



بهبود جوشش استخرى با ايجاد ميكرو/نانوساختارهاي متخلخل الكترونشست شده روى سطح مس

امیں 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 - كارشناس، دانشكده مهندسي مكانيك، دانشگاه علم و صنعت ايران، تهران

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

اطلاعات مقاله	چکیدہ
مقاله پژوهشی کامل دریافت: 10 شهریور 1394 پذیرش: 14 مهر 1394 ارائه در سایت: 30 آبان 1394	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 میکرو/نانوساختار متخلخل فلزی به منظور بهبود انتقال حرارت جوششی بر روی سطح فلز مس به روش الکترونشست یک و دو مرحلهای ساخته
كليد واژگان: جوشش هسته اى استخرى ميكرو/نانوساختار الكترونشست سطح مس	می شود. در مرحله بعد، تأثیر این ساختار، تصاویر در مقیاسهای میکرو و کانو از سطح کرفته شده و خواص سطح مانند تختکل و ربزی اندازه دیری می شود. در مرحله بعد، تأثیر این ساختارها بر میزان بهبود انتقال حرارت جوششی به صورت آزمایشگاهی اندازه گیری شده و منحنی انتقال حرارت جوششی که شار حرارتی بر حسب سوپرهیت دیواره را نشان می دهد، برای سطوح دومرحلهای که از لحاظ مکانیکی پایدارتر هستند، با سیال آب استخراج می شود. مقایسه نتایج منحنی های جوشش سطوح بهبودیافته با سطح صاف و نتایج سایرین، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت و شار حرارتی بحرانی را نشان می دهد. همچنین مقایسه تغییر زمان فرایند الکترودپوزیشن در ساختارهای حاصله نشان می دهد افزایش تخلخل و مویینگی و استحکام در ساختار با زمان کمتر (30 ثانیه ای)، باعث بهبود بیشتر فرایند جوشش هسته ای می شود.

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.

فرایند پیچیده، صنعتگران به دنبال روشهایی برای بهبود این فرایند هستند.	1 - مقدمه
روشهای زیادی برای بهبود فرایند جوشش پیشنهاد شده است که در تقسیم-	مسأله بحران انرژی و افزایش بازدهی انتقال حرارت، کوچکسازی تجهیزات و
بندی کلی میتوان به روشهای فعال، غیرفعال و ترکیبی اشاره کرد. از روش-	خنککاری بهینه تجهیزات الکترونیکی، افزایش ایمنی و بهبود توان نیروگاههای
های فعال که نیازمند انرژی خارجی میباشد میتوان به ایجاد میدانهای	هستهای، افزایش بازدهی بویلرها و مبدلها موجب توجه بیشتر صنایع به بحث
الکتریکی و آکوستیکی و یا ارتعاش سطح اشاره نمود. دستیابی به اغلب روش-	بهبود انتقال حرارت با تغییر از فاز مایع به بخار، خصوصا به صورت جوشش شده
های فعال در خارج از محیط آزمایشگاه مشکل میباشد و یا توجیه اقتصادی	است. با وجود عدم شناخت کامل پارامترهای تأثیرگذار و نقش هر یک در این

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

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)



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 مویینگی 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 دردسترس ساخت از مواردی است که بایستی در انتخاب نحوه ساخت ساختار متخلخل مطلوب درنظر گرفت.

روشهای زیادی برای ساخت سطوح متخلخل به منظور بهبود انتقال حرارت جوششی پیشنهاد شده است [11]. از متداول ترین این روشها میتوان به تفجوشی پودر، الکترونشست، فوم، آندایز، لیتو گرافی و روشهای ابداعی دیگر اشاره کرد. فرایند الکترونشست علاوه بر زمان و هزینه کم، دارای قابلیت 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 منتقل کننده گرما با مشخصههای هندسی خاص دانست. در روش ترکیبی از هر دو روش غیرفعال و فعال به منظور افزایش بیشتر بازدهی استفاده می گردد.

مفهوم مهندسی سطوح برای دستیابی به کارایی بالاتر در فرایند جوشش به سال 1391 برمی گردد [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 تئورىهايي كه در بهبود فرايند جوشش وجود دارد، انجام شده و به صورت تجربی موردبررسی قرار می گیرند. شکل 1 نشان می دهد 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 می توان 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 تغییرفاز و یافتن راهکارهای نو در مهندسی سطوح برای بهبود فرايندها با اين هدف نهايي كه راندمان حاصله به حد نظري آن نزديکتر شود، مورد توجه است [6].

