تأثیر روش‌های پوشش‌دهی نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون بر بهبود شار حرارت بحرانی

عارف رحیمیان^۱، حسین کاظمی‌نژاد^{۲*}، حسین خلفی^۱، اعظم اخوان^۲، سیدمحمد میروکیلی^۱

۱. پژوهشکده‌ی راکتور و ایمنی هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران
۲. پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۱۵۵-۱۳۳۹، تهران - ایران

*Email: hkazeminejad@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۲/۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۱۰/۱

چکیده

در این مطالعه از دو روش پوشش‌دهی نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون (SiO_2)، جوشش استخری و الکتروفوریتیک، جهت افزایش شار حرارت بحرانی نوارهای استیل مورد استفاده قرار گرفته است. در هر یک از این دو روش، پوشش‌دهی در مدت زمان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها انجام شده و با بررسی تصاویر SEM و EDS گرفته شده، زاویه تماس اندازه‌گیری شده است. با استفاده از این دو روش، سطوح آب‌دوست و فوق‌آب‌دوست ایجاد شده، منحنی جوشش و شار حرارت بحرانی محاسبه شده و با روابط تجربی و تحلیلی موجود مقایسه گردید. نتایج نشان داد که زاویه تماس برای سطوح پوشش‌دهی شده به روش جوشش استخری کمتر از روش الکتروفوریتیک است و در نتیجه شار حرارت بحرانی به مقدار قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. هم‌چنین مقایسه نتایج شار حرارتی بحرانی حاضر با نتایج تجربی که تابعی از خواص سطح می‌باشند، هم‌خوانی بهتری را نشان داد.

کلیدواژه‌ها: پوشش به روش جوشش استخری، پوشش به روش الکتروفوریتیک، شار حرارت بحرانی

Effect of nano-particle coating techniques of SiO_2 on improvement of Critical Heat Flux

A. Rahimian¹, H. Kazeminejad^{2*}, H. Khalafi¹, A. Akhavan², M. Mirvakili¹

1. Reactor and Nuclear Safety Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, P.O.Box: 14155-1339, Tehran – Iran
2. Radiation Application Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI, P.O.Box: 1339-14155, Tehran – Iran

Research Article

Received 21.4.2019, Accepted 22.12.2019

Abstract

In this study, two methods of nano-particle coating, by boiling and electrophoretic, have been used to investigate the effect of surface modification on the Critical Heat Flux of stainless steel plates. In each of these two methods, the coating was performed for 20, 40, and 60 minutes while other parameters remained constant. The SEM¹ and EDS² images were captured and then the contact angles were measured using the Stadler technique to study the effect of surface properties on Critical Heat Flux. Finally, the boiling curves of the hydrophilic and superhydrophilic surfaces were obtained and then the Critical Heat Flux (CHF) is determined. The CHF values were compared with the existing experimental data and empirical correlations. It was found that the CHF for nanoparticle coating by pool boiling, is significantly higher than those of electrophoretic coating. Also, a comparison of the present Critical Heat Flux results with those obtained by the empirical correlations that are a function of surface properties showed better agreement.

Keywords: Pool boiling coating, Electrophoretic coating, Critical heat flux

۱. مقدمه

از زمانی که جاکوب و فریتز [۱] به تأثیر فراوان ساختار سطح بر افزایش انتقال حرارت جوشش پی بردند، مطالعات بسیاری در راستای ایجاد ساختارهای میکرومتری با روش‌های مختلف صورت پذیرفته است [۲-۴]. به طور کلی هدف از بهبود سطح، کنترل دو مشخصه مستقل از سطوح حرارتی می‌باشد: شیمی سطح و هندسه سطح، که به صورت مستقیم پارامترهای انتقال حرارت جوشش را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

