مجله مهندسی مکانیک مدرس، دی 1394، دوره 15، شماره 10، ص‌ص 201-211

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

بهبود عملکرد فرآیند سنگزنی با تکنیک روانکاری کمینه- استفاده از جت هوای سرد فشرده ناشی از دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی

عبدالرضا رحیمی[1*]، امیر صابری[2]، حسن پارسا[3]، مرتضی اشرفی‌جو[4]

1- استادیار، گروه ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
2 و 4- کارشناسی ارشد، گروه ساخت و تولید، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
3- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران
* تهران، صندوق پستی 15875-4413، rahimi@aut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 12 خرداد 1394
پذیرش: 08 شهریور 1394
ارائه در سایت: 23 شهریور 1394

کلید واژگان:
سنگزنی
روانکاری کمینه با هوای سرد
مکانیزم انتقال حرارت
نیروی سنگزنی
کیفیت سطح

چکیده

مصرف سیالات ماشین‌کاری هزینه‌های زیادی به صنعت تحمیل می‌کند. این سیالات باعث آلودگی محیط‌زیست شده و برای سلامتی انسان زیان‌آورند. تکنیک ماشین‌کاری با روانکاری کمینه روش نوینی است که به منظور کاهش مصرف سیالات خنک‌کننده، افزایش کارایی سیال در ناحیه ماشین‌کاری و به‌کارگیری سیالات بی‌خطر استفاده می‌شود. با این حال، این روش در سنگ‌زنی با محدودیت خنک‌کاری روبروست. هدف پروژه حاضر بررسی عمیق‌تر سازوکار انتقال حرارت در تکنیک روانکاری کمینه با شبیه‌سازی عددی دمای آن و بهبود توانایی خنک‌کاری جت هوای آن با استفاده از دستگاه ساده و ارزان‌قیمت خنک‌کن هوای چرخشی است. بدین منظور سامانه‌ای برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی شرایط مختلف محیط روانکاری کمینه طراحی و ساخته شد. نتایج آزمایش‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی حاکی از سهم 95 درصدی هوای فشرده در انتقال حرارت بوده و ضمن اینکه در فرایند خنک‌کاری، افزایش فشار هوا عامل موثرتری نسبت به کاهش دمای آن محسوب می‌شود. نتایج شبیه‌سازی عددی دما نشان می‌دهد با افزایش فشار، نرخ افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی کاهش می‌یابد؛ همچنین توانایی خنک‌کاری دمایی دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی در توان حرارتی کم بروز پیدا می‌کند. در سنگ‌زنی فولاد نرم، تکنیک روانکاری کمینه با هوای سرد باعث کاهش چشمگیر نیروی مماسی و ضریب اصطکاک در مقایسه با روش‌های دیگر می‌شود ولی در مجموع، جز در حالت بهینه که بیشترین ضریب انتقال حرارت جابجایی را داراست، کیفیت سطح مطلوبی ارائه نمی‌دهد که به ضریب انتقال حرارت کم گازها در فشارهای پایین مربوط می‌شود.

Improvement of grinding process performance by minimum quantity lubrication technique -using compressed cold air jet from vortex tube

AbdolReza Rahimi*, Amir Saberi, Hasan Parsa, Morteza Ashrafijou

Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, Iran
* P.O.B. 15875-4413 Tehran, Iran, rahimi@aut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 02 June 2015
Accepted 30 August 2015
Available Online 14 September 2015

Keywords:
Grinding
Minimum Quantity Lubrication with Cold Air
Heat transfer mechanism
Grinding force
Surface quality

ABSTRACT

Consumption of cutting fluids imposes high costs on industry. These cutting fluids contaminate the environment and are harmful to human health. Minimum quantity lubrication technique (MQL) is a new approach to reduction of cutting fluids consumption, improving efficiency of cutting fluid at machining zone and using harmless fluids. However, this technique faces cooling limitation in grinding. The purpose of this study is an accurate study of heat transfer mechanism in minimum quantity lubrication technique by its temperature numerical simulation and improving the cooling ability of its air jet by using a simple and inexpensive vortex tube. For this purpose, a system was designed and manufactured to measure the convection heat transfer coefficient of different conditions of MQL environments. The result of convection heat transfer tests shows 95% share of compressed air in heat transfer and also air pressure is a more important factor than temperature in cooling process. The result of temperature numerical simulation shows that by increasing pressure, the increasing rate of convection heat transfer coefficient decreases; also, the cooling ability temperature of the vortex tube at low thermal power is tangible. In grinding of soft steel, the minimum quantity lubrication technique with cold air (CAMQL) in comparison with other methods leads to significant reduction of tangential grinding force and friction coefficient, but in general, except in the case of optimum condition which has the highest heat transfer coefficient, surface finish is worse, which is related to low heat transfer coefficient of gases at low pressures.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

