



بهبود جوشش استخری با ایجاد میکرو/نانوساختارهای متخلخل الکترونشست شده روی سطح مس

امیر میرزاقیطاقی¹، حمید صفاری^{2*}، جعفر صالحی شندی³

1- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- کارشناس، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 16844-13114، saffari@iust.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 10 شهریور 1394
پذیرش: 14 مهر 1394
ارائه در سایت: 30 آبان 1394

کلید واژگان:

جوشش هسته ای استخری
میکرو/نانوساختار
الکترونشست
سطح مس

چکیده

جوشش، روش انتقال حرارت مؤثر و کارآمدی است که در زندگی روزمره و صنعت کاربرد دارد. تغییر ساختار شیمیایی و فیزیکی سطح گرم مانند ایجاد تخلخل و بهبود ترشوندگی به منظور بهبود فرایند جوشش از موضوعات موردتوجه در دهه اخیر می باشد. در این مقاله، سطوح میکرو/نانوساختار متخلخل فلزی به منظور بهبود انتقال حرارت جوششی بر روی سطح فلز مس به روش الکترونشست یک و دو مرحله‌ای ساخته می‌شود. به منظور شناسایی ساختار، تصاویر در مقیاس‌های میکرو و نانو از سطح گرفته شده و خواص سطح مانند تخلخل و زبری اندازه‌گیری می‌شود. در مرحله بعد، تأثیر این ساختارها بر میزان بهبود انتقال حرارت جوششی به صورت آزمایشگاهی اندازه‌گیری شده و منحنی انتقال حرارت جوششی که شار حرارتی بر حسب سوپرهیت دیواره را نشان می‌دهد، برای سطوح دومرحله‌ای که از لحاظ مکانیکی پایدارتر هستند، با سیال آب استخراج می‌شود. مقایسه نتایج منحنی‌های جوشش سطوح بهبودیافته با سطح صاف و نتایج سایرین، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی را نشان می‌دهد. همچنین مقایسه تغییر زمان فرایند الکتروپوزیشن در ساختارهای حاصله نشان می‌دهد افزایش تخلخل و موینگی و استحکام در ساختار با زمان کمتر (30 ثانیه‌ای)، باعث بهبود بیشتر فرایند جوشش هسته‌ای می‌شود.

Pool boiling enhancement by electrodeposited porous micro/nanostructured on copper surface

Amir Mirza Gheitaghy¹, Hamid Saffari^{2*}, Jafar Salehi Shendi³

Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 16844-13114 Tehran, Iran, saffari@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 01 September 2015
Accepted 06 October 2015
Available Online 21 November 2015

Keywords:

Nucleate Pool Boiling
Micro/Nano Structure
Electrodeposition
Copper Surface

ABSTRACT

Boiling is a remarkably efficient heat transfer method and is commonly used in daily life and industrial applications. Changing the physical and chemical structure of hot surface in some methods such as producing porosity and improving wettability for boiling process enhancement has become an interesting topic in recent decades. In this paper, porous metal micro/nano structural surfaces are produced in order to augment boiling heat transfer on copper surface by the one- and two-stage electrodeposition method. The pictures in micro and nanoscale are captured to identify structure and surface characteristics as porosity and capillarity are estimated. Next, the effects of structures in enhancing the pool boiling are measured experimentally. Then, boiling heat transfer profiles that demonstrate heat flux versus wall superheat are derived for water fluid. Pool boiling curves of enhanced surfaces are compared with polished surface and results of other researchers to determine the efficiency improvement. Furthermore, comparison of the effect of electrodeposition process time on obtained structures shows higher porosity, capillary and strength of structure with lower process time (30 sec) leads to further enhancement of pool boiling.

1- مقدمه

فرایند پیچیده، صنعت‌گران به دنبال روش‌هایی برای بهبود این فرایند هستند. روش‌های زیادی برای بهبود فرایند جوشش پیشنهاد شده است که در تقسیم‌بندی کلی می‌توان به روش‌های فعال، غیرفعال و ترکیبی اشاره کرد. از روش‌های فعال که نیازمند انرژی خارجی می‌باشد می‌توان به ایجاد میدان‌های الکتریکی و آکوستیکی و یا ارتعاش سطح اشاره نمود. دستیابی به اغلب روش‌های فعال در خارج از محیط آزمایشگاه مشکل می‌باشد و یا توجیه اقتصادی

مسأله بحران انرژی و افزایش بازدهی انتقال حرارت، کوچک‌سازی تجهیزات و خنک‌کاری بهینه تجهیزات الکترونیکی، افزایش ایمنی و بهبود توان نیروگاه‌های هسته‌ای، افزایش بازدهی بویلرها و مبدل‌ها موجب توجه بیشتر صنایع به بحث بهبود انتقال حرارت با تغییر از فاز مایع به بخار، خصوصاً به صورت جوشش شده است. با وجود عدم شناخت کامل پارامترهای تأثیرگذار و نقش هر یک در این

Please cite this article using:

A. Mirza Gheitaghy, H. Saffari, J. Salehi Shendi, Pool boiling enhancement by electrodeposited porous micro/nanostructured on copper surface, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 12, pp. 159-167, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

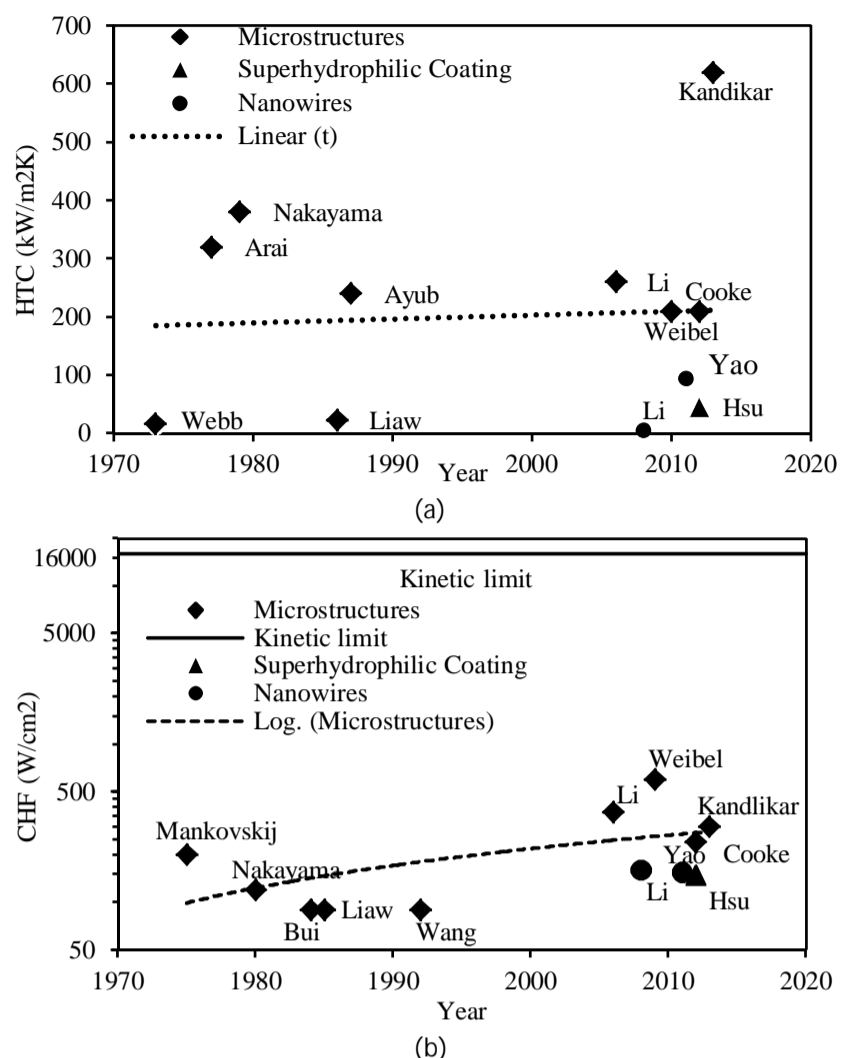


Fig. 1 Enhancement level of (a) heat transfer coefficient in $\Delta T=5K$ and (b) critical heat flux with micro/nanotechnology for pool boiling of water on copper surface [6].

شکل 1 میزان بهبود (a) ضریب انتقال حرارت در $\Delta T=5K$ و (b) شار حرارتی بحرانی با استفاده از میکرو و نانوتکنولوژی سطوح در فرایند جوشش استخری آب روی سطح مسی [6].