با پیشرفت در نانو تکنولوژی و مهندسی سطوح، امروزه نانوساختارهای متنوعی جهت بهبود انتقال حرارت جوشش و شار حرارت بحرانی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته است [۵-۷]. این بهبود سطوح به واسطه پوشش ذرات نانومتری مانند فلزات، اکسیدهای فلزی و آلوتروپ‌های کربن می‌باشد. سطوحی که این ذرات نانومتری بر آن‌ها می‌نشینند نسبت به سطوح بدون پوشش، پارامترهای انتقال حرارت جوشش (از قبیل دانسیته مکان هسته‌ها، فرکانس جدایش حباب و مکش‌های مویینگی) افزایش بیشتری را نشان می‌دهند. از سوی دیگر سطوحی که در ناحیه انتقال حرارت جوشش هسته‌ای کار می‌کنند، محدود به شار حرارت بحرانی می‌باشند. زمانی که شار حرارت بحرانی اتفاق می‌افتد لایه‌ای از بخار، سطح حرارت‌دهنده را به صورت کامل می‌پوشاند و ضریب انتقال حرارت به شدت کاهش می‌یابد. این که سیستم‌ها و نیروگاه‌ها جهت جلوگیری از افزایش ناگهانی دما و تخریب سطوح حرارتی، پایین‌تر از محدوده شار حرارت بحرانی باشند، بسیار حایز اهمیت است. بنابراین افزایش این محدوده سبب افزایش ایمنی، افزایش نرخ انتقال حرارت و یا کاهش اندازه سیستم حرارتی با ثابت نگه داشتن ظرفیت حرارتی آن می‌شود. به طور مثال بونجورینو و همکاران [۸] نشان دادند که با افزایش ۳۲٪ شار حرارت بحرانی، توان کارکردی رآکتورهای هسته‌ای به میزان ۲۰٪ قابل افزایش است.

در پژوهش حاضر، تغییرات شار حرارت بحرانی با استفاده از دو روش پوشش‌دهی جوششی و الکتروفوریتیک مطالعه شده و نتایج به دست آمده با روابط و نتایج تجربی موجود مقایسه شده است.

۲. روش آزمایش

در این مطالعه دو روش پوشش‌دهی مورد استفاده قرار گرفت که هر کدام سازوکار منحصر به فرد خود را دارد. در ابتدا به شرح نحوه پوشش‌دهی هر دو روش اشاره خواهد شد و در ادامه آزمایش‌های جوشش و اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی که در هر دو روش به طور یکسان انجام شده تشریح می‌گردد.

۱.۲ پوشش‌دهی به روش جوشش استخری

در این روش ابتدا نانوسیال تهیه می‌شود. برای دستیابی به سوسپانسیونی همگن از نانوسیال، ابتدا میزان مورد نیاز نانوذرات را در آب دیونیزه ریخته و مخلوط ذرات و سیال را به صورت مکانیکی هم زده و در ادامه جهت همگن‌تر شدن آن، با استفاده از دستگاه آلتراسونیک، به مدت ۳۰ دقیقه هم‌زده می‌شود. سپس جهت پوشش در این روش، دمای نانوسیال را به دمای جوش رسانده و نوار استیل که به الکترودهای منبع DC وصل شده، در آن قرار داده می‌شود. در این حالت جریان الکتریکی برقرار می‌گردد. این جریان به شکلی است که شار حرارتی ایجاد شده توسط آن کمتر از شار حرارتی بحرانی می‌باشد. این جریان در مدت زمان ۲۰، ۴۰ و ۶۰ دقیقه برقرار می‌شود.

۲.۲ پوشش‌دهی به روش الکتروفوریتیک

برای دستیابی به سوسپانسیونی همگن از نانوسیال، مراحل توضیح داده شده در بخش قبلی تکرار می‌شود. کارلوت [۹] بیش‌ترین میزان زتاپتانسیل (-30 ± 5 mV) را برای نانوسیال SiO_2 در PH برابر ۱۰ محاسبه نمود. در این آزمایش نیز PH سیال همین مقدار قرار داده شد. جهت رسیدن به این PH، یعنی رسیدن به یک محیط قلیایی، از محلول آبی NaOH استفاده می‌شود.

