

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

بررسی تجربی اثر پوشش‌های نانو ساختار بر انتقال حرارت در جوشش استخری

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

داود سعیدی

استاد راهنما

دکتر علی اکبر عالم رجبی

پاییز ۱۳۹۰



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

داود سعیدی تحت عنوان

بررسی تجربی اثر پوشش‌های نانو ساختار بر انتقال حرارت در جوش استخری

در تاریخ ۱۳۹۰/۹/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|-------------------------|-------------------------------|
| دکتر علی اکبر عالم رجبی | ۱- استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر محسن نصر اصفهانی | ۲- استاد مشاور پایان نامه |
| دکتر احمد صابونچی | ۳- استاد داور |
| دکتر محمد رضا سلیم پور | ۴- استاد داور |
| دکتر محمد رضا سلیم پور | سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده |

بسم الله رحمان رحيم

حمد و سپاس ايزد يكتا را كه در سايه الطاف و عنايات او ياراي رسيدن به اين مرحله را يافتم، باشد كه با قدم برداشتن در مسير حق در آينده، شكر گذار او باشم.

بر خود لازم مي دانم از جناب آقاي دكتور علي اكبر عالم رجبی كه با راهنمایی های ارزشمندشان در پيشبرد اين پروژه نقش بسزایی داشتند و از جناب آقاي دكتور محسن نصر اصفهانی كه مشاوره های سودمندشان، در به پايان رساندن اين پژوهش دلگرم كننده بود، تشكر كنم.

شايسته است از زحمات اساتيد بزرگوارم آقاي دكتور احمد صابونچي، دكتور احمد صداقت و دكتور محمد رضا سليم پور كه افتخار شاگردیشان را داشته و از تجربيات گرانبهائشان بهره ها بردم، قدردانی كنم.

در پايان نيز خانواده عزيز و دوستان گرانقدرم را سپاس مي گويم كه مشوق، همراه و دلگرم كننده من در اتمام اين پژوهش بودند.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست

چکیده	۱
فصل اول مقدمه و مروری بر منابع	۲
مقدمه	۲
۱-۱- بررسی اثر پوشش های نانو ساختار بر انتقال حرارت در جوشش استخری	۲
۲-۱- تعریف مسئله	۲
۳-۱- اهداف این مطالعه	۳
۴-۱- روش اجرای طرح	۳
۵-۱- افزایش انتقال حرارت	۳
۶-۱- جوشش	۴
۷-۱- انواع جوشش	۵
۸-۱- جوشش استخری	۶
۹-۱- رژیم های جوشش استخری	۷
۱-۹-۱- جوشش با جابجایی آزاد	۸
۲-۹-۱- جوشش هسته ای	۸
۳-۹-۱- جوشش انتقالی یا گذار	۹
۴-۹-۱- جوشش فیلمی	۱۰
۱۰-۱- روابط جوشش استخری	۱۰
۱-۱۰-۱- جوشش هسته ای استخری	۱۱
۲-۱۰-۱- شار گرمای بحرانی برای جوشش هسته ای استخری	۱۲
۳-۱۰-۱- شار گرمای مینیمم	۱۳
۴-۱۰-۱- جوشش فیلمی استخری	۱۳
۵-۱۰-۱- تاثیر دیگر پارامترها بر جوشش استخری	۱۴
۱۱-۱- مروری بر کارهای گذشته	۱۵
فصل دوم پوشش دهی	۲۶
۱-۲- آندایزینگ آلومینیم	۲۶

۲۷.....	۱-۱-۲- مکانیزم تشکیل لایه اکسیدی -آندی
۲۸.....	۲-۲- فرآیند آندایزینگ با استفاده از محلول اسید سولفوریک
۲۹.....	۳-۲- آندایز با الکترولیت اسید کرومیک
۳۰.....	۴-۲- فرآیند آندایزینگ با الکترولیت اسید اگزالیک
۳۱.....	فصل سوم مواد و روش ها
۳۱.....	۱-۳- ملاحظات طراحی
۳۴.....	۲-۳- آماده سازی سطح
۳۶.....	۳-۳- نحوه ی نام گذاری
۳۷.....	۴-۳- روش انجام آزمایش
۳۸.....	فصل چهارم بحث و بررسی نتایج
۳۸.....	۱-۴- نحوه انجام محاسبات
۳۹.....	۲-۴- نتایج آزمایش
۴۰.....	۲-۴-۱- زاویه تماس و میزان ترشوندگی
۴۶.....	۲-۴-۲- بررسی سطوح بوسیله تصاویر AFM
۵۵.....	۲-۴-۳- تغییرات شار نسبت به دمای مازاد و ضریب انتقال حرارت
۶۸.....	فصل پنجم نتیجه گیری و خطا
۶۸.....	۱-۵- آنالیز خطا
۷۰.....	۲-۵- نتیجه گیری
۷۱.....	۳-۵- پیشنهادات
۷۲.....	منابع