ساختار متخلخل سطحی مطلوب برای بهبود انتقال حرارت جوششی دارای حفره‌های باز و مرتبط، خاصیت تامین نیروی موئینگی با حفره‌های کوچک، ایجاد نفوذپذیری کافی سیال با حفره‌های بزرگ، عدم واکنش شیمیایی و فیزیکی ساختار با سیال عامل، استحکام مکانیکی کافی، پایداری و عدم تغییر خواص در دماهای بالا، هیستریزیس جوششی کم در کارکردهای متناوب و طولانی، رسانش حرارتی بالای ماده ساختار با ضخامت بهینه، اتصال مناسب ساختار متخلخل با سطح زیرلایه با کمترین مقاومت حرارتی می‌باشد. همچنین کاهش هزینه و زمان تولید، سادگی فرایند، قابلیت تکرارپذیری و کنترل پذیری، قابلیت تولید انبوه، استفاده از ابزارهای موجود و در دسترس ساخت از مواردی است که بایستی در انتخاب نحوه ساخت ساختار متخلخل مطلوب در نظر گرفت.

روش‌های زیادی برای ساخت سطوح متخلخل به منظور بهبود انتقال حرارت جوششی پیشنهاد شده است [11]. از متداول‌ترین این روش‌ها می‌توان به تف‌جوشی پودر، الکترونشست، فوم، آندایز، لیتوگرافی و روش‌های ابداعی دیگر اشاره کرد. فرایند الکترونشست علاوه بر زمان و هزینه کم، دارای قابلیت کنترل پارامترها و تکرارپذیری مطلوبی می‌باشد که با استقبال محققان روبرو شده است. البته نگهداری، انجام عملیات و دفن مواد شیمیایی این فرایند نیازمند تجربه کافی است. بلیس و همکارانش [12] الکترونشست لایه‌ای نازک از عناصر مس، نیکل، قلع، کادمیوم و کروم روی لوله به قطر 1 اینچ را برای بهبود جوشش هسته‌ای آب آزمایش کردند. نشست لایه 127 میکرومتری از میکروحفره‌ی مس، کروم و کادمیوم تا سه برابر انتقال حرارت جوشش هسته‌ای آب را بالا می‌برد. آندرسون و مدور [13] با آبرکاری در چگالی جریان 100 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به مدت تنها بیست ثانیه، ساختاری دندان-ای و برآمده از مس نشست کرده ساختند که جوشش هسته‌ای R-12 را بهبود

ندارد. از روش‌های غیرفعال می‌توان به اضافه نمودن افزودنی‌ها به سیال مانند نانوذرات یا سیالات دیگر و یا بهبود خواص هندسی، فیزیکی و شیمیایی سطح اشاره نمود. شاید بتوان مهمترین پیشرفت در زمینه بهبود فرایند جوشش را مربوط به ساخت سطوح منتقل‌کننده گرما با مشخصه‌های هندسی خاص دانست. در روش ترکیبی از هر دو روش غیرفعال و فعال به منظور افزایش بیشتر بازدهی استفاده می‌گردد.

مفهوم مهندسی سطوح برای دستیابی به کارایی بالاتر در فرایند جوشش به سال 1391 برمی‌گردد [1]. مطالعات اساسی با شناخت منحنی جوشش شروع شد [2]. در دهه 1960 روش‌های سنتز مواد امکان ساخت دقیقتر هندسه‌های بهبوددهنده را فراهم کرد و تعداد ثبت اختراعات افزایش یافت [3]. وب تکامل تاریخی سطوح بهبود یافته را برای جوشش با جزئیات کامل مرور کرد [4] و پیشرفت‌های اخیر توسط برگلس و منگلیک مرور شد [5]. ساخت سطوح بر اساس تئوری‌هایی که در بهبود فرایند جوشش وجود دارد، انجام شده و به صورت تجربی مورد بررسی قرار می‌گیرند. شکل 1 نشان می‌دهد که در فرایند متداول جوشش آب بر روی سطح مسی، ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی به ترتیب 2 تا 3 برابر در طی 40 سال اخیر افزایش یافته‌اند. اگرچه این پیشرفت‌ها مطلوب هستند، اما در طی همین مدت، عملکرد تکنولوژی‌های دیگری همچون محاسباتی یا چگالی ذخیره انرژی در باتری‌ها در حد چند مرتبه ارتقا یافته است. همچنین، تئوری‌های نظری میزان دستیابی به نهایت محدودیت‌ها را خیلی بیشتر دانسته‌اند. به عنوان مثال با استفاده از حد جنبشی حاصل از تئوری جنبشی می‌توان شار گرمای بیشینه را تخمین زد. این حد زمانی است که همه مولکول‌ها با سرعت صوت از سطح مشترک مایع-بخار ساطع شوند. برای آب در فشار اتمسفری، حد جنبشی $16000 Wcm^{-2}$ می‌باشد. خط فاصله‌ها نشان‌دهنده پیشرفت تدریجی شار حرارتی بحرانی است که همواره پایین‌تر از حد ترمودینامیکی آن بوده است. در این زمینه، مرور فرایندهای پایه حاکم بر انتقال حرارت تغییر فاز و یافتن راهکارهای نو در مهندسی سطوح برای بهبود فرایندها با این هدف نهایی که راندمان حاصله به حد نظری آن نزدیک‌تر شود، مورد توجه است [6].

بر اساس مرور مطالعات آزمایشگاهی اخیر، مشخصات تأثیرگذار سطح در فرایند جوشش به ترتیب پارامترهای تخلخل، ترشوندگی و زبری می‌باشد که سطح متخلخل آب دوست بیشترین تأثیر را بر روی بهبود شار حرارتی بحرانی داشته است و سطح آب گریز باعث بهبود هسته زایی در شارهای حرارتی کم می‌شود [7]. اما هنوز مطالعات در خصوص تأثیر این پارامترها بر روی یکدیگر و همچنین روابط حاکم بین این پارامترها و مشخصات فرایند تغییر فاز مانند ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بر حسب سوپرهیت سیال ادامه دارد. به عنوان نمونه، احمدی و همکارانش [8] تأثیر ترشوندگی سطح و سلیمانی و همکارانش [9] تأثیر زبری را بر فرایند جوشش جریانی به صورت آزمایشگاهی بررسی نمودند. همچنین ملک پور و همکارانش [10] تأثیر غلظت و جنس نانوسیال بر جوشش استخری را مورد بررسی قرار دادند. در این میان، تحقیقات بر روی بهبود فرایند جوشش با استفاده از سطوح متخلخل با توجه به گستردگی خواص، در مرز دانش قرار دارد. ساختار متخلخل با افزایش مساحت تبادل حرارت، افزایش هسته‌های فعال حباب زایی، افزایش موئینگی و سیال‌رسانی به سطح، ایجاد جت خروجی در فرار حباب و ... می‌تواند باعث بهبود فرایند جوشش گردد.

سطوح متخلخل دارای تنوع ساختاری زیادی بوده و تمامی آن‌ها باعث بهبود فرایندهای انتقال حرارت نمی‌گردد.

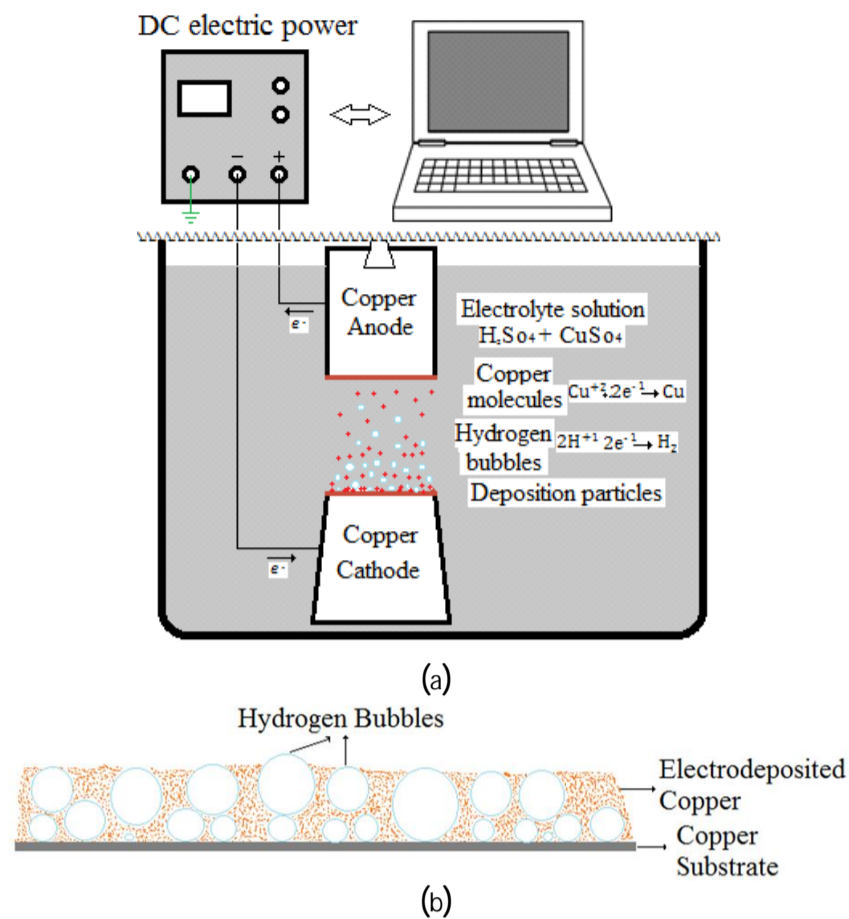


Fig. 2 a) Schematic of electrode position setup b) Schematic of electrodeposited copper