در این آزمایش از نوارهای نازک استیل به طول ۹۰ mm و عرض ۴ mm استفاده شده است. تجهیزاتی که به منظور پوشش‌دهی به روش الکتروفوریتیک مورد استفاده قرار گرفته، در شکل ۱ نشان داده شده است. از دو نوار مشابه به ابعاد ذکر شده که به دو سر الکترودها وصل شده، استفاده می‌گردد. فاصله بین این دو نوار ۵ mm می‌باشد. الکترودها به یک منبع

شکل ۱. طرح‌واره‌ای از دستگاه پوشش‌دهی به روش الکتروفوریتیک.

شکل ۲. طرح‌واره‌ای از سیستم اندازه‌گیری شار حرارتی جوشش استخری و شار حرارت بحرانی.

شار حرارتی را نیز می‌توان با افزایش ولتاژ افزایش داد، که مقدار آن به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q'' = \frac{IV}{A} \quad (3)$$

در این رابطه I جریان الکتریکی، V ولتاژ و A سطح مقطع نوار را نشان می‌دهند. با اندازه‌گیری ولتاژ و جریان، شار حرارتی بحرانی محاسبه می‌گردد.

۴.۲ آنالیز عدم قطعیت

در بخش ۳.۲ نحوه محاسبه شار حرارتی با استفاده از رابطه (۳) ارایه شد. جهت بررسی عدم قطعیت در محاسبه شار حرارت بحرانی از رابطه (۴) استفاده می‌شود [۱۰]:

تغذیه DC با محدوده ولتاژ ۰ تا ۵۰ ولت وصل شده است. با توجه به منفی بودن زتاپتانسیل، پوشش بر روی نوار که به آند متصل باشد، ایجاد می‌شود. پس از اتمام پوشش‌دهی، ۲۴ ساعت زمان برای خشک شدن کامل پوشش لازم است.

۳.۲ اندازه‌گیری شار حرارت بحرانی

وسایل اندازه‌گیری انتقال حرارت جوشش و شار حرارت بحرانی در شکل ۲ نمایش داده شده است. تجهیزاتی که در این آزمایش مورد استفاده قرار گرفته است شامل یک ظرف آب، گرم‌کننده در زیر ظرف، ترمومتر جهت اندازه‌گیری دمای سیال و یک منبع تغذیه DC می‌باشد. دمای نوارها در زمان آزمایش با استفاده از روش ضریب دمایی مقاومت اندازه‌گیری می‌شود. ضریب دمایی مقاومت به صورت نسبت تغییر در مقاومت به تغییر معادل یک درجه سانتی‌گراد در دما تعریف شده و به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$\frac{R(T)}{R(T_0)} = 1 + \alpha \Delta T \quad (1)$$

با اندازه‌گیری‌های دقیق، مقدار این ضریب برای نوارهای استیل مورد استفاده برابر با $0.00005 \pm 0.00006 \text{ K}^{-1}$ در محدوده دمایی ۲۵ تا ۱۶۰ °C تعیین شده است. به دلیل رسانایی بالای نوار و همچنین کوچک بودن ضخامت آن، عدد بایوت شرط آنالیز لامپ کمتر از ۰.۱ را برآورده می‌کند. عدد بایوت از رابطه $Bi = hd/k$ محاسبه شده و مقدار آن ۰.۱۰۱ و از مقدار ۰.۱ کمتر می‌باشد. در این رابطه، h ضریب انتقال حرارت، d ضخامت نوار و k ضریب انتقال حرارت هدایت است. بنابراین آنالیز لامپ می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. از این‌رو:

$$q'' = h_{eff} (T_W - T_{sat}) \quad (2)$$

بالا بودن عدم قطعیت در دمای فوق اشباع و ضریب انتقال حرارت ناشی از اندازه‌گیری غیرمستقیم دما است. در مطالعات دیگر نیز که از این روش استفاده شده است، مقدار عدم قطعیت برای ضریب انتقال حرارت ۱۲٪ گزارش شده است [۱۱].

۳. نتایج

پس از پوشش‌دهی و قبل از انجام آزمایش شار حرارتی بحرانی، عکس‌های SEM^۱ از سطوح گرفته شده و مورفولوژی سطوح مورد بررسی قرار می‌گیرد. در شکل ۳ عکس‌های SEM گرفته شده پس از پوشش‌دهی به دو روش جوشش استخری و الکتروفوریتیک نشان داده شده است.