بر اساس مرور مطالعات آزمایشگاهی اخیر، مشخصات تأثیرگذار سطح در فرایند جوشش به ترتیب پارامترهای تخلخل، ترشوندگی و زبری می باشد 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، احمدي و همكارانش [8] تأثير ترشوندگي سطح و سليماني 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 هسته های فعال حباب زایی، افزایش مویینگی و سیال رسانی به سطح، ایجاد جت خروجی در فرار حباب و ... می تواند باعث بهبود فرايند جوشش گردد. سطوح متخلخل دارای تنوع ساختاری زیادی بوده و تمامی آنها باعث بهبود فرایندهای انتقال حرارت نمی گردد.

ğ
n.
ne
n
11
on
f
p
qe
oa
ľ
₿.
8
<u> </u>

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 دندانه-
ای و برآمده از مس نشست کرده ساختند که جوشش هستهای R-12 را بهبود

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

امیر میرزاقیطاقی و همکاران



Fig. 2 a) Schematic of electrode position setup b) Schematic of electrode posited copper شكل a 2 شكل a 2 شماتيك ستاپ انجام فرايند الكترونشست b ساختار شماتيك مس الكترونشست كرده

 $\begin{array}{l} 2H^{+1}+2e^{-1} \rightarrow H_2 \\ Cu^{+2}+2e^{-1} \rightarrow Cu \end{array} \tag{1}$

اتههای مس در سطح کاتد به سرعت تشکیل شده و به صورت دندانههای 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 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) آنیلکاری 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، درابهای 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 الکترود 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 می شود. در فرایند رشد، به سبب توزیع چگالی جریان، تعدادی از حبابهای هیدروژن می توانند در درون رسوب دربند مانده و ساختاری لانه زنبوری شکل با تخلخل بالا بسازند [18].

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 الکترود و غلظت بالای هیدروژن در الکترولیت، باعث به وجود آمدن حبابهای هیدروژنی روی سطح کاتد در طی عملیات نشست میشود. كيم عمليات الكتروشيميايي نشست مس را با چگالي جريان (0.33 تا 1.2 آمپر بر سانتیمتر مربع) برای بهبود بخشیدن جوشش استخری FC-72 انجام داد [14]. یاتیل و همکارانش روش الکترونشست دومرحلهای را برای بهبود فرايند جوشش توسعه دادند و مرحله اول الكترونشست را طي 15 ثانيه انجام دادند [15]. ال-جنک و على نيز لايه متخلخل در ضخامتهاى مختلف بر روى سطح مس به روش الكترونشست نشاندند و تأثير آن را بر جوشش PF-5060 در زوایای مختلف سطح بررسی نمودند [16]. برای بررسی تأثیر زمان عمليات نشست، غلظت الكتروليت و افزودني هاى الكتروليت بر روى ريختساختار نشست شده آزمايشهايي صورت گرفته است [17]. نتايج 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 مویینگی هنوز به طور کامل موردبررسی قرار نگرفته است. همچنین پایداری مکانیکی سطح از اشکالات عمده می باشد که دو مرحله ای نمودن فرایند در این مقاله، راه حلی برای بهبود استحکام میباشد.

هدف این مقاله، توسعه روش الکترونشست برای ساخت سطح متخلخل به منظور بهبود فرایند جوشش استخری می باشد. 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 روبشی¹از 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

2-1- ساخت نمونههای سطح

2-1-1- روش الكترونشست

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. همان گونه 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 الکترود 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 الکتریکی در سلول الکتروشیمیایی برقرار شود، یونهای ⁺²D و ⁺H در محلول الکترولیت تحت دو واکنش کاهشی همزمان در کاتد به صورت زیر قرار می گیرند:

1- Scanning Electrone Microscope (SEM)

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

161

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.12.3.1]

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 ماشین کاری شدهٔ 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 هیدروکلریدریک رقیق قرار داده تا لایه غیرفلزی و ارگانیک روی سطح برداشته شود.

شكل 3 تصویر تجهیزات مربوط به انجام فرایند الكترونشست را نشان میدهد. در این فرایند، آند و كاتد به موازات هم داخل محلول قرار می گیرند و سطح آند را بزرگتر از كاتد و هر دو به صورت دایروی انتخاب میشود تا تقارن حفظ شود. بزرگتری سطح آند باعث میشود جریان به صورت یكنواخت در محلول به كاتد برسد و لایهنشانی یكنواخت باشد. دو قسمت آند و كاتد به صورت كامل در محلول الكترولیت با فاصله 3 سانتیمتر غوطهور شده و به منبع تغذیه متصل شدهاند. برای ایجاد جریان و برقراری مدار الكترولیز از منبع تغذیه متصل شدهاند. برای ایجاد جریان و برقراری مدار برای كالیبره كردن منبع تغذیه از مولتیمتر با دقت 10.0 آمپر استفاده میشود. برای كالیبره كردن 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 كه میزان لایه نشانی مس تحت محدودیت میزان یون های مس در محلول نباشد میزان لایه نشانی مس تحت محدودیت میزان یون های مس در محلول نباشد