شکل 2 (a) شماتیک ستاپ انجام فرایند الکترونشست (b) ساختار شماتیک مس الکترونشست کرده



اتم‌های مس در سطح کاتد به سرعت تشکیل شده و به صورت دندان‌های ریز و فشرده در حفره‌های دایروی رشد می‌نمایند. مولکول‌های هیدروژن در کاتد به صورت حباب‌های ریز تشکیل شده و پس از اتصال به یکدیگر، جریانی از حباب‌های بزرگ ایجاد می‌شود. ستون‌های بالارونده حباب، تعیین‌کننده اندازه و الگوی ایجاد میکروحفره‌ها می‌باشد. میکروساختار نشانده شده اولیه با تخلخل بالا، ظریف و شکننده می‌باشد. به منظور استحکام می‌توان از دو روش: الف) ادامه فرایند با جریان کمتر و زمان زیاد یا ب) آنیل کاری یعنی قراردادن نمونه در کوره خلاء استفاده نمود. نشست اتم‌های مس در روش اول، مورفولوژی سطح را تغییر داده و با پر نمودن حفره‌ها، میزان تخلخل کاهش می‌یابد اما مساحت ترشونده سطح افزایش می‌یابد. به دلیل جریان کم، حباب‌های هیدروژن کمتری تشکیل شده و تأثیر ناچیزی بر ساختار حفره‌ها دارد. چسبندگی لایه سطحی میکرومتخلخل به زیرلایه مس، مطلوب بوده و طی فرایند جوشش از سطح جدا نمی‌شود.

روش الکترونشست راه مناسبی برای تهیه ساختارهای متخلخل و باز می‌باشد زیرا در این روش کنترل تعداد، اندازه و توزیع سوراخ‌های انتخابی تحت شرایط مناسب لایه‌نشانی آسان‌تر است. عوامل موثر در ساختار سطح عبارتند از نحوه آماده‌سازی الکتروود مورد استفاده، تمرکز یون‌های مس و اسید سولفوریک، دمای محلول در حین الکترولیز، مدت زمان الکترولیز و جریان بر واحد سطح در فرایند. اندازه‌ی حفره‌ها، به سبب رشد حباب‌های هیدروژن و همچنین به سبب به هم پیوستگی حباب‌های هیدروژن همسایه، با گذر زمان الکترولیز بیشتر می‌شود. در فرایند رشد، به سبب توزیع چگالی جریان، تعدادی از حباب‌های هیدروژن می‌توانند در درون رسوب در بند مانده و ساختاری لانه زنبوری شکل با تخلخل بالا بسازند [18].

2-1-2- مراحل ساخت سطوح متخلخل

پیش از انجام فرایند الکتروشیمیایی لایه نشانی، سطح مس توسط روش‌های

می‌داد. نشست مشابهی از ساختارهای نانودندریتی مس با استفاده از چگالی جریان 3 آمپر بر سانتی‌متر مربع با مدت زمان‌های متفاوت ایجاد شد. پتانسیل بالای الکتروود و غلظت بالای هیدروژن در الکترولیت، باعث به وجود آمدن حباب‌های هیدروژنی روی سطح کاتد در طی عملیات نشست می‌شود. کیم عملیات الکتروشیمیایی نشست مس را با چگالی جریان (0.33 تا 1.2 آمپر بر سانتی‌متر مربع) برای بهبود بخشیدن جوشش استخری FC-72 انجام داد [14]. پاتیل و همکارانش روش الکترونشست دومرحله‌ای را برای بهبود فرایند جوشش توسعه دادند و مرحله اول الکترونشست را طی 15 ثانیه انجام دادند [15]. ال-جنک و علی نیز لایه متخلخل در ضخامت‌های مختلف بر روی سطح مس به روش الکترونشست نشانده و تأثیر آن را بر جوشش PF-5060 در زوایای مختلف سطح بررسی نمودند [16]. برای بررسی تأثیر زمان عملیات نشست، غلظت الکترولیت و افزودنی‌های الکترولیت بر روی ریخت‌ساختار نشست شده آزمایش‌هایی صورت گرفته است [17]. نتایج نشان می‌دهد که زمان عملیات نشست و چگالی جریان بیشترین تأثیر را بر روی چگالی و اندازه حفره‌های میکروساختار نشست شده داشتند. در مجموع، تأثیر پارامترهای مختلف فرایند الکترولیت مانند غلظت محلول، زمان، جریان، دما و افزودنی‌ها بر پارامترهای موثر فرایند جوشش مانند ضخامت لایه، قطر و شکل حفره و مویبندی هنوز به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. همچنین پایداری مکانیکی سطح از اشکالات عمده می‌باشد که دو مرحله ای نمودن فرایند در این مقاله، راه‌حلی برای بهبود استحکام می‌باشد.

هدف این مقاله، توسعه روش الکترونشست برای ساخت سطح متخلخل به منظور بهبود فرایند جوشش استخری می‌باشد. فرایند نشست مس در محلول الکترولیت بر روی سطح مس توسط جریان مستقیم آمپر بالا، در چهار نمونه طی یک و دو مرحله در دو زمان مختلف ایجاد می‌شود. سپس تصاویر با میکروسکوپ الکترونی روبشی¹ از سطح گرفته شده و پارامتر تخلخل محاسبه و پارامتر زبری، اندازه گرفته شده است. در انتها، آزمایش جوشش اشباع استخری بر روی این سطوح انجام شده و میزان بهبود منحنی جوشش نسبت به سطح ساده مسی بررسی می‌شود.

2- روش ساخت و انجام آزمون

1-2- ساخت نمونه‌های سطح

1-1-2- روش الکترونشست

انباشت الکتروشیمیایی روشی ساده برای تولید میکرو/نانوساختارهای متخلخل است که شامل فرایند الکتروشیمیایی کاهش یون در کاتد توسط عبور جریان مستقیم از طریق محلول (گالوانواستاتیک) یا نگهداری زیرلایه (کاتد) در پتانسیلی که کاهش اتفاق می‌افتد (پتانسیواستاتیک)، می‌باشد. همان‌گونه که در شکل 2 مشاهده می‌شود، سطح مسی موردنظر به عنوان کاتد و فلزی دیگر با قابلیت اکسیدشوندگی به عنوان آند، به طور کامل در محلول الکترولیت شامل نمک فلزی (سولفات مس) حل شونده در آب و اسید سولفوریک، به فاصله چند سانتی‌متر مستغرق می‌شوند. فرایند می‌تواند با گذر جریان ثابت از محلول یا با نگهداری ماده الکتروود آند در پتانسیل ثابت انجام شود. در حالت گالوانواستاتیک که در این تحقیق استفاده می‌شود، کاتد و آند به منبع جریان مستقیم وصل می‌شوند تا چگالی جریان قابل تنظیم باشد و زمان فرایند مشاهده شود. زمانی که جریان الکترولیت در سلول الکتروشیمیایی برقرار شود، یون‌های H^{+} و Cu^{2+} در محلول الکترولیت تحت دو واکنش کاهش همزمان در کاتد به صورت زیر قرار می‌گیرند:

1- Scanning Electron Microscope (SEM)