فهرست جداول

- جدول ۱-۱ مقادیر f, G, S و n برای ترکیب‌های مختلف سیال-سطح ۱۲
- جدول ۴-۱ تغییرات زاویه تماس و شار حرارتی بحرانی برای نمونه‌های مختلف ۴۰
- جدول ۴-۲ مقایسه ی CHF اندازه گیری شده و مقدار محاسبه شده توسط دو معادله کاندلیکار، رابطه (۴-۸)، و تئوری hot/dry spot رابطه (۴-۶) و (۴-۷) ۴۵
- جدول ۴-۳ اطلاعات به دست آمده از تصاویر AFM برای ۶ نمونه ی سطح ۴۸

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ توزیع دما در جوشش اشباع استخری با فصل مشترک مایع بخار ۶
- شکل ۱-۲ وسیله گرمایش نوکیاما با کنترل قدرت برای نمایش منحنی جوشش ۶
- شکل ۱-۳ منحنی جوشش نوکیاما برای آب اشباع در فشار ۱ اتمسفر ۷
- شکل ۱-۴ ناحیه‌های مختلف منحنی جوشش برای آب در فشار ۱ اتمسفر ۸
- شکل ۱-۵ جوشش بر روی میله افقی جوشش هسته‌ای در ناحیه جت‌ها و ستون‌ها ۹
- شکل ۱-۶ منحنی جوشش در حالت گذار برای سیال متانول بر روی سطح مسی ۱۵
- شکل ۱-۷ نمای شماتیک دستگاه تست جوشش ۱۶
- شکل ۱-۸ شار بر حسب دمای مازاد ۱۶
- شکل ۱-۹ عکس SEM از سطح آلومینیم الف (سطح صاف ب) سطح متخلخل شده ۱۷
- شکل ۱-۱۰ سطح مورد آزمایش ۱۷
- شکل ۱-۱۱ عکس SEM از تخلخل ایجاد شده بر روی آلومینیم ۱۸
- شکل ۱-۱۲ نمودار شار حرارتی بر حسب دمای مازاد ۱۸
- شکل ۱-۱۳ نمودار ضریب انتقال حرارت بر حسب شار حرارتی ۱۹
- شکل ۱-۱۴ عکس سیال در حال جوشش برای شارهای حرارتی متفاوت. ردیف بالا بدون پوشش و ردیف پایین پوشش داده شده ۱۹
- شکل ۱-۱۵ ضریب انتقال حرارت برای بالا، پایین و کنار سطح پوشش داده شده و بدون پوشش ۲۱
- شکل ۱-۱۶ دستگاه تست جوشش ۲۱
- شکل ۱-۱۷ عکس SEM از سطح پوشش داده شده بوسیله روش لایه به لایه ۲۲
- شکل ۱-۱۸ شار گرمای بحرانی سطوح پوشش داده شده با ضخامت متفاوت به شار گرمای بحرانی بدون پوشش ۲۲
- شکل ۱-۱۹ منحنی جوشش برای سطوح پوشش داده شده با نانو سیال با اندازه‌های متفاوت ۲۳
- شکل ۱-۲۰ عکس SEM از سطح پوشش داده شده بوسیله جوشش در نانو سیال در اندازه ذرات مختلف ۲۳
- شکل ۱-۲۱ منحنی جوشش برای سطح پوشش داده شده با نانو ذرات ۱۳۹ نانومتری و بدون پوشش در فشارهای متفاوت ۲۴
- شکل ۱-۲۲ منحنی جوشش برای سطح پوشش داده شده با نانو ذرات ۱۳۹ نانومتری و بدون پوشش در زوایای متفاوت ۲۴
- شکل ۱-۲۳ منحنی جوشش برای سطح پوشش داده شده با نانو ذرات ۱۳۹ نانومتری و بدون پوشش در اندازه سطوح مختلف ۲۵
- شکل ۲-۱ مراحل آماده سازی و آندایزینگ ۲۷

