



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:

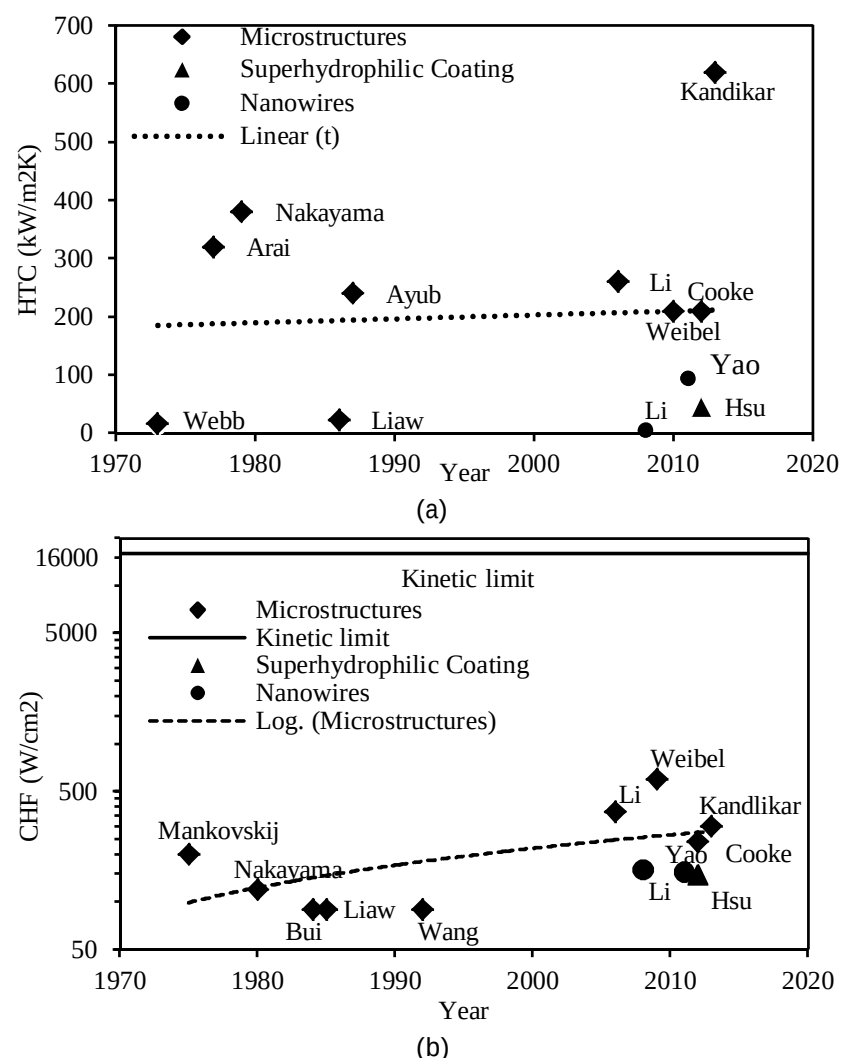


Fig. 1 Enhancement level of (a) heat transfer coefficient in $\Delta T=5K$ and (b) critical heat flux with micro/nanotechnology for pool boiling of water on copper surface [6].

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 آبکاری در چگالی جریان 100 میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع به مدت تنها بیست ثانیه، ساختاری دندانه‌ای 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 منگلک مرور شد [5]. ساخت سطوح بر اساس تئوری‌هایی که در بهبود فرایند جوشش وجود دارد، انجام شده و به صورت تجربی موردبررسی 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 توان 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 موردبررسی 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 سیال رسانی 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.