Fig. 3 Electrode position equipments

شکل 3 تصویر تجهیزات فرایند الکترونشست

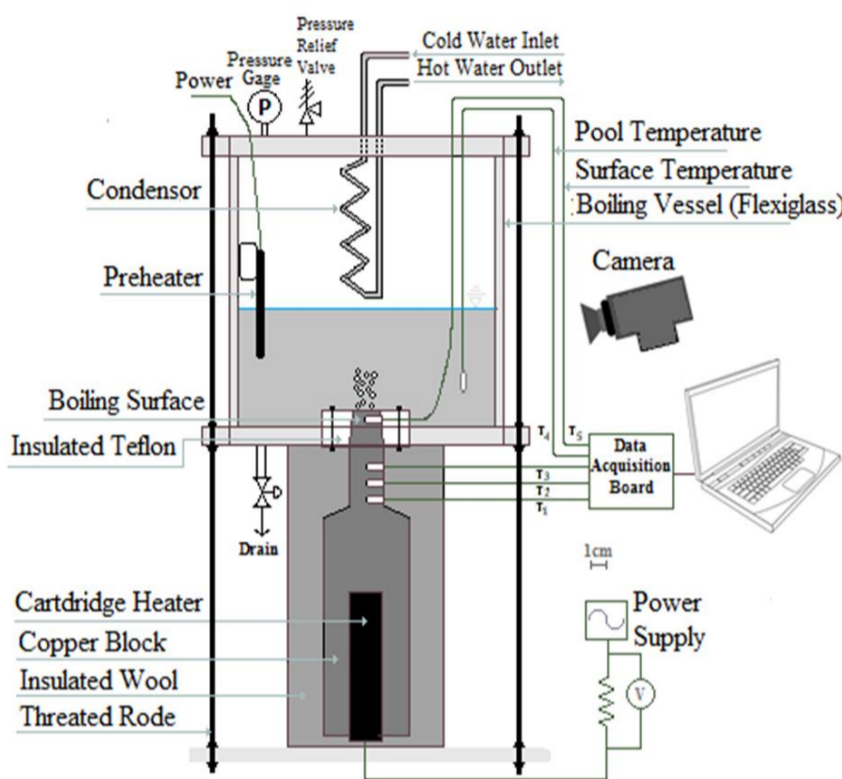


Fig. 4 Schematic of pool boiling test setup

شکل 4 شماتیک دستگاه آزمون جوشش استخری

جاگذاری توسط حالت مخروطی پایه سطح در تفلون عایق انجام می‌شود. شار حرارتی گذرا از سطح توسط هیتر فشنگی قرار داده شده در بلوک مسی زیر سطح، ایجاد می‌شود. تامین توان هیتر توسط منبع تغذیه جریان متناوب تامین و کنترل می‌شود. با تنظیم منبع تغذیه و پس از رسیدن دمای سطح به حدود 80 درجه، سیال عامل آب پیش‌گرم شده تا ارتفاع حدود 10 سانتی‌متر داخل محفظه ریخته می‌شود. گرمکن داخل محفظه نیز به منظور جبران تلفات به بیرون و رساندن مجموعه به حالت اشباع، در طول آزمون روشن می‌باشد. فشار محفظه افزایش می‌یابد و گازهای غیرقابل چگالش از طریق شیر تخلیه، خارج می‌شود. فرایند ادامه می‌یابد تا زمانی که بازرسی چشمی تایید نماید که فقط بخار سیال وجود دارد. شیر کندانسور به آرامی باز می‌شود تا زمانی که فشار محفظه به یک اتمسفر برسد. ولتاژ منبع تغذیه گرمکن‌ها با پله 10 ولتی زیاد می‌شود تا زمانی که شروع هسته‌زایی مشاهده شود. این افزایش تدریجی به منظور ایجاد شرایط نیمه‌پایا در سیستم انجام می‌شود. پس از رسیدن به حالت نیمه‌پایا (تغییرات دمای سیلندر مسی در حد یک درجه باشد و این شرایط برای حداقل ده دقیقه ادامه داشته باشد)، داده‌های دمایی پنج ترموکوپل نوع K توسط نرم‌افزار لیب‌ویو¹ جمع‌آوری می‌شوند. یک ترموکوپل در فاصله 5 میلی‌متر زیر سطح قرار داده شده است تا دمای سطح از روی آن برون‌یابی شود. سه عدد ترموکوپل در بلوک مسی جایگذاری شده است تا از روی آن‌ها شار حرارتی گذرا از سطح تقریب زده شود. یک ترموکوپل هم داخل سیال قرار داده می‌شود

1- LabView

پایدارسازی آماده می‌شود. آماده سازی و تمیزکاری سطح کاتد و آند برای دستیابی به چسبندگی بالا و یکنواختی لایه‌ی نشانده شده با قابلیت تکرارپذیری فرایند، ضروری می‌باشد. ابتدا سطح ماشین‌کاری شده مس با سمباده 400 دانه صاف می‌شود تا زبری‌های بزرگ روی سطح از بین برود. سپس با سمباده 1500 دانه زبری‌های کوچک از بین برده می‌شود. سطح مس، برس زده شده و پولیش می‌شود و سپس با دستمال کتان آغشته آب و الکل شسته می‌شود تا سطحی یکنواخت به دست آید. در انتها قطعه را داخل اسید هیدروکلریک رقیق قرار داده تا لایه غیرفلزی و ارگانیک روی سطح برداشته شود.

شکل 3 تصویر تجهیزات مربوط به انجام فرایند الکترونشست را نشان می‌دهد. در این فرایند، آند و کاتد به موازات هم داخل محلول قرار می‌گیرند و سطح آند را بزرگتر از کاتد و هر دو به صورت دایروی انتخاب می‌شود تا تقارن حفظ شود. بزرگتری سطح آند باعث می‌شود جریان به صورت یکنواخت در محلول به کاتد برسد و لایه‌نشانی یکنواخت باشد. دو قسمت آند و کاتد به صورت کامل در محلول الکترولیت با فاصله 3 سانتی‌متر غوطه‌ور شده و به منبع تغذیه متصل شده‌اند. برای ایجاد جریان و برقراری مدار الکترولیز از منبع تغذیه جریان مستقیم با محدوده ولتاژ 0-30 ولت با دقت 0.01 ولت و محدوده جریان 0-5 آمپر با دقت 0.01 آمپر استفاده می‌شود. برای کالیبره کردن منبع تغذیه از مولتی‌متر با دقت 1 میلی‌آمپر استفاده می‌شود. برای لایه‌نشانی دقیق‌تر، سطح‌های اضافی با پوشش عایق و ضدآب پوشانده شده تا لایه‌نشانی و لایه‌برداری فقط در نواحی مطلوب انجام شود. مشخصات غلظت سولفات مس در محلول به گونه‌ای انتخاب شده است که میزان لایه نشانی مس تحت محدودیت میزان یون‌های مس در محلول نباشد (0.4 مولار سولفات مس در 1.5 مولار اسید سولفوریک).

در مرحله اول فرایند الکترولیز، ساختار پایه در لایه‌های متخلخل شکل می‌گیرند که در نمونه‌های اول و دوم با زمان 30 ثانیه و نمونه‌های سوم و چهارم با زمان 100 ثانیه لایه نشانی شده‌اند. در هر چهار نمونه از چگالی جریان 600 میلی‌آمپر بر سانتی‌مترمربع استفاده شده است. در مرحله دوم لایه نشانی که در نمونه‌های دوم و چهارم استفاده شد، لایه نشانی نمونه‌ها با جریان 60 و زمان 2500 ثانیه ادامه یافت. با انجام مرحله دوم، پایدارسازی سطح افزایش یافته و همچنین نانودندانه‌ها بر روی سطح شکل می‌گیرند. در جدول 1 پارامترهای ساخت سطوح خلاصه گردیده است.

2-2- آزمون جوشش

2-2-1- روال انجام آزمون جوشش در دستگاه

آزمون جوشش در دستگاه نشان داده شده در شکل 4، که قابلیت جایگذاری سطح صاف را دارد، انجام می‌پذیرد. دستگاه ساخته شده و نحوه انجام آزمون به طور مختصر در ذیل بیان می‌گردد. محفظه آزمون به صورت مکعبی به ضلع 15 سانتی‌متر از جنس پلکسی می‌باشد که سطح جوششی به شکل دایره با قطر 22 میلی‌متر در آن جا زده می‌شود.