- شکل ۲-۲ پوشش اکسیدی-آندی با خانه‌های شش ضلعی و حفره‌های آن ۲۸
- شکل ۲-۳ عکس SEM از پوشش اکسیدی-آندی بر روی آلومینیم ۲۸
- شکل ۳-۱ نمای شماتیک از سیستم طراحی شده برای تست جوشش ۳۲
- شکل ۳-۲ مدل طراحی شده از سطح و نگهدارنده‌ها ۳۲
- شکل ۳-۳ پایه مسی ساخته شده و محل‌های جایگذاری هیترا ۳۳
- شکل ۳-۴ تصویر دستگاه ساخته شده بمنظور انجام آزمایش ها ۳۳
- شکل ۳-۵ نمای شماتیک نمونه آماده شده جهت پوشش دهی همراه با محل قرار گیری ترموکوپل ۳۴
- شکل ۳-۶ نحوه اعمال ولتاژ به نمونه ها در حمام اسید کرومیک ۳۶
- شکل ۴-۱ مقطع مخروطی مانند نمونه ۳۸
- شکل ۴-۲ زاویه تماس برای نمونه ی S-S-30 ۴۱
- شکل ۴-۳ زاویه تماس برای نمونه ی S-E₁-45 ۴۱
- شکل ۴-۴ تغییرات شار حرارتی بحرانی با توجه به زاویه تماس برای هر نمونه ۴۱
- شکل ۴-۵ تصاویر ۳ بعدی AFM از سطوح الف) E₂ ب) S-E₁-45 پ) S-E₂-30 ت) S-E₂-45 ث) C-E₂-35 ج) C-E₂-45 ۴۷
- شکل ۴-۶ نمودار تجمعی توزیع ارتفاع برآمدگی ها در ۶ نمونه ی الف) E₂ ب) S-E₁-45 پ) S-E₂-30 ۵۱
- شکل ۴-۷ تغییرات ارتفاع در راستای قطر تصاویر AFM برای نمونه های الف) E₂ ب) S-E₁-45 پ) S-E₂-30 ۵۳
- شکل ۴-۸ نمودار تکرار پذیری شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه Raw ۵۵
- شکل ۴-۹ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای سطوح پولیش شده در دو درجه ۲۴۰۰ و ۴۰۰۰ ۵۶
- شکل ۴-۱۰ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد بمنظور اعتبار سنجی برای نمونه مسی [۲۰] ۵۶
- شکل ۴-۱۱ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های S, E₁, E₂ و Raw ۵۷
- شکل ۴-۱۲ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای نمونه های S, E₁, E₂ و Raw ۵۷
- شکل ۴-۱۳ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های S, S-S-15-30-45 و Raw ۵۸
- شکل ۴-۱۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای S, S-S-15-30-45 و Raw ۵۹
- شکل ۴-۱۵ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های S, E₁, S-E₁-15-30-45 و Raw ۵۹
- شکل ۴-۱۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای نمونه های S, E₁, S-E₁-15-30-45 و Raw ۶۰
- شکل ۴-۱۷ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های S, E₂, S-E₂-15-30-45 و Raw ۶۰
- شکل ۴-۱۸ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای نمونه های S, E₂, S-E₂-15-30-45 و Raw ۶۱
- شکل ۴-۱۹ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های S, C, S-S-25-35-45 و Raw ۶۲
- شکل ۴-۲۰ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای نمونه های S, C, S-S-25-35-45 و Raw ۶۲
- شکل ۴-۲۱ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های S, E₁, C-E₁-25-35-45 و Raw ۶۳
- شکل ۴-۲۲ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای نمونه های S, E₁, C-E₁-25-35-45 و Raw ۶۴
- شکل ۴-۲۳ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های S, E₂, C-E₂-25-35-45 و Raw ۶۴

- شکل ۴-۲۴ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای نمونه های Raw و E₂, C-E₂-25-35-45 ۶۵
- شکل ۴-۲۵ تغییرات شار بر حسب دمای مازاد برای نمونه های Raw و Aluminize, Cu, E₁, E₂, S ۶۶
- شکل ۴-۲۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت بر حسب شار برای نمونه های Raw و Aluminize, Cu, E₁, E₂, S ۶۷

فهرست نمادها

زاویه صفحه نسبت به افق	φ	سطح	A
عدد ناسلت	Nu	انگستروم	\AA
عدد پراتل	Pr	ثابت مربوط به معادله ۱-۲	C
ضریب صدور	ε	گرمای ویژه	c_p
		ثابت مربوط به معادله ۱-۳	$C_{s,f}$
	پایین نویس ها	قطر	D
حالت گازی	ν	شتاب گرانش	g
حالت گازی	g	ضریب انتقال حرارت	h
حالت مایع	l	گرمای نهان تبخیر	h_{fg}
دیوار	w	آمپر	I
سیال	f	ثابت مربوط به معادله ۴-۴	K
دیوار	$wall$	ضریب هدایت حرارتی	k
		ثابت مربوط به معادله ۱-۲	n
		شار حرارتی عبوری از سطح	q_s''
		دمای سطح	T_s
		دمای اشباع	T_{sat}
		دمای مازاد	ΔT_e
		ولتاژ	V
		شعاع حباب	r_b

نمادهای یونانی

ویسکوزیته دینامیکی سیال	μ_l
دانسیته	ρ
کشش سطحی، ثابت استفان بولتزمن	σ
ضخامت معادل میکرو لایه	δ_e
زاویه تماس	θ