روش دیگری که برای بررسی سطوح در این مطالعه به کار رفته است، اندازه‌گیری زاویه تماس قطره با سطح می‌باشد. میزان زاویه تماس قطره با سطح بیان‌گر میزان آب‌دوستی یا آب‌گریزی سطح می‌باشد. با توجه به اندازه‌گیری‌های انجام شده، مشاهده شد که پوشش SiO₂ بر روی سطوح سبب افزایش آب‌دوستی سطح می‌گردد. در جدول ۲ میزان زاویه تماس در حالت‌های مختلف گزارش داده شده است.

در جدول ۲ زاویه تماس توسط دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس (SHARIFSOLAR/CA-۵۰۰A) اندازه‌گیری شده است و در تمامی حالت‌ها قطرهای به حجم ۲ μL بر سطح قرار داده شده و زاویه تماس آن اندازه‌گیری می‌شود. نمایی از این دستگاه در شکل ۴ نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، در روش نشست الکتروفوریتیک با افزایش زمان نشست، زاویه تماس کمتر شده یا به عبارتی سطح نسبت به حالت بدون پوشش آب‌دوست‌تر شده است. روش الکتروفوریتیک به پارامترهای زیادی از جمله میزان ولتاژ اعمالی، زتاپتانسیل و غلظت نانوسیال بستگی دارد. در این آزمایش همه عوامل تأثیرگذار بر این روش ثابت و بدون تغییر در نظر گرفته شده و تنها عامل تأثیرگذار زمان نشست در نظر گرفته می‌شود.

در روش جوشش استخری میزان آب‌دوستی افزایش چشمگیری داشته و به عبارت دیگر سطح فوق‌آب‌دوست شده است. جهت بررسی دقیق‌تر آنالیز EDS^۲ انجام شده است. در شکل ۵ آنالیز EDS برای سطح پوشش داده شده با هر دو روش نشان داده شده است.

$$\frac{w_{q^*}}{q''} = \sqrt{\left(\frac{w_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{w_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{w_A}{A}\right)^2} \quad (۴)$$

با استفاده از این رابطه ولتاژ، جریان و سطح مقطع به صورت دقیق محاسبه می‌گردند. عدم قطعیت در ولتاژ و جریان به اندازه ۱٪ درصد در سطح مقطع ۱/۱٪ می‌باشد و در در شار حرارتی، برابر ۱/۸٪ می‌باشد.

به منظور به دست آوردن عدم قطعیت، دمای فوق اشباع به صورت زیر تبدیل می‌شود:

$$\Delta T = \left(\frac{R}{R_0} - 1\right) \alpha \quad (۵)$$

در نهایت با جای‌گذاری $R = \frac{V}{I}$ ، عدم قطعیت دمای فوق اشباع به صورت زیر بیان می‌شود:

$$w_{\Delta T} = \left[w_V^2 \left(\frac{\alpha I_0}{IV_0}\right)^2 + w_I^2 \left(\frac{-\alpha IV_0}{IV_0^2}\right)^2 + w_{I_0}^2 \left(\frac{V \alpha}{IV_0}\right)^2 + w_V^2 \left(\frac{-\alpha IV_0}{IV_0^2}\right)^2 + w_A^2 \left(\frac{VI_0}{IV_0^2} - 1\right)^2 \right]^{1/2} \quad (۶)$$

با محاسبه رابطه (۶)، مشخص می‌شود که عدم قطعیت دمای فوق اشباع کم‌تر از ۱۵٪ است. همچنین عدم قطعیت برای ضریب انتقال حرارت ۱۶٪ به دست می‌آید. عدم قطعیت پارامترهای مختلف در جدول ۱ گزارش شده است.