جدول 1 پارامترهای زمان و جریان در ساخت نمونه‌ها

Table 1 Time and current parameters in fabrication of samples

شماره نمونه	جریان اولیه (mA/cm ²)	مدت زمان (s)	جریان ثانویه (mA/cm ²)	مدت زمان (s)
اول	600	30	-	-
دوم	600	30	60	2500
سوم	600	100	-	-
چهارم	600	100	60	2500

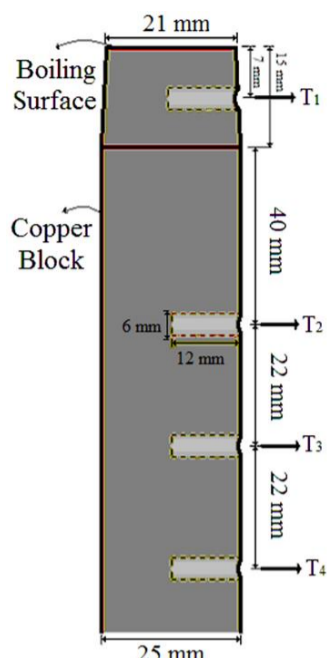


Fig. 5 Dimension of copper block and boiling surface

شکل 5 ابعاد بلوک مسی و سطح جوشش

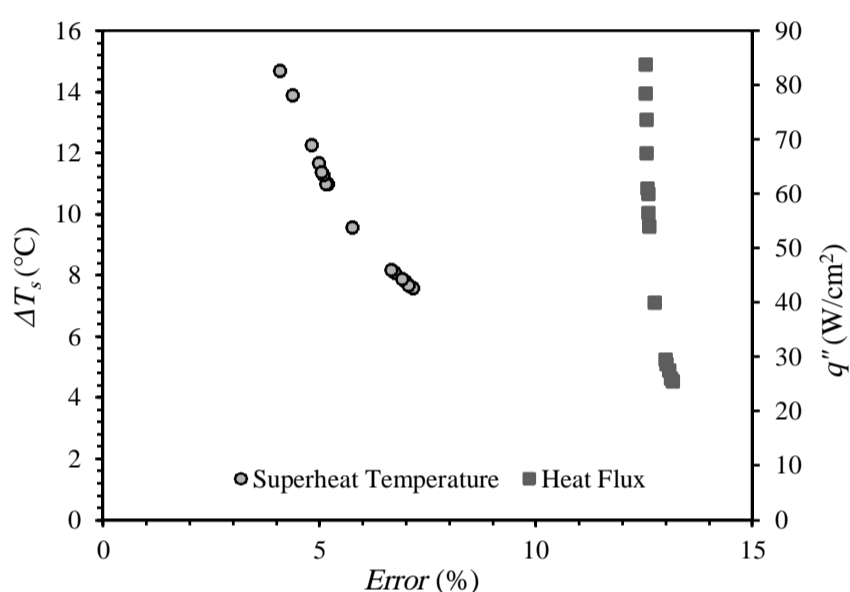


Fig. 6 Variation of uncertainty versus temperature and heat flux

شکل 6 تغییرات عدم قطعیت بر حسب دمای سوپرهیت و شار حرارتی

برای محاسبه واریانس گرادیان دما با استفاده از پارامترهای برازش شده، از معادله (8) استفاده می‌شود.

$$\sigma_a^2 = \frac{1}{\Delta} \sum \frac{z_i^2}{\sigma_{T_i}^2}, \sigma_b^2 = \frac{1}{\Delta} \sum \frac{1}{\sigma_{T_i}^2} \quad (8)$$

سطح جوشش همان‌طور که در شکل 4 نشان داده شده است، سطح بالای یک مخروط ناقص است لذا برای محاسبه دمای سطح جوشش با فرضیات عدم انتقال حرارت شعاعی، عدم تغییرات خواص ترموفیزیکی، عدم تولید حرارت داخلی در شرایط پایا از معادله (9) استفاده می‌شود:

$$T_s = T_1 - \frac{4q_z}{\pi r^2 k h} \quad (9)$$

و عدم قطعیت دمای سطح از رابطه (10) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{T_s} = \left((\sigma_{T_1})^2 + \left(\frac{4\sigma_{q_z}}{\pi r^2 k} \left(\frac{1}{h} \right) \right)^2 + \left(\frac{4q_z \sigma_h}{\pi r^2 k} \left(\frac{1}{h^2} \right) \right)^2 \right)^{.5} \quad (10)$$

مقدار عدم قطعیت شار و دمای سوپرهیت برای سطح پولیش در شکل 6 براساس روابط فوق نشان داده شده است. حداکثر خطا در انتقال حرارت کمتر و به مقدار 13.5% درصد در شار حرارتی و 8% در دمای سوپرهیت می‌باشد.

3- نتایج

3-1- بررسی ساختار سطوح متخلخل

3-1-1- تصاویر میکروسکوپ الکترونی

در شکل 7، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی در بزرگنمایی‌های مختلف از ساختارهای متخلخل دومرحله‌ای (نمونه دوم و چهارم) نشان داده شده است.

تا دمای اشباع آب را اندازه‌گیری کند. برای رسیدن به نقاط بعدی آزمایش، ولتاژ گرمکن به صورت پلکانی افزایش می‌یابد. این افزایش تا نزدیکی رسیدن به شار حرارتی بحرانی ادامه می‌یابد. در این لحظه ولتاژ کاهش داده می‌شود تا به دستگاه آسیبی وارد نشود.

2-2-2- اندازه‌گیری دما و عدم قطعیت داده‌ها

شار حرارتی عبوری از میله مسی و سطح آزمون که در شکل 5 نشان داده شده است، توسط قانون فوریه پیش‌بینی می‌شود. به واسطه وجود پشم‌شیشه در اطراف میله مسی، می‌توان انتقال حرارت در این میله را به صورت یک بعدی با معادله (2) در نظر گرفت:

$$q_z'' = -k \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

در یک شار حرارتی ثابت و ضریب هدایت ثابت، گرادیان دما به صورت خطی در می‌آید. در این دستگاه سه ترموکوپل در میله مسی قرار گرفته تا با استفاده از آن شار حرارتی محاسبه شود. در اینجا اگر دما بر حسب فاصله نوشته شود، معادله (3) را می‌توان نوشت:

$$T = a + bz \quad (3)$$

گرادیان دما به روش حداقل مربعات و برازش خط راست، به صورت معادلات (4) محاسبه می‌شود [19]:

$$a = \frac{1}{\Delta} \left(\sum \frac{z_i^2}{\sigma_{T_i}^2} \sum \frac{T_i}{\sigma_{T_i}^2} - \sum \frac{z_i}{\sigma_{T_i}^2} \sum \frac{z_i T_i}{\sigma_{T_i}^2} \right) \quad (a-4)$$

$$b = \frac{1}{\Delta} \left(\sum \frac{1}{\sigma_{T_i}^2} \sum \frac{z_i T_i}{\sigma_{T_i}^2} - \sum \frac{z_i}{\sigma_{T_i}^2} \sum \frac{T_i}{\sigma_{T_i}^2} \right) \quad (b-4)$$

$$\Delta = \sum \frac{1}{\sigma_{T_i}^2} \sum \frac{z_i^2}{\sigma_{T_i}^2} - \left(\sum \frac{z_i}{\sigma_{T_i}^2} \right)^2 \quad (c-4)$$

با توجه به معادلات فوق، برای محاسبه شار حرارتی مطابق معادله (5) باید ضریب معادله برازش شده را در مساحت تبدیل شده سطح مخروطی و ضریب هدایت گرمایی ضرب کرد:

$$q'' = k \times b \times \frac{A_1}{A} \quad (5)$$

برای تخمین انحراف استاندارد 1σ در شار حرارتی و دمای دیواره محاسبه شده، عدم قطعیت‌های دمای اندازه‌گیری شده با استفاده از معادله (6) انتشار می‌یابند:

$$\sigma_x^2 \cong \sigma_u^2 \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left(\frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \dots \quad (6)$$

این عدم قطعیت‌ها دلایل مختلفی مانند موارد ذیل دارد:

- کالیبراسیون ترموکوپل‌ها (با توجه به محدوده دمایی تا 0.1 درجه)
- عدم اتصال صحیح ترموکوپل‌ها به بدنه (با توجه روند آزمایش این مسأله برطرف شده است)
- خطای خطی‌سازی و برازش منحنی‌ها (قابل محاسبه است)
- دقت فاصله بین ترموکوپل‌ها (در حد یک دهم میلی‌متر است)
- کالیبراسیون مبدل سیگنال‌ها (با توجه به دقت ترموکوپل‌ها قابل صرف نظر کردن است)
- وجود نویز در محیط (با توجه گراند بودن ترموکوپل‌ها، این مسأله برطرف شده است)
- نزدیک بودن سیم ترموکوپل‌ها و اتصال روکش آنها به یکدیگر (باعث نویز می‌شود، باید از این مسأله جلوگیری کرد)

با توجه به معادله (5) برای شار حرارتی و اعمال معادله (6)، عدم قطعیت شار حرارتی از معادله (7) محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{q''} = \left(\left(k \times \frac{A_1}{A_2} \times \sigma_b \right)^2 + \left(k \times b \times \frac{1}{A_2} \times \sigma_{A_1} \right)^2 + \left(k \times b \times A_1 \times \frac{-1}{A^2} \times \sigma_{A_2} \right)^2 \right)^{.5} \quad (7)$$

جدول 2 جرم فلز لایه نشانی و ضخامت نمونه‌ها

نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم	
21	191	68	240	جرم لایه‌نشانی (mgr)
6	61	22	77	ضخامت با فرض عدم تخلخل (μm)