در مرحله اول فرایند الکترولیز، ساختار پایه در لایههای متخلخل شکل می گیرند 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 میلی آمپر بر سانتی مترمربع 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، پایداری سطح افزایش یافته و همچنین نانودندانهها بر روی سطح شکل می گیرند. 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

Fig. 3 Electrode position equipments

شكل 3 تصوير تجهيزات فرايند الكترونشست



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 پیش گرم 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 لبویو ¹ 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 آن ها شار حرارتی
گذرا از سطح تقریب زده شود. یک ترموکوپل هم داخل سیال قرار داده میشود

1- LabView

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

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

تا دمای اشباع آب را اندازه گیری 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- اندازه گیری دما و عدم قطعیت دادهها

(3)

شار حرارتی عبوری از میله مسی و سطح آزمون که در شکل 5 نشان داده شده است، توسط قانون فوریه پیش بینی می شود. به واسطه وجود پشم شیشه در اطراف میله مسی، می توان انتقال حرارت در این میله را به صورت یک بعدی با معادله (2) در نظر گرفت:

$$q_z'' = -k\frac{dT}{dz} \tag{2}$$

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:

$$T = a + bz$$

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

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

$$b = \frac{1}{\Delta} \left(\sum_{i=1}^{n} \sum_{\sigma_{T_i}} \frac{z_i r_i}{\sigma_{T_i}^2} - \sum_{i=1}^{n} \frac{z_i}{\sigma_{T_i}^2} \sum_{i=1}^{n} \frac{r_i}{\sigma_{T_i}^2} \right)$$
(b-4)

$$\Delta = \sum_{i} \frac{1}{\sigma_{T_i}^2} \sum_{i} \frac{z_i}{\sigma_{T_i}^2} - \left(\sum_{i} \frac{z_i}{\sigma_{T_i}^2}\right)$$
(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:

$$q'' = k \star b \star \frac{A_1}{A} \tag{5}$$

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

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

این عدم قطعیتها دلایل مختلفی مانند موارد ذیل دارد:

- عدم اتصال صحيح ترمو كوپل ها به بدنه (با توجه روند آزمايش اين مسأله برطرف شده است)











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

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

سطح جوشش همان طور 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 می شود:

$$T_{\rm s} = T_1 - \frac{\mathbf{4}q_z}{\pi r^2 kh} \tag{9}$$

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

$$\sigma_{T_s} = \left(\left(\sigma_{T_1} \right)^2 + \left(\frac{4\sigma_{q_z}}{\pi r^2 k} \left(\frac{1}{h} \right) \right)^2 + \left(\frac{4q_z \sigma_h}{\pi r^2 k} \left(\frac{1}{h^2} \right) \right)^2 \right)^{-1}$$
(10)
a a c (10)
a a c (10)
a a c (20)
a c (20)
b (20)
c (

- 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:

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

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12



ضخامت نمونهها	باني و	لايه نش	فلز	2 جرم	جدول
---------------	--------	---------	-----	-------	------

Table 2 Mass of electrodeposited copper and thickness	

لمونه چهارم	مونه سوم	نمونه دومن	ونه اول	نم
240	68	191	21	جرم لایەنشانی (mgr)
77	22	61	6	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 نمی شود. همان گونه که مشاهده می شود، 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 تقریبا 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 می-تواند به راحتی در آن جابجا شود. این حفرهها خصوصا 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 مویین، باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی و شار حرارتی بحرانی شوند. نانوساختارهای سطح در نمونه چهارم بیشتر مشهود می-باشند اما سطح دوم در مقیاس نانو، ساختارهای هموارتری دارد.

3-1-3- جرم الكترونشست شده بر روى 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 نشانده شده تعیین می گردد:

$M = \frac{IIA}{zF}$	(11)
ی جرم الکترونشست شده و چگالی طبق	و همچنین، مقدار ضخامت لایه از روی
	رابطه (12) به دست میآید:
$h = \frac{M}{s \rho}$	(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 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 1-0 و یا به صورت درصدی 100%-0 میباشد. معادله (13) نحوه محاسبه تخلخل را نشان میدهد:



Fig. 7 SEM pictures of two-stage porous structures in differentmagnifications a) sample No.2 (30sec) b) sample No.4 (100sec).30 شكل 7 تصاوير SEM از ساختارهاى متخلخل دومرحلهاى الف) نمونه دوم (زمان 30ثانيه) و ب) نمونه چهارم (زمان 100 ثانيه) در بزرگنمايىهاى مختلف

جدول 3 مقدار تقریبی تخلخل نمونهها و ضخامت واقعی

Table 3 Porosity estimation of samples and real thickness

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

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

(13) $\Phi = V_V / V_T$

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 ایمیججی¹استفاده میشود. جدول 3 اطلاعات مربوط به تخلخل در چهار نمونه را مقایسه می کند.