جدول ۱. پارامترهای کاری و عدم قطعیت

پارامتر	عدم قطعیت (%)
سطح (cm ^۲)	۱/۱
ولتاژ (V)	۱
جریان (A)	۱
شار حرارتی (KW.m ^{-۲})	۱/۸
دمای فوق اشباع (K)	۱۵
ضریب انتقال حرارت (W.m ^{-۲} .K ^{-۱})	۱۶

1. Electron Scanning Microscope
2. Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy

(الف)

(ب)

شکل ۳. نمونه‌ای از عکس‌های SEM گرفته شده (الف) روش جوش استخري (ب) روش الکتروفورتيک.

شکل ۴. دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس.

جدول ۲. میزان زاویه تماس در حالت‌های مختلف

زاویه تماس (°)	ضخامت پوشش (nm)	حالت‌های مختلف نوار استیل
۸۸٫۴	-	سطح بدون پوشش
۷۷٫۴	۵۲٫۷۳	۲۰ دقیقه
۶۳٫۵	۷۰٫۳۱	۴۰ دقیقه
۴۵٫۵	۸۲٫۲۴	۶۰ دقیقه
۱۵ ~	۴۰۵٫۷۱	۲۰ دقیقه
۵ ~	۶۴۶٫۰	۴۰ دقیقه
۱ ~	۸۸۸٫۰۳	۶۰ دقیقه

شکل ۵. آنالیز EDS برای سطوح پوشش داده شده، (الف) پوشش‌دهی به روش جوشش استخری (ب) پوشش‌دهی به روش الکتروفروریک.

همان‌طور که در شکل ۵ الف نشان داده شده است، در روش پوشش‌دهی به روش جوشش استخری در میان عناصر، عنصر اکسیژن هم به مقدار کافی یافت می‌شود و این ممکن است به خاطر اکسایش سطح در زمان پوشش‌دهی باشد. این افزایش اکسیژن بر روی سطح سبب کم‌تر شدن زاویه تماس و در نتیجه باعث آب‌دوست شدن سطح و پیوندهای هیدروژنی که اکسیژن با مولکول‌های آب ایجاد می‌کند است که سبب جذب بیش‌تر آب با سطح می‌گردد.

در این قسمت نتایج انتقال حرارت جوشش برای سطوح مورد آزمایش به دو روش پوشش‌دهی ارایه می‌گردد. شکل‌های ۶ و ۷ منحنی‌های جوشش و تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به شار حرارتی برای سطوح بدون پوشش و با پوشش را برای دو روش پوشش‌دهی موردنظر نشان می‌دهند.

مشاهده می‌شود که در هر دو روش، با افزایش زمان پوشش‌دهی و یا افزایش ضخامت لایه پوشش، شار حرارت بحرانی افزایش می‌یابد و باعث افزایش درجه فوق داغ سطح (یا کاهش ضریب انتقال حرارت) می‌گردد. این افزایش شار حرارت بحرانی به دلیل افزایش ضخامت پوشش در مطالعات دیگری نیز مشاهده و گزارش شده است [۱۲-۱۵]. البته افزایش شار حرارت بحرانی با افزایش ضخامت پوشش، دارای بیشینه‌ای است که مقدار آن توسط تریولت فرایند و همکاران [۱۲] در حدود $2 \mu\text{m}$ گزارش شده است. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر، ضخامت نشست نانوذرات در هر دو روش کم‌تر از $1 \mu\text{m}$ می‌باشد.

شکل ۶. (الف) نمودار جوشش (ب) ضریب انتقال حرارت نسبت به شار حرارت در روش پوشش دهی جوشش استخری.

شکل ۷. (الف) نمودار جوشش، (ب) ضریب انتقال حرارت نسبت به شار حرارت در روش پوشش دهی جوشش استخری.

به منظور بررسی بیش تر، مقایسه ای بین نتایج شار حرارتی اندازه گیری شده و نتایج تحلیلی انجام شده است. بیش تر این روابط فقط تابعی از خواص فیزیکی سیال و مستقل از پارامترهای سطح می باشند. یکی از روابطی که مورد توجه قرار گرفته، رابطه زوبر [۱۶] است که بر اساس تئوری ناپایداری هیدرو دینامیکی بیان می شود و به صورت زیر است:

$$q_{CHF}'' = K \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \quad (7)$$

که در آن K به هندسه جسم بستگی دارد. اما همان طور که در شکل ۶ الف مشاهده می شود، با تغییر در پارامترهای سطح، شار حرارت بحرانی افزایش داشته و نمی توان آن را فقط با استفاده از خواص فیزیکی سیال به دست آورد.