بخشی از تصویر سطح در هر مرحله بزرگتر شده است تا درک بهتری از میکرو/نانوساختارهای سطحی ایجاد شده روی سطح طی فرایند الکترونشست حاصل شود. مشخصات مربوط به هر تصویر شامل میزان بزرگنمایی و ابعاد واقعی تصویر و بزرگنمایی آن، در ذیل تصویر توسط دستگاه تصویربرداری ذکر شده است. به دلیل استحکام مکانیکی کم ساختارهای یک مرحله‌ای، از آن‌ها در آزمون جوشش استفاده نمی‌شود. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نشست ذرات مس خالص بر روی سطح باعث تشکیل ساختارهای متخلخل شبکه‌ای با متوسط قطر حفره حدود 100 میکرومتر شده است. شبکه سطوح به صورت لانه زنبوری و تقریباً یکنواخت می‌باشد به جز حفره‌های دهانه بازی که در اثر چسبیدن حباب هیدروژن به سطح طی فرایند ایجاد گردیده است. در نمونه چهارم به دلیل افزایش زمان فرایند، محدوده اطراف یک حفره به صورت کامل تشکیل شده است ولی در نمونه دوم، حفره‌ها به یکدیگر راه دارند و سیال می‌تواند به راحتی در آن جابجا شود. این حفره‌ها خصوصاً اگر به صورت دهانه باریک باشند، تأثیر زیادی در افزایش نقاط هسته‌زایی حباب و هسته‌زایی در دماهای سوپرهیت کمتر دارند. همچنین پیش‌بینی می‌شود با افزایش مساحت سطح و ایجاد ساختار موئین، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی و شار حرارتی بحرانی شوند. نانوساختارهای سطح در نمونه چهارم بیشتر مشهود می‌باشند اما سطح دوم در مقیاس نانو، ساختارهای هموارتری دارد.

3-1-2- جرم الکترونشست شده بر روی سطح

بر اساس قانون فارادی الکترولیز، مقدار فلز نشست نموده متناسب با زمان و جریان فرایند می‌باشد [20]. برای چهار نمونه لایه‌نشانی شده با توجه به جریان و مدت زمان فرایند الکترولیز، با استفاده از معادله (11) جرم فلز نشانداده تعیین می‌گردد:

$$M = \frac{ItA}{ZF} \quad (11)$$

و همچنین، مقدار ضخامت لایه از روی جرم الکترونشست شده و چگالی طبق رابطه (12) به دست می‌آید:

$$h = \frac{M}{s\rho} \quad (12)$$

بر اساس معادلات فوق جرم فلز لایه‌نشانی شده و ضخامت آن‌ها بر روی نمونه‌ها در صورت عدم وجود تخلخل بر مبنای چگالی، با فرض ثوابت جرم مولی مس 63.5 gr/mole، ثابت فارادی 96485 coulombs/mole و 2 عدد الکترون شرکت‌کننده در واکنش کاهش، در جدول 2 محاسبه شده است.

3-1-3- تخلخل سطوح

تخلخل یا نسبت پوکی معیاری از میزان فضای خالی نسبت به کل حجم ماده است و با تقسیم حجم فضای خالی بر حجم کل بدست می‌آید. مقدار تخلخل همواره بین 0-1 و یا به صورت درصدی 0-100% می‌باشد. معادله (13) نحوه محاسبه تخلخل را نشان می‌دهد:

جدول 3 مقدار تقریبی تخلخل نمونه‌ها و ضخامت واقعی

نمونه اول	نمونه دوم	نمونه سوم	نمونه چهارم	
83	64	70	58	تخلخل (%)
35	169	73	183	ضخامت واقعی لایه متخلخل (μm)

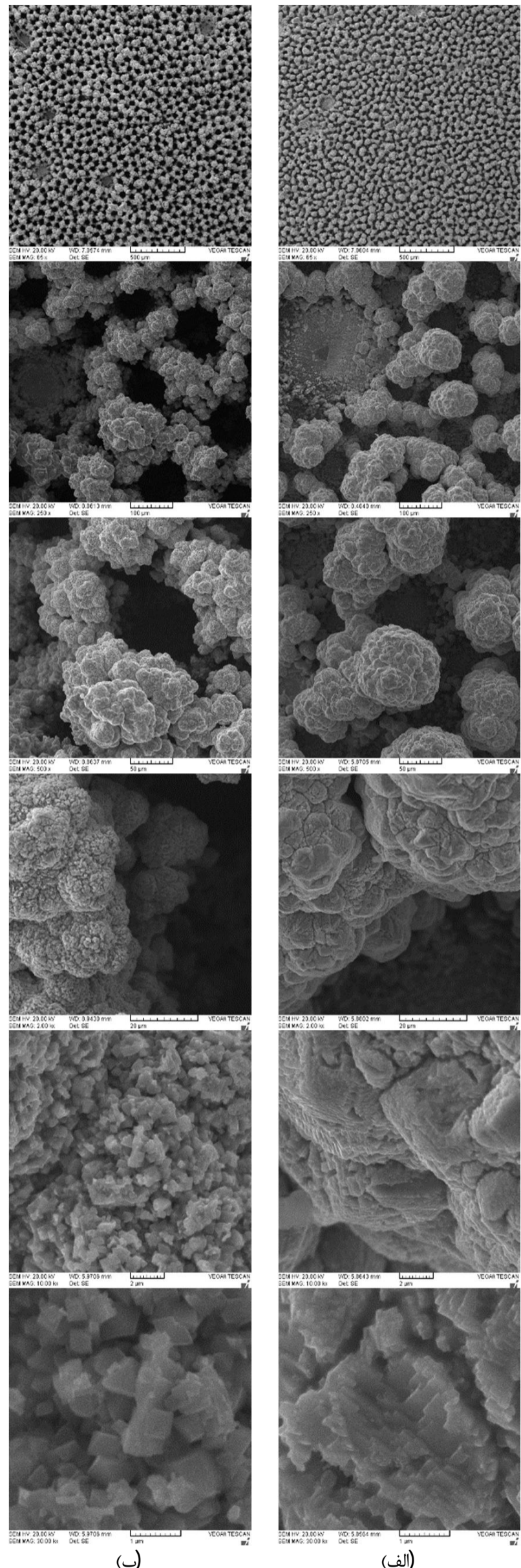


Fig. 7 SEM pictures of two-stage porous structures in different magnifications a) sample No.2 (30sec) b) sample No.4 (100sec).

شکل 7 تصاویر SEM از ساختارهای متخلخل دومرحله‌ای (الف) نمونه دوم (زمان 30 ثانیه) و (ب) نمونه چهارم (زمان 100 ثانیه) در بزرگنمایی‌های مختلف

3-2- منحنی جوشش استخری

به منظور بررسی عملکرد سطوح متخلخل ساخته شده، آزمون جوشش استخری انجام می‌شود. آزمون بر روی دو نمونه دومرحله‌ای که دارای استحکام مکانیکی بهتری می‌باشند انجام می‌شود. هرچند نمونه چهارم با توجه به تخلخل و ضخامت بالا دارای استحکام کمتری نسبت به نمونه دوم می‌باشد. البته پیوند بین ساختار و سطح به قدری بود که تا پایان آزمون جوشش، ساختار از روی سطح جدا نمی‌شد. بدین صورت منحنی جوشش بر حسب سوپرهیت دیواره برای سطوح متخلخل در مقایسه با سطح صاف پولیش شده استخراج می‌شود.

همان‌طور که در منحنی‌های جوشش شکل 9 مشاهده می‌شود، انتقال حرارت در ساختار متخلخل نمونه دوم و چهارم به مقدار زیادی نسبت به سطح مس پولیش خورده بهبود یافته است. جوشش در سوپرهیت‌های دیواره کمتری شروع شده و ضریب انتقال حرارت که از روی شیب نمودار شار بر حسب دما حاصل می‌شود، به مقدار زیادی افزایش داشته است. همچنین شار حرارتی بحرانی که البته در این آزمایش با حاشیه‌ای شناسایی شده است، افزایش داشته است.