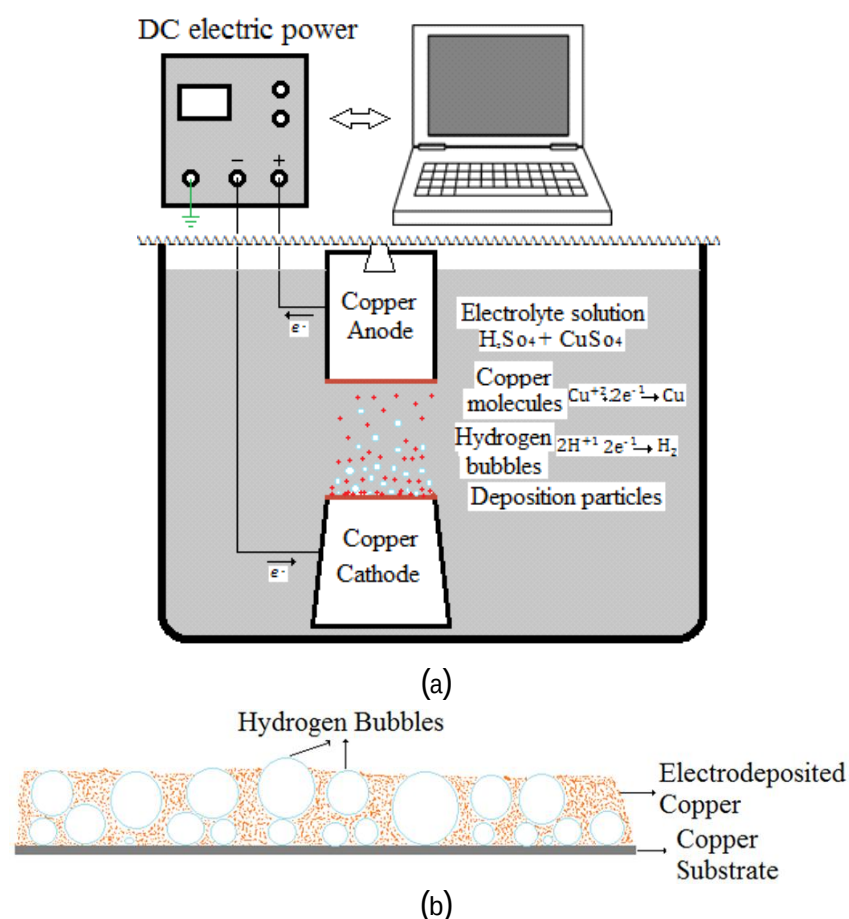


Fig. 2 a) Schematic of electrode position setup b) Schematic of electrodeposited copper

شكل 2 a) شماتيك ستاپ انجام فرايند الكترونشست b) ساختار شماتيك مس الكترونشست كرده



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 میکرو حفره‌ها می‌باشد. میکروساختار نشانده شده اولیه با تخلخل بالا، ظریف و شکننده می‌باشد. به منظور استحکام می‌توان از دو روش: الف) ادامه فرايند با جريان کمتر و زمان زياد يا ب) آنيل کاري يعني قراردادن نمونه در کوره خلاء استفاده نمود. نشست اتم‌های مس در روش اول، مورفولوژی سطح را تغيير داده و با پر نمودن حفره‌ها، ميزان تخلخل کاهش می‌یابد اما مساحت ترشونده سطح افزایش می‌یابد. به دليل جريان کم، حباب‌های هیدروژن کمتری تشکیل شده و تأثیر ناچیزی بر ساختار حفره‌ها دارد. چسبندگی لایه سطحی میکرومتخلخل به زیرلایه مس، مطلوب بوده و طی فرايند جوشش از سطح جدا نمی‌شود.

روش الكترونشست 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 الكتروود مورد استفاده، تمرکز یون‌های مس و اسید سولفوریک، دمای محلول در حین الكترولیز، مدت زمان الكترولیز و جريان بر واحد سطح در فرايند، اندازه‌ی حفره‌ها، به‌سبب رشد حباب‌های هیدروژن و همچنین به‌سبب به هم پیوستگی حباب‌های هیدروژن همسایه، با گذر زمان الكترولیز بیشتر می‌شود. در فرايند رشد، به سبب توزیع چگالی جريان، تعدادی از حباب‌های هیدروژن می‌توانند در درون رسوب دربند مانده و ساختاری لانه زنبوری شکل با تخلخل بالا بسازند [18].

2-1-2- مراحل ساخت سطوح متخلخل

پیش از انجام فرايند الكتروشمیایی لایه نشانی، سطح مس توسط روش‌های

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

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

2- روش ساخت و انجام آزمون

2-1-1- ساخت نمونه‌های سطح

2-1-1-1- روش الكترونشست

انباشت الكتروشمیایی روشی ساده برای تولید میکرو/نانوساختارهای متخلخل است که شامل فرايند الكتروشمیایی کاهش یون در کاتد توسط عبور جريان 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 الكترولیت شامل نمک فلزی (سولفات مس) حل شونده در آب و اسید سولفوریک، به فاصله چند سانتی‌متر مستغرق می‌شوند. فرايند می‌تواند با گذر جريان ثابت از محلول یا با نگهداری ماده الكتروود آند در پتانسیل ثابت انجام شود. در حالت گالوانواستاتیک که در این تحقیق استفاده می‌شود، کاتد و آند به منبع جريان مستقیم وصل می‌شوند تا چگالی جريان قابل تنظیم باشد و زمان فرايند مشاهده شود. زمانی که جريان الكتريکی در سلول الكتروشمیایی برقرار شود، یون‌های H^{+} و Cu^{2+} در محلول الكترولیت تحت دو واکنش کاهش همزمان در کاتد به صورت زیر قرار می‌گیرند:

1- Scanning Electron Microscope (SEM)



Fig. 3 Electrode position equipments

شكل 3 تصوير تجهيزات فرايند الكترونيشست

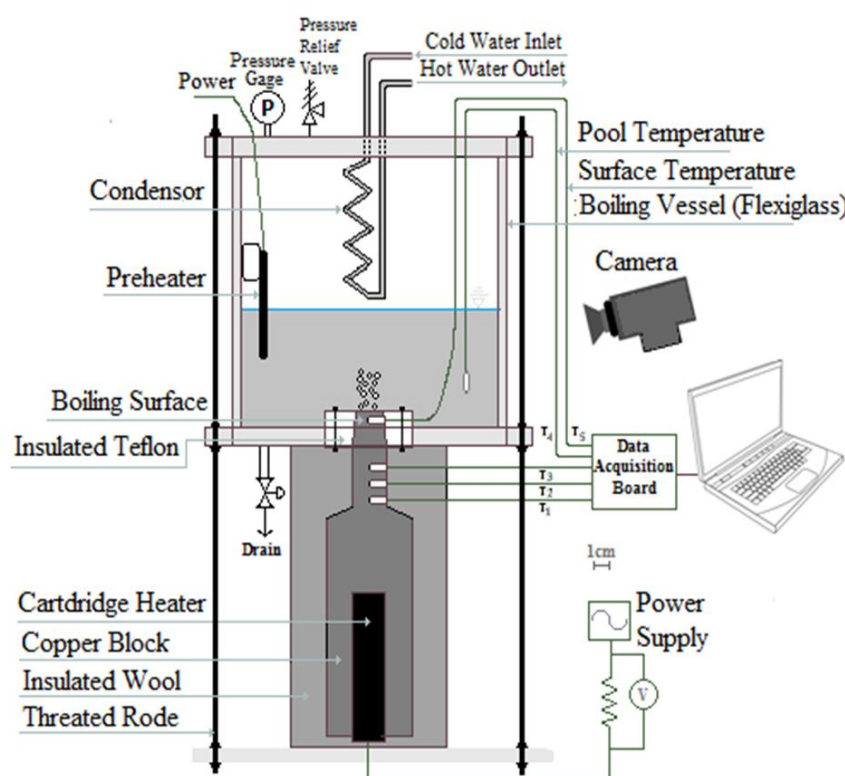


Fig. 4 Schematic of pool boiling test setup

شكل 4 شماتيك دستگاه آزمون جوشش استخري

جاگذاري توسط حالت مخروطي پايه سطح در تفلون عايق انجام مي شود. شار حرارتي گذرا از سطح توسط هيتز فشنگي قرار داده شده در بلوك مسي زير سطح، ايجاد مي شود. تامين توان هيتز توسط منبع تغذيه جريان متناوب تامين و كنترل مي شود. با تنظيم منبع تغذيه و پس از رسيدن دماي سطح به حدود 80 درجه، سيال عامل آب پيش گرم شده تا ارتفاع حدود 10 سانتي متر داخل محفظه ريخته مي شود. گرمكن داخل محفظه نيز به منظور جبران تلفات به بيرون و رساندن مجموعه به حالت اشباع، در طول آزمون روشن مي باشد. فشار محفظه افزايش مي يابد و گازهاي غيرقابل چگالش از طريق شير تخليه، خارج مي شود. فرايند ادامه مي يابد تا زماني كه بازرسي چشمي تايدد نمايد كه فقط بخار سيال وجود دارد. شير كندانسور به آرامي باز مي شود تا زماني كه فشار محفظه به يك اتمسفر برسد. ولتاژ منبع تغذيه گرمكن ها با پله 10 ولتي زياد مي شود تا زماني كه شروع هسته زايي مشاهده شود. اين افزايش تدريجي به منظور ايجاد شرايط نيمه پايا در سيستم انجام مي شود. پس از رسيدن به حالت نيمه پايا (تغييرات دماي سيلندر مسي در حد يك درجه باشد و اين شرايط براي حداقل ده دقيقه ادامه داشته باشد)، داده هاي دمائي پنج ترموكوپل نوع K توسط نرم افزار لباو¹ جمع آوري مي شوند. يك ترموكوپل در فاصله 5 ميلي متر زير سطح قرار داده شده است تا دماي سطح از روي آن برون يابي شود. سه عدد ترموكوپل در بلوك مسي جاگذاري شده است تا از روي آن ها شار حرارتي گذرا از سطح تقريبن زده شود. يك ترموكوپل هم داخل سيال قرار داده مي شود