یکی از روابطی که در طی سال های اخیر ارایه شده و شار حرارت بحرانی را به پارامترهای سطح مرتبط می کند، رابطه کندلیکار [۱۷] است که به صورت زیر بیان می شود:

$$q_{CHF}'' = \rho_g^{1/4} h_{fg} \left(\frac{1 + \cos \beta}{16} \right) \times \left[\frac{2}{\pi} + \frac{\pi}{4} (1 + \cos \beta) \cos \phi \right]^{1/4} \left[\sigma g (\rho_f - \rho_g) \right]^{1/4} \quad (8)$$

رابطه دیگری در این راستا رابطه لیاوو [۱۸] است که به صورت زیر بیان می شود:

$$q_{CHF}'' = \left[1 + \frac{55 - \theta}{100} (0.56) \right] \rho_g h_{fg} \left[\frac{g \sigma (\rho_f - \rho_g)}{\rho_g^2} \right]^{1/4} \quad (9)$$

در شکل ۸ نتایج شار حرارت بحرانی به دست آمده در این مطالعه با نتایج حاصل از روابط ذکر شده و دو داده تجربی دیگر مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود، رابطه زوبر مقدار ثابتی را نشان می دهد و مستقل از زاویه تماس می باشد. روابط کندلیکار و لیاوو ضمن این که روند افزایش شار حرارت بحرانی را تا حدود زیادی به خوبی نشان می دهند، اما پیش بینی آن ها کمی بیش تر از داده های تجربی است. نتایج به دست آمده در این آزمایش با نتایج تجربی دهیر و لیاوو [۱۹] سو و چن [۲۰] (که نانو ذرات SiO_2 در غلظت های متفاوت را بر صفحات مسی نشانده و زوایای تماس متفاوتی به دست آورده بودند) نزدیک تر است.

مراجع

1. M. Jakob, W.F. Fritz, *Versuche uber den verdampfungsvorgang*, *Forsch. Ingenieurwes.* **2**(12), 435-447 (1931).
2. V.K. Dhir, *Boiling heat transfer*, *Annu. Rev. Fluid Mech.* **30**, 365-401 (1998).
3. I.L. Pioro, W. Rohsenow, S.S. Doerffer, *Nucleate pool-boiling heat transfer. I: review of parametric effects of boiling surface*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **47** (23), 5033-5044 (2004).
4. R.L. Webb, *The evolution of enhanced surface geometries for nucleate boiling*, *Heat Transfer Eng.* **2** (3-4), 46-69 (1981).
5. S.G.K. Yen-Wen Lu, *Nanoscale surface modification techniques for pool boiling enhancement—a critical review and future directions*, *Heat Transfer Eng.* **32** (10), 827-842 (2011).
6. M. Shojaeian, A. Kosar, *Pool boiling and flow boiling on micro- and nanostructured surfaces*, *Exp. Therm. Fluid Sci.* **63**, 45-73 (2015).
7. S. Bhavnani, et al, *Boiling augmentation with micro/nanostructured surfaces: current status and research outlook*, *Nanoscale Microscale Thermophys. Eng.* **18** (3), 197-222 (2014).
8. J. Buongiorno, et al, *Nanofluids for enhanced economics and safety of nuclear reactors: an evaluation of the potential features*, *Issues, and Research Gaps, Nucl. Technol.* **162**, 80-91 (2008).
9. A. Charlot, X. Deschanel, G. Toquer, *Submicron coating of SiO₂ nanoparticles from electrophoretic deposition*, *Thin Solid Films*, **553**, 148-152 (2014).
10. S.J. Kline, F.A. McClintock, *Describing uncertainties in single-sample Experiments*, *Mech. Eng.* P. 3, (January 1953).
11. E. Forrest, et al, *Augmentation of nucleate boiling heat transfer and critical heat flux using nanoparticle thin-film coatings*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **53**, 58-67 (2010).
12. M. Tetreault-Friend, et al, *Critical heat flux maxima resulting from the controlled morphology of nanoporous hydrophilic surface layers*, *Appl. Phys. Lett.* **108** (24), 243102 (2016).
13. S.M. Kwark, et al, *Nanocoating characterization in pool boiling heat transfer of pure water*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **53** (21-22), 4579-4587 (2010).
14. H.S. Ahn, J.M. Kim, M.H. Kim, *Experimental study of the effect of a reduced graphene oxide coating on critical heat flux enhancement*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **60**, 763-771 (2013).
15. J.M. Kim, et al, *Effect of a graphene oxide coating layer on critical heat flux enhancement under pool boiling*, *Int. J. Heat Mass Transfer*, **77**, 919-927 (2014).
16. N. Zuber, *Hydrodynamic aspects of boiling heat transfer*, *AECU-4439, Atomic Energy Commission*, (1959).