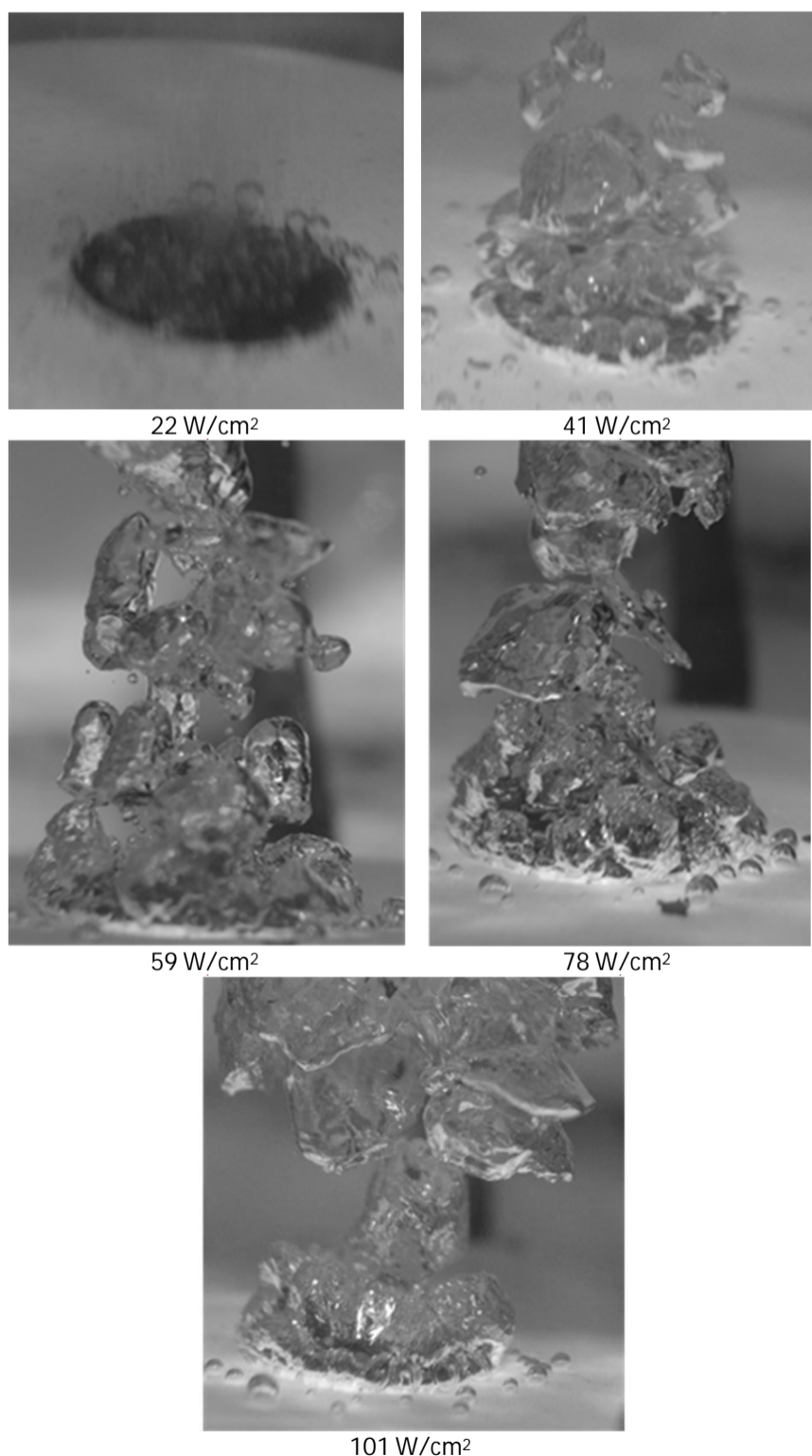


Fig. 10 Pool boiling pictures of porous copper surface (electrodeposited in 30 sec) on different heat flux

شکل 10 تصاویر جوشش استخری سطح مس متخلخل (الکترونشست شده در 30 ثانیه) در شارهای حرارتی مختلف

$$\Phi = V_V / V_T \quad (13)$$

تقریبی متداول برای محاسبه تخلخل دوبعدی، عکس‌برداری از سطح می‌باشد. نسبت سطوح بدون حضور مس نسبت به کل سطح تقریبی از تخلخل را می‌دهد. برای محاسبه‌ی مساحت چند ضلعی‌ها از نرم‌افزار ایمیج‌جی¹ استفاده می‌شود. جدول 3 اطلاعات مربوط به تخلخل در چهار نمونه را مقایسه می‌کند.

نمونه‌های تک‌مرحله‌ای دارای تخلخل بیشتری بوده و به دلیل وجود این فضاهای خالی، شکننده‌تر نیز می‌باشد. نمونه چهارم به دلیل زمان بیشتر الکترونشست در مرحله اول، تخلخل کمتری داشته و دیواره حفره‌ها به یکدیگر متصل می‌باشند.

3-1-4- پارامترهای زبری سطوح

برای تعیین زبری سطوح بدست آمده از فرایند الکترونشست، از دستگاه زبری سنج TR-200 ساخت شرکت فینیکس، استفاده شده است. این دستگاه زبری سطح را برای سطوح مختلف با دقت 0.001 میکرومتر و محدوده کاری ± 100 میکرومتر، اندازه‌گیری می‌نماید. پارامترهای زبری مربوط به چهار سطح در شکل 8 نشان داده شده است. همان‌طور مشاهده می‌شود با اصلاح فرایند الکترونشست از نمونه‌ی اول تا چهارم عمق حفره‌ها افزایش یافته و ارتفاع برآمدگی‌ها کاهش می‌یابد. بیشترین اختلاف ارتفاع در نمونه‌ها حدود 90 میکرومتر با تغییرات 10 میکرومتر می‌باشد. تفاوت عمده بین سطح دوم و چهارم در حداکثر عمق فرورفتگی و ارتفاع برآمدگی‌ها می‌باشد که در سطح دوم به ترتیب کمتر و بیشتر است.

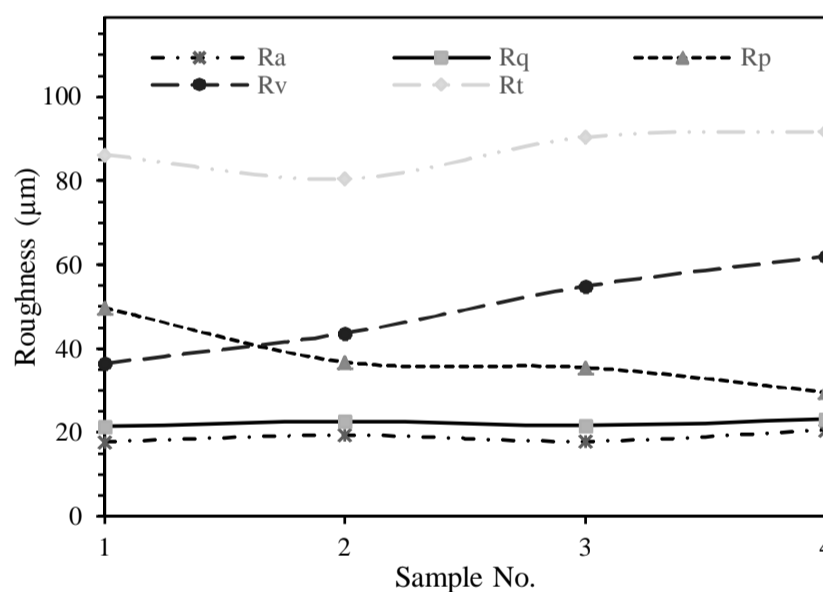


Fig. 8 Roughness characteristics of samples

شکل 8 نمودار مشخصات زبری نمونه‌ها

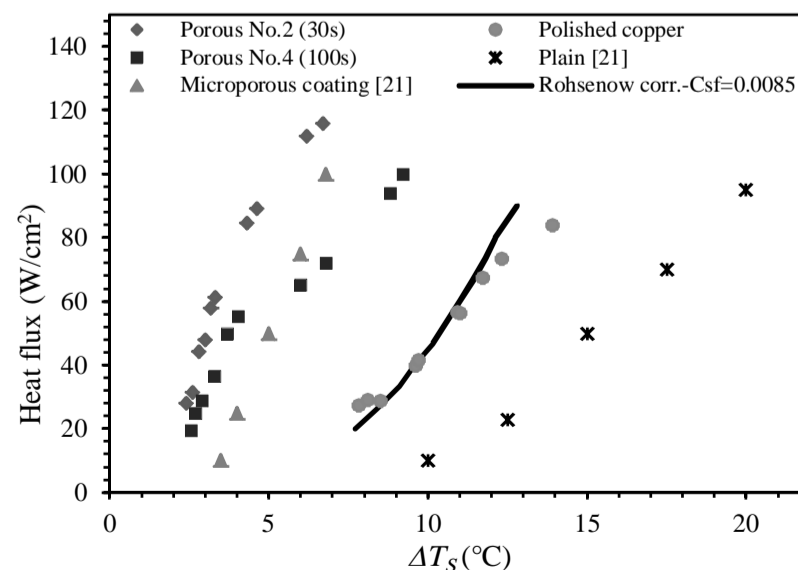


Fig. 9 Pool boiling curve for porous and polished surfaces

شکل 9 منحنی جوشش استخری برای سطوح متخلخل و سطح صاف

R_p	حداکثر ارتفاع برآمدگی ها (μm)
R_q	میانگین هندسی قدر مطلق عمق ها و ارتفاع ها (μm)
R_t	حداکثر اختلاف ارتفاع (μm)
R_v	حداکثر عمق فرورفتگی ها (μm)
S	مساحت سطح الکترونشست (cm^2)
ΔT_s	سوپرهیت دیواره ($^{\circ}\text{C}$)
t	مدت زمان فرایند (sec)
V_T	حجم کل (m^3)
V_V	حجم حفره (m^3)
Z	تعداد الکترون های شرکت کننده در واکنش کاهش (e)
علائم یونانی	
ϕ	تخلخل
ρ	چگالی (grcm^{-3})
σ	واریانس