1- LabView

پايدارسازي آماده مي شود. آماده سازي و تميزكاري سطح كاتد و آند براي دستيابي به چسبندگي بالا و يكنواختي لايه ي نشاندنه شده با قابليت تكررپذيري فرايند، ضروري مي باشد. ابتدا سطح ماشين كاري شده مس با سمباده 400 دانه صاف مي شود تا زبري هاي بزرگ روي سطح از بين برود. سپس با سمباده 1500 دانه زبري هاي كوچك از بين برده مي شود. سطح مس، برس زده شده و پوليش مي شود و سپس با دستمال كتان آغشته آب و الكل شسته مي شود تا سطحي يكنواخت به دست آيد. در انتها قطعه را داخل اسيد هيدروكلريديك رقيق قرار داده تا لايه غيرفلزي و ارگانيك روي سطح برداشته شود.

شكل 3 تصوير تجهيزات مربوط به انجام فرايند الكترونيشست را نشان مي دهد. در اين فرايند، آند و كاتد به موازات هم داخل محلول قرار مي گيرند و سطح آند را بزرگتر از كاتد و هر دو به صورت دايروي انتخاب مي شود تا تقارن حفظ شود. بزرگتري سطح آند باعث مي شود جريان به صورت يكنواخت در محلول به كاتد برسد و لايه نشاني يكنواخت باشد. دو قسمت آند و كاتد به صورت كامل در محلول الكتروليت با فاصله 3 سانتي متر غوطه ور شده و به منبع تغذيه متصل شده اند. براي ايجاد جريان و برقراري مدار الكتروليز از منبع تغذيه جريان مستقيم با محدوده ولتاژ 0-30 ولت با دقت 0.01 ولت و محدوده جريان 0-5 آمپر با دقت 0.01 آمپر استفاده مي شود. براي كالبره كردن منبع تغذيه از مولتي متر با دقت 1 ميلي آمپر استفاده مي شود. براي لايه نشاني دقيق تر، سطح هاي اضافي با پوشش عايق و ضدآب پوشانده شده تا لايه نشاني و لايه برداري فقط در نواحي مطلوب انجام شود. مشخصات غلظت سولفات مس در محلول به گونه اي انتخاب شده است كه ميزان لايه نشاني مس تحت محدوديت ميزان يون هاي مس در محلول نباشد (0.4 مولار سولفات مس در 1.5 مولار اسيد سولفوريك).

در مرحله اول فرايند الكتروليز، ساختار پايه در لايه هاي متخلخل شكل مي گيرند كه در نمونه هاي اول و دوم با زمان 30 ثانيه و نمونه هاي سوم و چهارم با زمان 100 ثانيه لايه نشاني شده اند. در هر چهار نمونه از چگالي جريان 600 ميلي آمپر بر سانتي مترمربع استفاده شده است. در مرحله دوم لايه نشاني كه در نمونه هاي دوم و چهارم استفاده شد، لايه نشاني نمونه ها با جريان 60 و زمان 2500 ثانيه ادامه يافت. با انجام مرحله دوم، پايداري سطح افزايش يافته و همچنين نانودندانه ها بر روي سطح شكل مي گيرند. در جدول 1 پارامترهاي ساخت سطوح خلاصه گرديده است.

2-2- آزمون جوشش

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

آزمون جوشش در دستگاه نشان داده شده در شكل 4، كه قابليت جاگذاري سطح صاف را دارد، انجام مي پذيرد. دستگاه ساخته شده و نحوه انجام آزمون به طور مختصر در ذيل بيان مي گردد. محفظه آزمون به صورت مكعبي به ضلع 15 سانتي متر از جنس پلكسي مي باشد كه سطح جوششي به شكل دايره با قطر 22 ميلي متر در آن جا زده مي شود.