چکیده

در این پژوهش جوشش استخری بر روی سطوح پوشش داده شده بوسیله آندایزینگ و سطوح بدون پوشش آلومینیمی و مسی، مورد بررسی قرار گرفته است. پوشش های ایجاد شده در حمام های اسید سولفوریک و اسید کرومیک و بر روی زیر لایه های سند بلاست، اچ ضعیف و اچ قوی انجام شده است. این سطوح در سه مدت زمان مختلف تحت آندایزینگ بوده و دارای ویژگی های متفاوتی می باشند. در آزمایش های انجام شده شار حرارتی بحرانی و میزان ضریب انتقال حرارت اندازه گیری شده است. بیشترین میزان شار حرارتی بحرانی برای سطح پوشش داده شده در حمام اسید سولفوریک و با زیر لایه اچ ضعیف و در مدت زمان ۳۰ دقیقه بوده، که نشان دهنده ی افزایش ۸ درصدی نسبت به سطح بدون پوشش آلومینیمی و افزایش ۹۰ درصدی نسبت به سطح مسی است. همچنین مقدار ضریب انتقال حرارت، افزایش ۱۵۹ درصدی را در نمونه ی با اچ ضعیف نسبت به نمونه ی بدون پوشش نشان می دهد. همچنین از ۶ نمونه از سطوح پوشش داده شده، تصاویر AFM تهیه شد که نشان دهنده ی اطلاعات مربوط به مورفولوژی و میزان زبری سطح می باشند. این تصاویر نشان داد، با افزایش زمان آندایزینگ بر زبری سطح افزوده شده است. این تغییر در نمونه های پوشش داده شده در حمام اسید سولفوریک بسیار کم و در حمام اسید کرومیک مشهود تر است. در پایان نیز سطحی مسی، با استفاده از روش آلومینایز پوشش داده شد، که نتایج حاصل از آزمایش این سطح نشان دهنده ی افزایش ۳۷ درصدی در میزان شار حرارتی بحرانی نسبت به سطح مسی بوده ولی میزان ضریب انتقال حرارت تنها در حدود ۱٫۷ درصد، در آن کاهش یافته است.

کلمات کلیدی: جوشش استخری، پوشش های نانو ساختار، شار حرارتی بحرانی، ضریب انتقال حرارت، زبری سطح

فصل اول مقدمه و مروری بر منابع

مقدمه

۱-۱- بررسی اثر پوشش‌های نانو ساختار بر انتقال حرارت در جوش استخری

افزایش ضریب انتقال حرارت همواره محققان بسیاری را به خود مشغول داشته است. در سال‌های اخیر توجه زیادی به اثر پوشش سطح در مقیاس نانو بر افزایش ضریب انتقال حرارت در جوش استخری شده است و راه‌های ارزان و ساده به منظور ایجاد پوششی بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است.

از کاربردهای این پدیده به عنوان مثال می‌توان به اواپراتورها که یکی از پر کاربردترین مبدل‌های حرارتی هستند اشاره کرد. در حقیقت فرایند جوشش در تجهیزات گوناگونی از قبیل نیروگاه‌ها، کارخانجات صنایع شیمیایی، سیستم‌های تبرید و تهویه مطبوع رخ می‌دهد و اصلاحاتی که منجر به افزایش راندمان این سیستم‌ها شود، اهمیت زیادی در صرفه جویی انرژی دارد. بدین منظور روشهای مختلفی برای افزایش ضریب انتقال حرارت پیشنهاد شده است. این روش‌ها در فصل دوم مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۱-۲- تعریف مسئله

با توجه به تعداد کم مطالعات انجام شده در مورد تاثیر ساختار سطح در مقیاس نانو بر جوشش و نداشتن اطلاعات مناسب از میزان اثر پارامترهای آن، در مطالعه حاضر به بررسی نقش سطوح اصلاح شده بوسیله یکی از رایجترین روشهای پوشش‌دهی یعنی آندایز کردن، پرداخته خواهد شد.

۳-۱- اهداف این مطالعه

اهداف این مطالعه عبارتند از:

۱. به دست آوردن داده‌های آزمایشگاهی مربوط به انتقال حرارت در جوشش استخری بر روی سطح صاف
۲. تحلیل داده‌های فوق به منظور بررسی رفتار ضریب انتقال حرارت در سطوح با ویژگی‌های مختلف

۴-۱- روش اجرای طرح

روش اجرای طرح به صورت تجربی است. به این ترتیب که پس از ساخت و آماده نمودن دستگاه آزمایش، کلیه وسایل اندازه‌گیری مورد نیاز نصب می‌گردد. صفحه مورد آزمایش شامل یک سطح آلومینیمی است که در تماس با سیال قرار دارد. پس از انجام آزمایش‌های اولیه و کالیبره نمودن وسایل اندازه‌گیری به جمع آوری داده‌های تجربی دمای سطح، دمای اشباع و میزان انتقال حرارت از سطح به سیال پرداخته خواهد شد. آنگاه با استفاده از این داده‌ها میزان ضریب انتقال حرارت برای حالت‌های مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد.

۵-۱- افزایش انتقال حرارت

با پیشرفت تکنولوژی در عرصه استفاده از انرژی هسته‌ای و صنعت الکترونیک، دفع گرما به یکی از مشکلات بحرانی تبدیل شده است. یکی از کارآمدترین روش‌های خنک کاری استفاده از انتقال حرارت جوششی است که در آن از گرمای نهان بخار در حین تغییر فاز مایع به گاز استفاده می‌شود. این روش پربازده‌ترین روش برای خنک کردن سیستم‌های مختلف است مانند مبدل‌های حرارتی در نیروگاه‌های هسته‌ای و فسیلی، سیستم تهویه مطبوع، پمپ گرمایی، میکروکانال‌ها برای سرمایش تراشه‌های الکترونیکی و نیز کنترل گرمای ایستگاه‌های فضایی. ضریب بالای انتقال حرارت جوشش هسته‌ای، زمینه‌ی انجام تحقیقات زیادی بر روی اصلاح سیستم‌های انتقال حرارت در جهت ایجاد شرایط دو فازی را فراهم آورده است. با وجود مزایای انتقال حرارت جوششی، این روش یک محدودیت ذاتی نیز دارد: شار گرمای بحرانی^۱ [۱].