نمونههای تکمرحلهای دارای تخلخل بیشتری بوده و به دلیل وجود این فضاهای خالی، شکنندهتر نیز میباشد. نمونه چهارم به دلیل زمان بیشتر الكترونشست در مرحله اول، تخلخل كمترى داشته و ديواره 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، اندازه گیری مینماید. پارامترهای زبری مربوط به چهار سطح در شکل 8 نشان داده شده است. همان طور مشاهده می شود با اصلاح فرایند الكترونشست از نمونهى اول تا چهارم عمق حفرهها افزایش یافته و ارتفاع برآمدگیها کاهش می یابد. بیشترین اختلاف ارتفاع در نمونهها حدود 90 ميكرومتر با تغييرات 10 ميكرومتر ميباشد. تفاوت عمده بين 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



3-2- منحنى جوشش استخرى

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 مي باشد. البته پيوند بين ساختار و سطح به قدري بود كه تا پايان آزمون جوشش، ساختار از روی سطح جدا نمی شد. بدین صورت منحنی جوشش بر حسب سوپرهیت دیواره برای سطوح متخلخل در مقایسه با سطح صاف پولیش شده استخراج می شود.

همان طور که در منحنی های جوشش شکل 9 مشاهده می شود، 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 می شود، به مقدار زیادی افزایش داشته است. همچنین شار حرارتی بحرانی که البته در این آزمایش با حاشیهای شناسایی شده است، افزایش داشته است.











1- Imagej

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

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 می دهد و به هم پیوستگی حبابها در شارهای بیشتری رخ می دهد. این عملکرد به دلایل تخلخل بیشتر سطح، ضخامت و مقاومت رسانشی کمتر، ارتباط بیشتر حفرهها به یکدیگر و افزایش مویینگی سطح می باشد. در شکل 10 حبابهای تشکیل شده بر روی سطح دوم در شارهای حرارتی مختلف نشان داده شده است. دینامیک حباب بدین گونه بوده است که از ابتدای فرایند، حبابهای بسیار ریز با فرکانس بالا از روی سطح جدا می شدند که این حالت در سطح صاف پولیش شده مشاهده نمی شد. قطر متوسط حبابها در شار حرارتی 400/cm² حدود 3 میلی متر بود. با افزایش شار، قطر جدایش حبابها افزایش می یافت ولی در شار حدود ای مجزا وجود داشت.

4 - نتيجه گيري

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 شکل گیری 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 فرایند جوشش استخری در مقایسه با سایر سطوح استخراج گردید. نتایج نشان میداد که جوشش در سطوح متخلخل در سوپرهیتهای کمتری شروع نشان میداد که جوشش در سطوح متخلخل در سوپرهیتهای کمتری شروع فرایش میده و ضریب انتقال حرارت را به میزان زیادی نسبت به سطح معمولی افزایش میدهد.

5- فهرست علايم

عدد جرمی فلز (grmol ⁻¹)	A
مساحت سطح جوشش (m ²) .	A

- حداکثر ارتفاع برآمدگیها (µm)
- میانگین هندسی قدر مطلق عمقها و ارتفاعها (µm)
 - (μ m) حداکثر اختلاف ارتفاع R_t
 - (μm) حداکثر عمق فرورفتگیها (μm
 - s مساحت سطح الكترونشست (cm²)
 - ∆*T*s سوپرهیت دیواره (°C)
 - t مدت زمان فرایند (sec)
 - (m³) حجم کل *V*_T
 - $V_{\mathcal{V}}$ حجم حفره (m³)
- تعداد الکترون های شرکت کننده در واکنش کاهش (e)
 - علايم يوناني

Ζ

 R_p

Ra

- تخلخل Φ
- ρ چگالی (grcm⁻³)
 - واريانس σ

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.

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12

مساحت سطح بلوک مسی (m²) A_2 عرض از مبداء دما (°) а گرادیان دما ([°]cm⁻¹) b ثابت فارادی (Ne⁻¹) F فاصله ترموكوپل 1 تا سطح جوشش (m) h ضخامت لايه (cm) h جریان الکتریکی فرایند (Wm⁻¹K⁻¹) 1 جرم فلز الكتروليز شده (gr) М میانگین حسابی قدر مطلق عمقها و ارتفاعها (µm) Ra

امیر میرزاقیطاقی و همکاران

بهبود جوشش استخرى با ايجاد ميكرو/نانوساختارهاى متخلخل الكترونشست شده *ر*وى سطح مس

- [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 maximaize 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 dishlike 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.

167

مهندسی مکانیک مدرس، اسفند 1394، دورہ 15، شمارہ 12