جدول 1 پارامترهاي زمان و جريان در ساخت نمونه ها

Table 1 Time and current parameters in fabrication of samples

شماره نمونه	جريان اوليه (mA/cm ²)	مدت زمان (s)	جريان ثانويه (mA/cm ²)	مدت زمان (s)
اول	600	30	-	-
دوم	600	30	60	2500
سوم	600	100	-	-
چهارم	600	100	60	2500

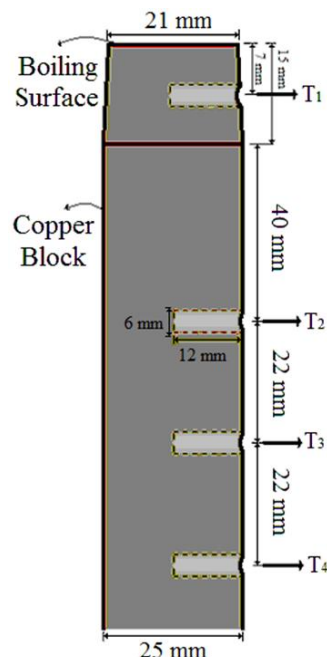


Fig. 5 Dimension of copper block and boiling surface

شکل 5 ابعاد بلوک مسی و سطح جوشش

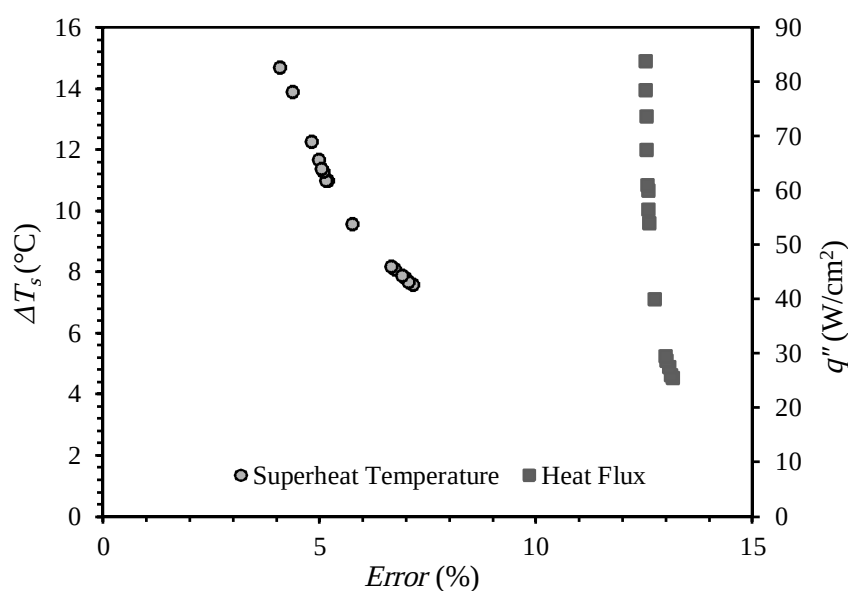


Fig. 6 Variation of uncertainty versus temperature and heat flux

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:

$$\sigma_{T_s} = \left((\sigma_{T_1})^2 + \left(\frac{4\sigma_{q_z}}{\pi r^2 k} \left(\frac{1}{h} \right) \right)^2 + \left(\frac{4q_z \sigma_h}{\pi r^2 k} \left(\frac{1}{h^2} \right) \right)^2 \right)^{0.5} \quad (10)$$

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:

$$\sigma_{q''} = \left(\left(k \times \frac{A_1}{A_2} \times \sigma_b \right)^2 + \left(k \times b \times \frac{1}{A_2} \times \sigma_{A_1} \right)^2 + \left(k \times b \times A_1 \times \frac{-1}{A_2^2} \times \sigma_{A_2} \right)^2 \right)^{0.5} \quad (7)$$