هنگامی که میزان انتقال حرارت از سطح، به شار گرمای بحرانی برسد یک لایه بخار روی سطح انتقال حرارت را می‌پوشاند که مانع تماس مایع و سطح گرم می‌شود و به علت پایین بودن ضریب انتقال حرارت بخار نسبت به مایع، ضریب انتقال حرارت بشدت کاهش پیدا کرده موجب افزایش شدید دما در سطح انتقال حرارت می‌شود و اگر این مقدار از بیشینه قابل تحمل برای قطعه عبور کند باعث تخریب در قطعه می‌شود. اجتناب از این پدیده بسیار ضروری به نظر می‌رسد. به این دلیل هر سیستم که در این شرایط کار می‌کند باید از یک حاشیه امن نسبت به شار گرمای بحرانی برخوردار باشد. ایجاد این

^۱ - Critical Heat Flux (CHF)

حاشیه امن باعث کاهش بازده انتقال حرارت می‌شود. برای بدست آوردن یک تعادل بین ایمنی و بازده، پی بردن به مکانیزم انتقال حرارت و افزایش شار گرمای بحرانی دارای اهمیت ویژه‌ای است [۲].

روش‌های مختلفی به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت جوششی توسعه پیدا کرده است که به طور کلی شامل دو دسته روش‌های فعال^۱ و غیر فعال^۲ است.

در روش‌های فعال یک نیروی خارجی به سیستم جوشش اعمال می‌شود که شامل چرخش، لرزش سطح گرمکن، لرزش مافوق صوت سیال تبخیر شونده و اعمال میدان‌های الکترواستاتیکی به سیال می‌باشد.

روش‌های غیرفعال شامل زبر کردن یا ایجاد لایه متخلخل بر سطح گرمکن به منظور بهبود ویژگی‌های سطح (افزایش، و پایداری نقاط هسته زایی) و افزودن ترکیبات خاص به سیال است [۳].

در روش‌های غیرفعال یکی از تغییراتی که به طور عملی نیز می‌توان به سیستم‌های صنعتی اعمال کرد، تغییر در مورفولوژی سطح است که شامل تغییرات مکانیکی و شیمیایی می‌شود.

تغییرات شیمیایی به دو دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱. حک کاری سطح^۳

۲. اکسید کردن سطح

تغییرات مکانیکی به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند:

۱. ساچمه زنی^۴

۲. پولیش زنی

۳. ماشین کاری

۴. پوشش سطح^۵

برای بررسی ویژگی‌های سطح، برخی پارامترها مانند زاویه تماس برای برآورد میزان انرژی سطح اندازه‌گیری می‌شود. این پارامتر معیار خوبی برای تعیین میزان ترشوندگی^۶ سطح است. میزان ترشوندگی رابطه‌ی مستقیمی با شار گرمای بحرانی دارد.

۱-۶- جوشش

¹- Active

²-Passive

³-Etching

⁴-Sandblast

⁵- Coating

⁶-Wettability

چون جوشش با حرکت سیال در ارتباط است به عنوان نوعی از انتقال گرمای جابجایی دسته بندی می شود. به علت وجود تغییر فاز انتقال گرما در سیال بدون تغییر دمای سیال روی می دهد. در حقیقت جوشش باعث می شود انتقال گرما با آهنگ زیاد و با تغییرات کوچک دما همراه باشد. علاوه بر گرمای نهان h_{fg} دو پارامتر دیگر در این فرآیندها اهمیت دارند: کشش سطحی σ بین فصل مشترک مایع-بخار و اختلاف چگالی بین دو فاز. اختلاف چگالی یک نیروی شناوری را بوجود می آورد که با $g(\rho_l - \rho_v)$ متناسب است. به علت آثار ترکیبی گرمای نهان و جریان حاصل از شناوری ضرایب و آهنگ های انتقال حرارت در جوشش معمولاً خیلی بزرگ تر از آهنگ ها در انتقال گرمای جابجایی بدون تغییر فاز هستند [۱].

اغلب مسائل مهندسی با جوشش سروکار دارند. به عنوان مثال جوشش در تمام سیکل های بسته تبرید و قدرت نقش اساسی دارد. در سیکل های قدرت مایع تحت فشار در دیگ بخار (بویلر) به بخار تبدیل می شود. بخار پس از انبساط در توربین، در چگالنده (کندانسور) به مایع تبدیل و از آنجا به دیگ بخار پمپ می شود و سیکل تکرار می شود و یا در تبخیرکن (اوپراتور)، که فرایند جوشش روی می دهد.

