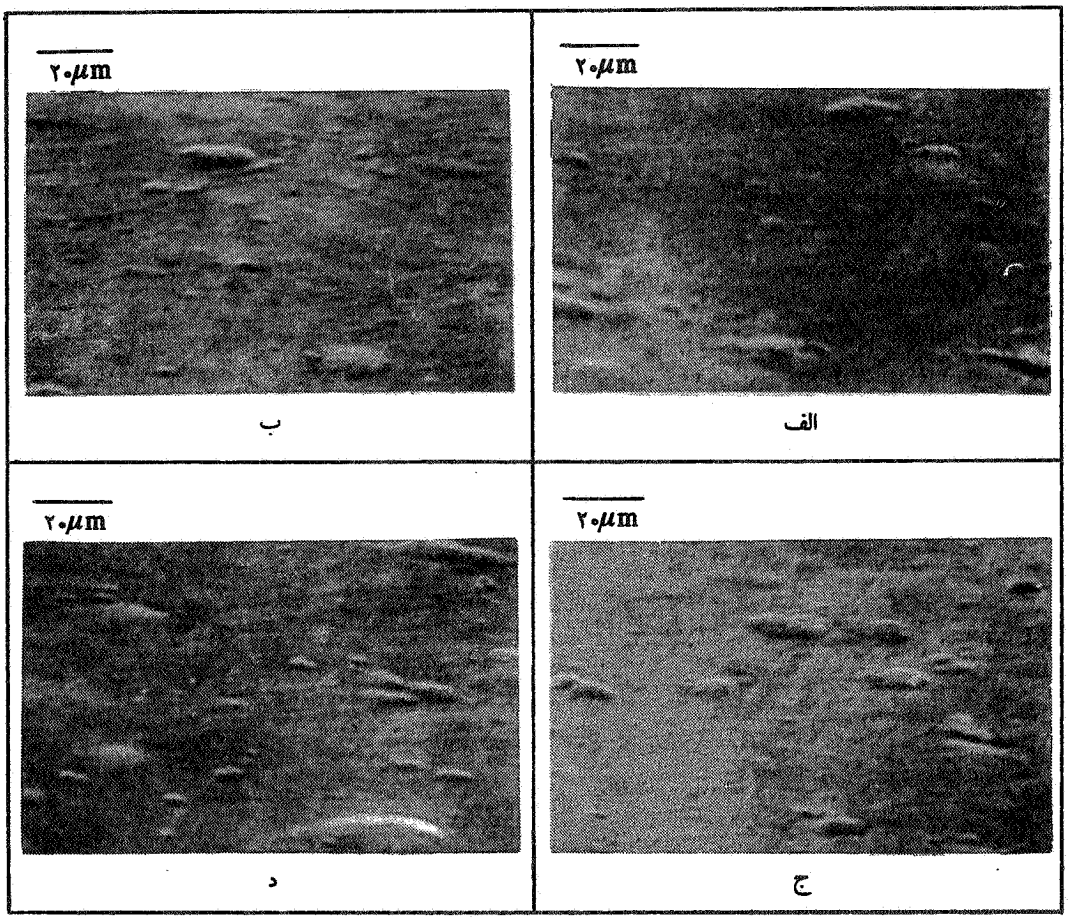
۵- نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر شرایط به‌هم زدن حمام بر ویژگیهای مختلف پوشش کامپوزیتی نیکل فسفر مولیبدن بررسی شده است. نتایج به‌دست آمده به‌شرح زیر خلاصه می‌شود:

۵-۱ - روش به‌هم زدن با هوا به‌عنوان بهترین روش در فرایند آبکاری پوشش کامپوزیتی نیکل، فسفر، مولیبدن به لحاظ کیفیت پوشش تشخیص داده شد.

۵-۲ - خطر تجمع ذرات سولفور مولیبدن در پوشش در حالتی که به‌هم زدن حمام به روش مغناطیسی باشد نسبت به روش دمیدن با گاز بیشتر است.

۵-۳ - در سرعتهای بالای به‌هم زدن با گاز ازت حمام الکترولس کامپوزیتی مواجه با ناپایداری می‌شود.



شکل ۱۰- تصاویر SEM پوشش کامپوزیتی الکترولس Ni-P-MoS_2 تحت سرعتهای بالای دمیدن ازت در حمام، زمان آبکاری ۴ ساعت

الف - ۲/۷۵ لیتر در دقیقه　　ب - ۳ لیتر در دقیقه

ج - ۳/۲۵ لیتر در دقیقه　　د - ۳/۵ لیتر در دقیقه

۵-۴ - در روش به‌هم زدن با هوا با سرعت ۲/۵ الی ۳ لیتر در دقیقه پوشش کامپوزیتی نیکل، فسفر، سولفور مولیبدن‌دارای بالاترین درصد سولفور مولیبدن بوده ضمن اینکه پوشش از نظر زبری، سختی و ضخامت نیز مطلوب خواهد بود.

۵-۵ - وجود جریانهای لایه‌ای و اغتشاشی حمام روی توپوگرافی سطح پوشش کامپوزیتی نیکل، فسفر، سولفور مولیبدن اثر می‌گذارد. این اثر در حالتی که حمام با گاز به‌هم زده شود نسبت به حالتی که با روش مغناطیسی به‌هم زده شود کاملا متقابل است.

واژه‌نامه

میکروسکوپ‌الکترونی‌روبشی:

scanning electron microscope (SEM)

مراجع :

1. Feldstein, N., " Electroless Composite Platings, " *Met. Fin.*, Vol. 35, pp. 81-88, 1983.
2. Ghouse, M., Viswanathan, M., and Ramachondran, E. G., " Electrodiposition of Nickel-Molybdenum Disulfide and Nickel-Tungsten Disulfide, " *Met.Fin.*, Vol. 4, pp. 48, 1980.
3. Xiam-Hua, Z., Jia-Jun, L., and Bao-Liang, Z., " The Tribological Performance of Ni/MoS_2 Composite Bruch Plating Layer in Vacuum," *Wear,* Vol. 157, pp. 381-387, 1992.
4. Monney, T., "Principles of Solution Agitation and Mixing, " *Met. Fin.*, Vol. 8, pp. 31-33, 1986.
5. Ramesh, C. S., Sechadri, S. K., and Layer, K. G. L., " Characteristics of Nickel-Flyash Electro-composite Coatings," *Plat. and Surf. Fin.*, Vol. 8, pp. 52-45, 1991.
6. Henry, J., *Electroless Composite Coatings, Guidebook and Directory,* pp. 367-382, 1990.
7. Henry, J., Electroless Nickel, " A Metallic Coating Used for Tooling Protection, " *AFS Transactions,* Vol. 89, pp. 723-726, 1989.
8. Ghouse, M., Viswanathan, M., and Ramachandram, E. G., "Firction and Wear :Characteristics of Electroposited Nickel-Graphite and Nickel-MoS_2 Composites," *Met. Fin.*, Vol. 8, pp. 57-63, 1980.