جدول 2 جرم فلز لايه نشاني و ضخامت نمونه ها

Table 2 Mass of electrodeposited copper and thickness

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

بخشي از تصوير سطح در هر مرحله بزرگتر شده است تا درك بهتري از ميكرو/نانوساختارهاي سطحي ايجاد شده روي سطح طي فرايند الكترونشست حاصل شود. مشخصات مربوط به هر تصوير شامل ميزان بزرگنمايي و ابعاد واقعي تصوير و بزرگنمايي آن، در ذيل تصوير توسط دستگاه تصويربرداري ذكر شده است. به دليل استحکام مكانيكي كم ساختارهاي يك مرحله اي، از آن ها در آزمون جوشش استفاده نمي شود. همان گونه كه مشاهده مي شود، نشست ذرات مس خالص بر روي سطح باعث تشكيل ساختارهاي متخلخل شبكه اي با متوسط قطر حفره حدود 100 ميكرومتر شده است. شبكه سطوح به صورت لانه زنبوري و تقريبا يكنواخت مي باشد به جز حفره هاي دهانه بازي كه در اثر چسبیدن حباب هيدروژن به سطح طي فرايند ايجاد گرديده است. در نمونه چهارم به دليل افزايش زمان فرايند، محدوده اطراف يك حفره به صورت كامل تشكيل شده است ولي در نمونه دوم، حفره ها به يكدیگر راه دارند و سيال مي تواند به راحتي در آن جابجا شود. اين حفره ها خصوصا اگر به صورت دهانه باريك باشند، تأثير زيادي در افزايش نقاط هسته زايي حباب و هسته زايي در دماهاي سوپرهيت كمتر دارند. همچنين پيش بيني مي شود با افزايش مساحت سطح و ايجاد ساختار موين، باعث افزايش ضريب انتقال حرارت جوششي و شار حرارتي بحراني شوند. نانوساختارهاي سطح در نمونه چهارم بيشتر مشهود مي باشند اما سطح دوم در مقیاس نانو، ساختارهاي هموارتري دارد.

3-1-2- جرم الكترونشست شده بر روي سطح

بر اساس قانون فارادي الكتروليز، مقدار فلز نشست نموده متناسب با زمان و جريان فرايند مي باشد [20]. براي چهار نمونه لايه نشاني شده با توجه به جريان و مدت زمان فرايند الكتروليز، با استفاده از معادله (11) جرم فلز نشاندۀ شده تعيين مي گردد:

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

و همچنين، مقدار ضخامت لايه از روي جرم الكترونشست شده و چگالي طبق رابطه (12) به دست مي آيد:

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

بر اساس معادلات فوق جرم فلز لايه نشاني شده و ضخامت آن ها بر روي نمونه ها در صورت عدم وجود تخلخل بر مبنای چگالي، با فرض ثوابت جرم مولی مس 63.5 gr/mole، ثابت فارادي 96485 coulombs/mole و 2 عدد الكترون شرکت کننده در واكنش كاهش، در جدول 2 محاسبه شده است.

3-1-3- تخلخل سطوح

تخلخل يا نسبت پوكي معياري از ميزان فضاي خالي نسبت به كل حجم ماده است و با تقسيم حجم فضاي خالي بر حجم كل بدست مي آيد. مقدار تخلخل همواره بين 0-1 و يا به صورت درصدي 0-100% مي باشد. معادله (13) نحوه محاسبه تخلخل را نشان مي دهد:

جدول 3 مقدار تقريبي تخلخل نمونه ها و ضخامت واقعي

Table 3 Porosity estimation of samples and real thickness

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

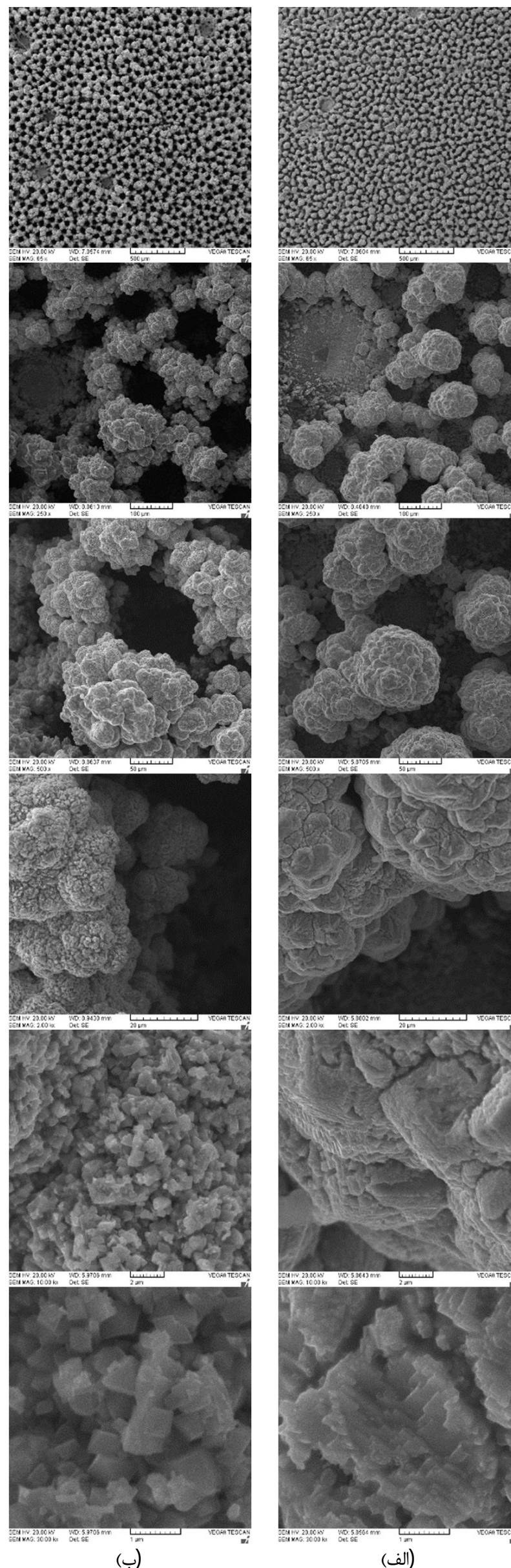


Fig. 7 SEM pictures of two-stage porous structures in different magnifications a) sample No.2 (30sec) b) sample No.4 (100sec).

شكل 7 تصاویر SEM از ساختارهای متخلخل دومرحله ای (الف) نمونه دوم (زمان 30 ثانيه) و (ب) نمونه چهارم (زمان 100 ثانيه) در بزرگنمایی های 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.