۷-۱- انواع جوشش

تبخیر در فصل مشترک جامد-مایع را جوشش می گویند. این فرایند وقتی روی می دهد که دمای سطح T_s از دمای اشباع T_{sat} متناظر با فشار مایع از مقدار معینی بیشتر شود. گرما از سطح جامد به مایع منتقل می شود، قانون سرمایش نیوتن به صورت زیر است

$$q_s'' = h(T_s - T_{sat}) = h\Delta T_e \quad (1-1)$$

که در آن ΔT_e را دمای مازاد^۱ می گویند. فرایند با تشکیل حباب های بخار که رشد می کنند و پشت سر هم از سطح جدا می شوند مشخص می شود. رشد و تحرک حباب های بخار به شکل پیچیده ای به دمای مازاد، ماهیت سطح و خواص ترموفیزیکی سیال از قبیل کشش سطحی بستگی دارد. همچنین تشکیل حباب بخار بر حرکت سیال نزدیک سطح و لذا بر ضریب انتقال گرما به شدت تاثیر می گذارد.

جوشش می تواند در شرایط مختلفی روی دهد. مثلاً در جوشش استخری^۲ مایع ساکن است و حرکت آن در نزدیک سطح بر اثر جابجایی آزاد و آشفتگی ناشی از رشد و جدایی حباب ها از سطح می باشد. ولی در جوشش با جابجایی اجباری^۳ حرکت سیال توسط عوامل خارجی و همچنین بر اثر جابجایی آزاد و آشفتگی حبابی بوجود می آید. جوشش را به صورت فروسرد^۴ و یا اشباع^۵ نیز می توان دسته بندی کرد. در جوشش فروسرد دمای مایع کمتر از دمای اشباع است و حباب های

¹ -Super Heat Temperature

² -Pool Boiling

³ -Flow Boiling

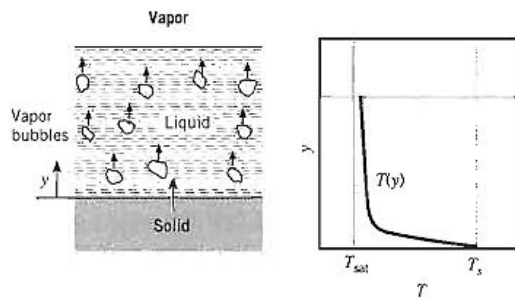
⁴ -Sub Cooled

⁵ -Saturation

تشکیل شده در سطح ممکن است چگالیده شود ولی در جوشش اشباع دمای مایع کمی بیشتر از دمای اشباع است لذا حباب های تشکیل شده در سطح توسط نیروی شناوری پیشرانده و سرانجام از سطح آزاد فرار می کند.

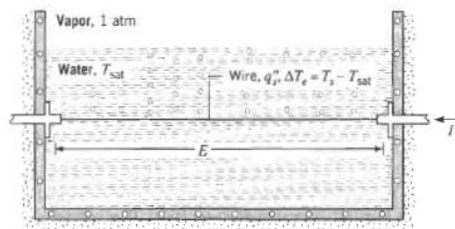
۸-۱- جوشش استخری

ویژگی های جوشش اشباع استخری در شکل ۱-۱ مطالعه شده است. گرچه دمای مایع در نزدیکی سطح شدیداً کاهش می یابد ولی در قسمت عمده مایع بیشتر از دمای اشباع است. لذا حباب های ایجاد شده در فصل مشترک مایع-جامد به طرف فصل مشترک مایع-بخار صعود و از آن عبور می کند. با بررسی منحنی جوشش می توان مکانیزم های فیزیکی مربوطه را بررسی کرد.



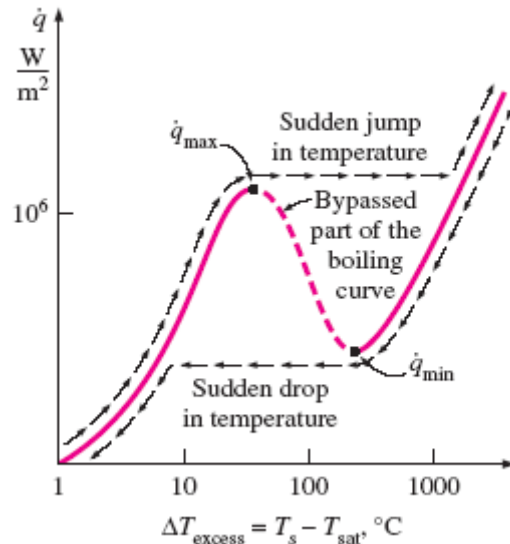
شکل ۱-۱ توزیع دما در جوشش اشباع استخری با فصل مشترک مایع بخار [۱]

نوکیاما [۴] اولین کسی بود که نواحی مختلف جوشش استخری را با استفاده از وسیله نشان داده شده در شکل ۲-۱ بررسی کرد. شار گرمایی که از سیم نیکل کرم به آب اشباع داده می شد. با اندازه گیری شدت جریان (I) و تعیین افت ولتاژ (E)، دمای سیم از چگونگی تغییر مقاومت بر حسب دما به دست می آمد. این ترتیب را گرمایش با کنترل قدرت می گویند که در آن T_s دمای سیم (دمای مازاد ΔT_e) متغیر وابسته و قدرت و شار گرمایی q_s'' متغیر مستقل است. با تعقیب پیکان های منحنی گرمایش شکل ۳-۱ می بینیم که با اعمال قدرت، شار گرما بر حسب دمای مازاد ابتدا به کندی و سپس سریعاً افزایش می یابد.