6- مراجع

- [1] M. Jakob and W. Fritz, Experiments on the evaporation process, *Research in Engineering*, Vol. 2, pp. 435-447, 1931.
- [2] S. Nukiyama, The maximum and minimum values of the heat Q transmitted from metal to boiling water under atmospheric pressure, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 9, pp. 1419-1433, 1966.
- [3] P. J. Berenson, Experiments on pool boiling heat transfer, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 5, pp. 985-999, 1962.
- [4] R. L. Webb, The evolution of enhanced surface geometries for nucleate boiling, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 2, pp. 46-69, 1981.
- [5] A. E. Bergles and R. M. Manglik, Current progress and new developments in enhanced heat and mass transfer, *Journal of Enhanced Heat Transfer*, Vol. 20, pp. 1-15, 2013.
- [6] D. Attinger et al., Surface engineering for phase change heat transfer: A review, *MRS Energy and Sustainability, a Review Journal*, Vol. 1, pp. 1-40, 2014.
- [7] H. F. O'Hanley, *Separate effects of surface roughness, wettability and porosity on boiling heat transfer and critical heat flux and optimization of boiling surfaces*, MSc. Thesis, Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2012.
- [8] R. Ahmadi, T. Okawa, Observation of bubble dynamics during subcooled flow boiling on different surface wettability in atmospheric pressure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No.7, pp. 313-320, 2015 (in Persian).
- [9] B. Soleimani, A. Keshavarz Valian, T. Malekpour, Experimental investigation of velocity and roughness effects on subcooled flow boiling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 327-334, 2015 (in Persian).
- [10] T. Malek Pour, A. Keshavarz Valian, M. Zia Bashar Hagh, B. Soleimani, Experimental investigation of nanofluid concentration and material type effect on pool boiling, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 10, pp. 165-172, 2015 (in Persian).
- [11] C. M. Patil and S. G. Kandlikar, Review of the manufacturing techniques for porous surfaces used in enhanced pool boiling, *Heat Transfer Engineering*, Vol. 35, pp. 887-902, 2013.
- [12] F. E. Bliss, S. T. Hsu, and M. Crawford, An investigation into the effects of various plating on the film coefficient during nucleate boiling from horizontal tubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 1, pp. 1061-1072, 1969.
- [13] T. M. Anderson, and I. Mudawar, Microelectronic Cooling by enhanced pool boiling of a dielectric fluorocarbon liquid, *ASME Journal Heat Transfer*, Vol. 111, pp. 752-759, 1989.
- [14] C.-J. Kim, *Structured surfaces for enhanced nucleate boiling*, M.Sc. Thesis, Mechanical Engineering, Iowa State University, 1985.
- [15] C. M. Patil, K.S. Santhanam, S. G. Kandlikar, Development of a two-step electrodeposition process for enhancing pool boiling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 79, pp. 989-100, 2014.
- [16] M. S. El-Genk and A. F. Ali, Saturation boiling critical heat flux of PF-5060 dielectric liquid on microporous copper surfaces, *Journal Heat Transfer*, Vol. 137, No. 4, pp. 41-50, 2015.

رابطه رزنه‌و برای پیش‌بینی نمودار جوشش هسته‌ای با ضریب سطح-سیال 0.0085، تطابق خوبی با نتایج تجربی روی سطح پولیش خورده دارد. در مقایسه با نتایج تحقیقات اخیر که از سطح متخلخل رسانای گرمایی با ذرات کروی برای بهبود استفاده شده است [21]، سطوح متخلخل ساخته شده در این تحقیق در محدوده‌های شار پایین، در سوپرهیت‌های کمتری توانسته‌اند حرارت را انتقال دهند.

در مقایسه بین دو سطح متخلخل، سطح با زمان الکترونشست مرحله اول 30 ثانیه، عملکرد مطلوبتری داشت. در دماهای مافوق گرم کم، سطح دوم شار حرارتی بیشتری را از خود عبور می‌دهد و به هم‌پیوستگی حباب‌ها در شارهای بیشتری رخ می‌دهد. این عملکرد به دلایل تخلخل بیشتر سطح، ضخامت و مقاومت رسانشی کمتر، ارتباط بیشتر حفره‌ها به یکدیگر و افزایش موینگی سطح می‌باشد. در شکل 10 حباب‌های تشکیل شده بر روی سطح دوم در شارهای حرارتی مختلف نشان داده شده است. دینامیک حباب بدین‌گونه بوده است که از ابتدای فرایند، حباب‌های بسیار ریز با فرکانس بالا از روی سطح جدا می‌شدند که این حالت در سطح صاف پولیش شده مشاهده نمی‌شد. قطر متوسط حباب‌ها در شار حرارتی 40W/cm^2 حدود 3 میلی‌متر بود. با افزایش شار، قطر جدایش حباب‌ها افزایش می‌یافت ولی در شار حدود 60W/cm^2 حباب‌ها به یکدیگر متصل می‌شدند و تا این شار، جوشش هسته‌ای مجزا وجود داشت.

4- نتیجه‌گیری

سطوح متخلخل بر روی مس از طریق فرایند الکترونشست در محلول سولفات مس و اسید سولفوریک به صورت آزمایشگاهی ایجاد شد. دو سطح با تغییر زمان فرایند ساخته شد و به منظور استحکام و دستیابی به ساختار مطلوبتر، مرحله دوم فرایند با عبور جریان کم در مدت زمان زیاد انجام شد. با عکس‌برداری میکروسکوپ الکترونی از سطوح حاصل، نحوه توزیع و شکل‌گیری ساختارها مقایسه گردید. سپس با استفاده از زبری‌سنجی و محاسبه‌ی سطح حفره‌ها، تخلخل سطوح بدست آمد تا توجیهی برای مقایسه عملکرد بهتر در جوشش ارائه شود. در ادامه، آزمون جوشش استخری بر روی سطوح دوم‌مرحله‌ای که استحکام بهتری داشتند، انجام شد و میزان بهبود فرایند جوشش استخری در مقایسه با سایر سطوح استخراج گردید. نتایج نشان می‌داد که جوشش در سطوح متخلخل در سوپرهیت‌های کمتری شروع شده و ضریب انتقال حرارت را به میزان زیادی نسبت به سطح معمولی افزایش می‌دهد.

5- فهرست علائم

A	عدد جرمی فلز (grmol^{-1})
A_1	مساحت سطح جوشش (m^2)
A_2	مساحت سطح بلوک مسی (m^2)
a	عرض از مبدا دما ($^{\circ}\text{C}$)
b	گرادیان دما ($^{\circ}\text{cm}^{-1}$)
F	ثابت فارادی (Ne^{-1})
h	فاصله ترموکوپل 1 تا سطح جوشش (m)
h	ضخامت لایه (cm)
I	جریان الکتریکی فرایند ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
M	جرم فلز الکترولیز شده (gr)
R_a	میانگین حسابی قدر مطلق عمق‌ها و ارتفاع‌ها (μm)

- [20] Y. D. Gumburg, G. Zangari, *Theory and practice of metal electrodeposition*, Springer-Verlag New York, 2011.
- [21] J. H. Kim, A. Gurung, M. Amaya, S. M. Kwark, S. M. You, Microporous coatings to maximize pool boiling heat transfer of saturated R-123 and water, *Journal Heat Transfer*, Vol. 137, No. 8, pp. 81501-81507, 2015.
- [17] H.C. Shin, and M.Liu, Copper foam structures with highly porous nanostructured walls, *Chemistry of materials Journal*, Vol. 16, pp. 5460-5464, 2004.
- [18] N.D. Nikolić, L.J. Pavlović, M.G. Pavlović, K.I. Popov, Formation of dish-like holes and a channel structure in electrodeposition of copper under hydrogen codeposition electrochim. *Electrochimica Acta*, Vol. 52, pp. 8096-8104, 2007.
- [19] J. M. Strack, *A New pool boiling facility for the study of nanofluids*, MSc Thesis, Engineering Physics, McMaster University, 2013.