شکل ۸. مقایسه نتایج شار حرارت بحرانی به دست آمده با روابط و داده‌های تجربی دهیر و سو [۱۵، ۱۶].

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از دو روش پوشش‌دهی جوش استخری و الکتروفوریتیک، پوشش‌هایی از نانوذره SiO₂ بر نوارهایی از جنس استیل ایجاد شد. نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی نمود:

- پوشش‌دهی ذرات SiO₂ به وسیله دو روش جوش استخری و الکتروفوریتیک می‌تواند سطوحی آب‌دوست با زوایای تماس متنوع ایجاد کند. این زوایای تماس در پوشش‌دهی به روش الکتروفوریتیک می‌تواند با کنترل بیش‌تری صورت پذیرد.
- در پوشش‌دهی به روش جوش استخری به واسطه اکسایش سطح، پیوندهای هیدروژنی بیش‌تری بین سطح و مولکول‌های آب ایجاد شده و سطح به حالت فوق آب‌دوست تبدیل می‌شود.
- شار حرارت بحرانی در هر دو روش پوشش‌دهی، افزایش قابل‌توجهی (۱۳۰٪) را نشان می‌دهد.
- روابط موجود که برای محاسبه شار حرارت بحرانی در نرم‌افزارهای مختلف از آن‌ها استفاده شده (نظیر رابطه زویر)، به دلیل مستقل بودن از پارامترهای سطح، به طور کم‌تری منطبق با مقادیر تجربی می‌باشند.
- روابط جدید (کندلیکار و لیاوو) که تابعی از پارامترهای سطح هستند، کمی فراتر از داده‌های تجربی پیش‌بینی می‌کنند.
- نتایج به دست آمده در این پژوهش نزدیک‌تر به نتایج تجربی دهیر و لیاوو، سو و چن می‌باشند.

17. S.G. Kandlikar, *A Theoretical model to predict pool boiling CHF incorporating effects of contact angle and orientation*, *J. Heat Transfer*, **123**, 1071-1079 (2001).
18. L. Liao, R. Bao, Z.H. Liu, *Compositive effects of orientation and contact angle on critical heat flux in pool boiling of water*, *Heat Mass Transfer*, **44**, 1447-1453 (2008).
19. V.K. Dhir, S.P. Liaw, *Framework for a unified model for nucleate and transition pool boiling*, *J. Heat Transfer*, **111**, 739-746 (1989).
20. C.C. Hsu, P.H. Chen, *Surface wettability effects on critical heat flux of boiling heat transfer using nanoparticle coatings*, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **55**, 3713-3719 (2012).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

استناد به این مقاله

عارف رحیمیان، حسین کاظمی نژاد، حسین خلفی، اعظم اخوان، سیدمحمد میروکیلی (۱۳۹۹)، تأثیر روش‌های پوشش‌دهی نانوذرات دی‌اکسید سیلیکون بر بهبود شار حرارت بحرانی، ۹۴، ۶۵-۷۳

DOI: 10.24200/nst.2021.1171

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1171.html