شکل ۲-۱ وسیله گرمایش نوکیاما با کنترل قدرت برای نمایش منحنی جوشش [۱]

نوکیا ما مشاهده کرد که جوشی که با تشکیل حباب‌ها مشخص می‌شود تا $\Delta T_e \approx 5^\circ\text{C}$ شروع نمی‌شد. با افزایش قدرت، شار گرما شدیداً افزایش می‌یافت تا اینکه برای مقدار کمی بیش از q_{max}'' دمای سیستم به طور ناگهانی به نقطه ذوب جهش می‌کرد و سیم گسیخته می‌شد. نوکیاما با تکرار آزمایش با سیم پلاتینی که دارای نقطه ذوب بالاتر است (K) ۲۰۴۵ در مقایسه با $1500 K$) توانست شارهای گرمایی بیش تر از q_{max}'' را بدون گسیختگی سیم ایجاد کند.



شکل ۱-۳ منحنی جوش نوکیاما برای آب اشباع در فشار ۱ اتمسفر [۵]

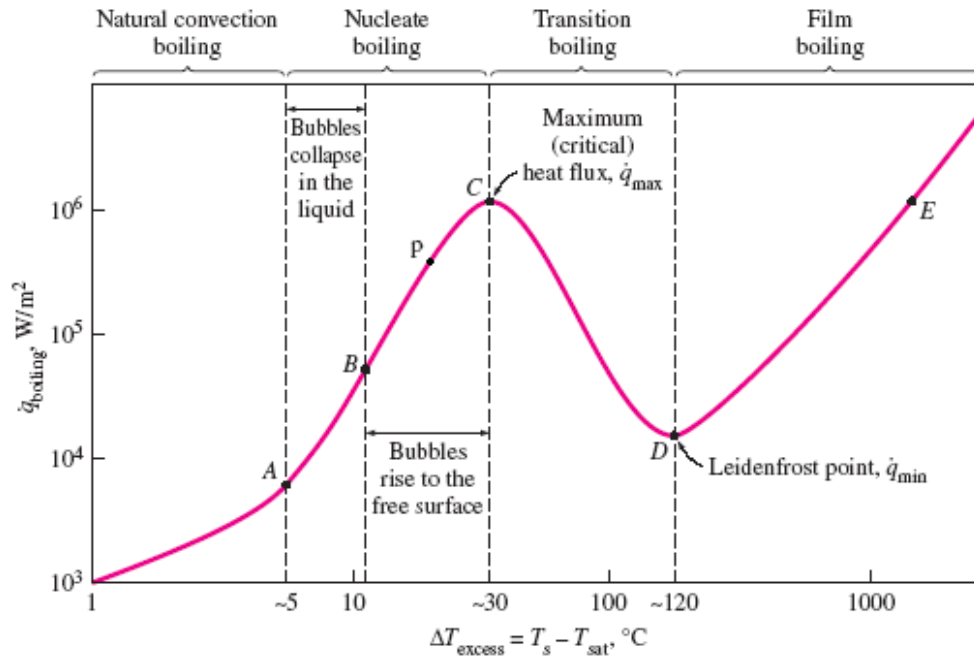
سپس وقتی قدرت را کاهش داد تغییرات ΔT_e بر حسب q_s'' مطابق منحنی سرمایش شکل ۱-۳ به دست آمد. وقتی شار گرما به نقطه مینیم q_{min}'' می‌رسید کاهش بیشتر قدرت باعث می‌شد دمای مازاد سریعاً افت کند و فرایند با پیروی از منحنی گرمایش اولیه به نقطه اشباع باز می‌گشت.

نوکیا ما اعتقاد داشت که اثر پسماند در شکل ۱-۳ یکی از نتایج روش گرمایش با کنترل قدرت است. که در آن ΔT_e یک متغیر وابسته است. او همچنین اعتقاد داشت که با استفاده از یک فرایند گرمایش که با آن بتوان ΔT_e را مستقلاً کنترل کرد قسمت خط چین منحنی را می‌توان به دست آورد. با چگالش بخار در فشارهای مختلف در لوله، آنها توانستند مقدار ΔT_e را برای جوشش یک سیال آلی زود جوش در سطح خارجی لوله کنترل کنند و قسمت خط چین منحنی جوشش را بدست آورند.