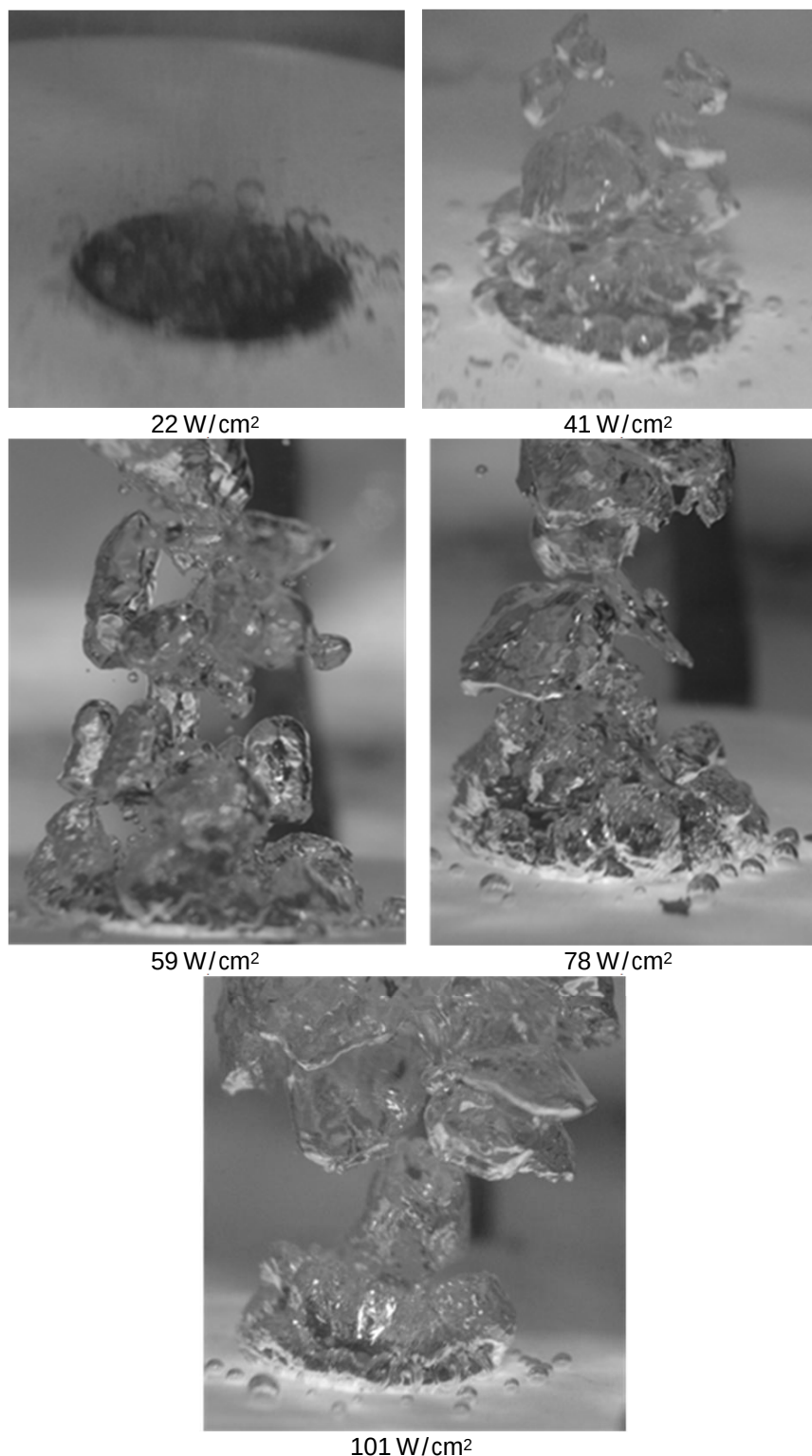


Fig. 10 Pool boiling pictures of porous copper surface (electrodeposited in 30 sec) on different heat flux

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.

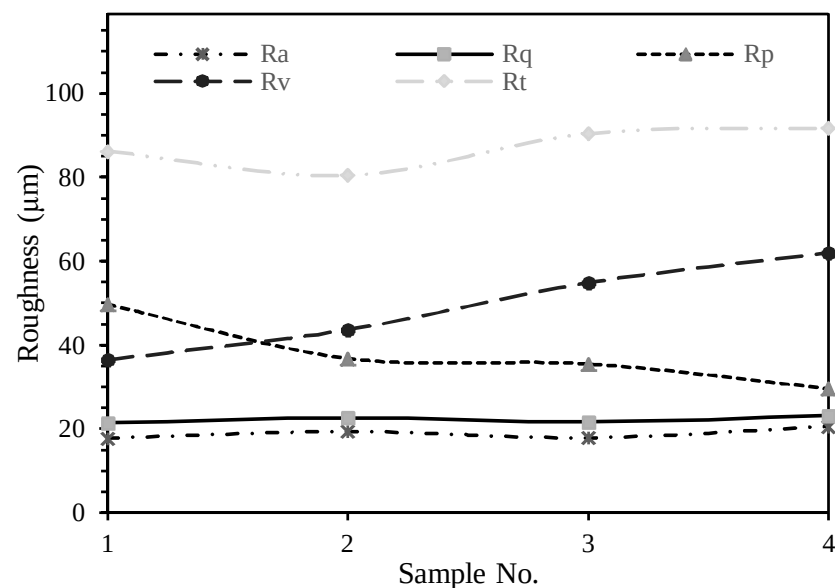


Fig. 8 Roughness characteristics of samples

شکل 8 نمودار مشخصات زبری نمونه‌ها

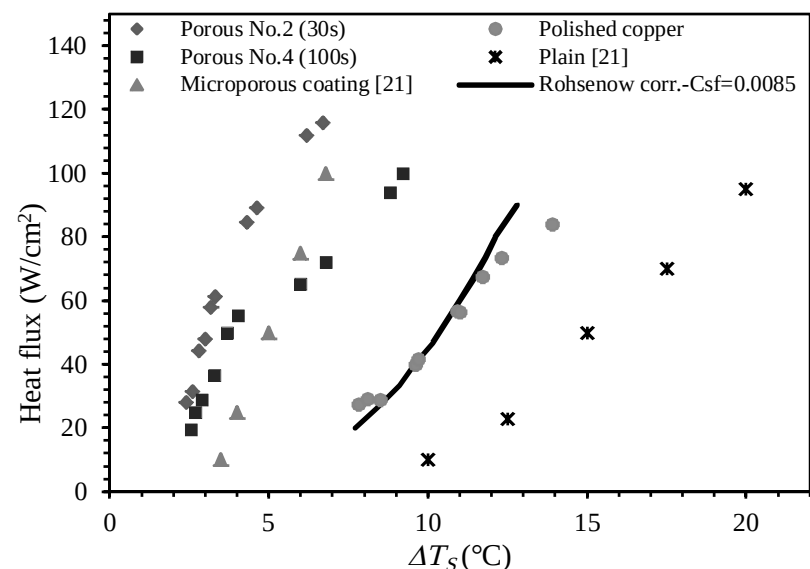


Fig. 9 Pool boiling curve for porous and polished surfaces

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 رسانی 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 حساسی 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.