۹-۱- رژیم های جوش استخری

با بررسی رژیم های مختلف جوش استخری، شکل ۱-۴، می‌توان به مکانیزم‌های فیزیکی حاکم بر جوشش پی برد. این منحنی مربوط به آب در فشار یک اتمسفر است ولی سیالات دیگر نیز رفتاری مشابه دارند. با توجه به معادله ۱-۱، q_s'' به

ضریب جابجایی h و همچنین به دمای مازاد ΔT_e بستگی دارد. برحسب مقدار ΔT_e شیوه‌های مختلف جوشش را می‌توان توصیف کرد.



شکل ۱-۴ ناحیه‌های مختلف منحنی جوشش برای آب در فشار ۱ اتمسفر [۵]

۱-۹-۱- جوشش با جابجایی آزاد^۱

اگر $\Delta T_e \leq \Delta T_{e,A} \approx 5^\circ\text{C}$ انتقال گرما به صورت جابجایی آزاد است. در این حالت بخاری که با فاز مایع تماس دارد به اندازه‌ای نیست که بتواند جوشش در دمای اشباع را ایجاد کند. با افزایش دمای مازاد تشکیل حباب شروع می‌شود اما در زیر نقطه A (که آن را نقطه شروع جوشش هسته‌ای ONB^2 می‌گویند) حرکت سیال اصولاً از اثر جابجایی آزاد ناشی می‌شود [۱].

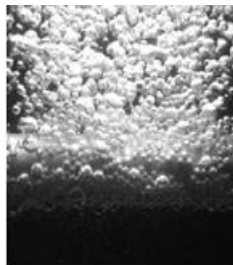
۱-۹-۲- جوشش هسته‌ای^۳

^۱ - Natural Convection Boiling

^۲ - Onset of Nucleate Boiling

^۳ - Nucleate Boiling

جوشش هسته‌ای در گستره $\Delta T_{e,C} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,A}$ وجود دارد که در آن $\Delta T_{e,C} \approx 30^\circ\text{C}$. در این گستره دو جریان مختلف را می‌توان تشخیص داد. در ناحیه A-B حباب‌های مجزا در مواضع هسته زایی به وجود می‌آیند و از سطح جدا می‌شوند، سیال نزدیک سطح شدیداً آمیخته می‌شود q_s'' و h افزایش می‌یابند. در جوشش استخری بیش تر تبادل گرما مستقیماً از سطح به مایع که روی سطح حرکت می‌کند روی می‌دهد نه توسط حباب‌های بخار که از سطح به طرف بالا حرکت می‌کنند. وقتی ΔT_e از $\Delta T_{e,B}$ بیشتر می‌شود مواضع هسته‌زایی بیشتری فعال می‌شوند و تشکیل حباب‌های بیشتر باعث تداخل و به هم پیوستن حباب‌ها می‌شود. در ناحیه B-C حباب‌های بخار به صورت جت یا ستون از سطح جدا می‌شوند و سرانجام به هم می‌پیوندند و بخار بی‌شکلی را تشکیل می‌دهند. این حالت در شکل ۱-۵ نشان داده شده است. تداخل بین اجتماع فشرده شده حباب‌ها از حرکت سیال در نزدیک سطح جلوگیری می‌کند نقطه P در منحنی جوشش (شکل ۱-۴) نقطه عطف منحنی است و در آن ضریب انتقال حرارت به مقدار ماکزیمم خود می‌رسد. در این نقطه h با افزایش ΔT_e شروع به کاهش می‌کند ولی q_s'' که حاصل ضرب h و ΔT_e است به افزایش ادامه می‌دهد زیرا برای $\Delta T_{e,p} < \Delta T_e$ افزایش نسبی ΔT_e از کاهش نسبی h بیشتر است. ولی در ادامه در نقطه C افزایش بیش تر ΔT_e با کاهش h موازنه می‌شود. ماکزیمم شار گرما $q_{s,C}'' = q_{max}''$ را معمولاً شار گرمای بحرانی می‌گویند و در آب با فشار اتمسفر، مقدار آن از 1000 kW/m^2 بیشتر می‌شود و برای خیس شدن سطح توسط مایع ایجاد مشکل می‌کند.



شکل ۱-۵ جوشش بر روی میله افقی جوشش هسته‌ای در ناحیه جت‌ها و ستون‌ها [۶]

چون آهنگ‌های انتقال گرما و ضرایب جابجایی زیاد مربوط به مقادیر کوچک دمای مازاد بهتر است بیشتر وسایل مهندسی با جوشش هسته‌ای کار می‌کنند. مقدار تقریبی ضریب جابجایی را با استفاده از معادله ۱-۱ همراه با منحنی جوشش می‌توان بدست آورد با تقسیم کردن q_s'' بر ΔT_e دیده می‌شود که ضرایب جابجایی در جوشش هسته‌ای بیشتر از $10^4 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ هستند این مقدار خیلی بیشتر از ضرایب جابجایی بدون تغییر فاز است.

۱-۹-۳- جوشش انتقالی یا گذار^۱

^۱ -Transition Boiling