A.R. Rahimi, A. Saberi, H. Parsa, M. Ashrafijou, Improvement of grinding process performance by minimum quantity lubrication technique -using compressed cold air jet from vortex tube, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 15, No. 10, pp. 201-211, 2015 (In Persian)

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

1- مقدمه

امروزه سنگ‌زنی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای ماشین‌کاری به شمار می‌رود به‌طوری‌که 20% فرآیندهای ماشین‌کاری در کشورهای صنعتی مرتبط با سنگ‌زنی است. تقریباً تمام وسایل و تجهیزاتی که استفاده می‌شود یا در مراحلی از فرآیند تولید خود سنگ‌زنی شده و یا با ماشین‌آلاتی ساخته شده که دقتشان مرهون فرآیند سنگ‌زنی است. هدف اصلی مایع سنگ‌زنی روان‌سازی، خنک‌کاری، انتقال براده، تمیزی چرخ سنگ و به حداقل رساندن خوردگی است. امروزه با اعمال قوانین محیطی سخت‌گیرانه‌تر کاهش مصرف سیالات ماشین‌کاری به‌صورت یک ضرورت در آمده است، زیرا مصرف سیالات ماشین‌کاری، فیلتر کردن و دفع ضایعات فلزی موجود در مایع، هزینه‌های زیادی به صنعت تحمیل می‌کند که اغلب به مراتب بیشتر از هزینه ابزار است. علاوه بر این، سیالات ماشین‌کاری باعث آلودگی محیط‌زیست شده و برای سلامتی انسان زیان‌آورند و حتی امکان اشتعال آن‌ها وجود دارد [1].

تکنیک ماشین‌کاری با روانکاری کمینه[1] روش نوینی بوده است که به منظور کاهش مصرف سیالات خنک‌کننده، افزایش کارایی سیال در ناحیه ماشین‌کاری و به‌کارگیری سیالات بی‌خطر (تجزیه‌پذیر) استفاده می‌شود. در این تکنیک سیال مایع با دبی بسیار کم (1000 مرتبه کمتر از حالت پاشش پیوسته سیال) به کمک هوای فشرده در نازل‌های ویژه‌ای به‌صورت اسپری درآمده و به ناحیه ماشین‌کاری پاشیده می‌شود. درواقع روانکاری کمینه عملکرد خنک‌کاری و روانکاری به همراه مصرف خیلی کم سیال را هر دو با هم داراست.

1-1- سیال‌های برشی و معایب آن

عمده هدف اصلی از استفاده از سیال برشی در پروسه‌های براده برداری، خنک‌کاری ابزار و قطعه‌کار، روانکاری ما بین ابزار و قطعه کار و شستشو و تخلیه براده از محل براده برداری است. سیال‌های برشی در کل، در سه گروه سیال‌های برشی پایه گازی خنک‌کار-روانکار، آبی و پایه روغنی جای می‌گیرند که دو مورد سیال‌های برشی آبی و پایه روغنی بیشترین کاربرد را دارند [1].

سیال‌های برشی پایه روغنی، ترکیباتی بدون آب هستند که از روغن‌های خالص تشکیل می‌شوند و اغلب روغن‌های برش نامیده می‌شوند. روغن‌های برش برای روغنکاری، بهبود برش فلزات و جلوگیری از زنگ‌زدگی استفاده می‌شوند. روغن‌های استفاده‌شده در ترکیب مایعات فلزکاری نامحلول اغلب روغن‌های معدنی تصفیه‌شده و یا روغن‌های حیوانی و گیاهی هستند که برای افزایش عمل خنک‌سازی و روان‌سازی به کار می‌روند.

سیال‌های برشی آبی به دو حالت اصلی امولسیون[2] (آب‌صابون) و محلول (آب تراش) مورد استفاده قرار می‌گیرند. این سیالات برای خنک‌سازی و روان‌سازی طراحی شده‌اند. این مایعات از اتصال و جوش بین ابزار برش و سطح کار جلوگیری می‌کنند و خورندگی پوشش ابزار را در دماهای بالا کاهش می‌دهند و از تغییر شکل ناشی از گرمای باقی‌مانده جلوگیری می‌کنند. غلظت مایعات فلزکاری محلول قبل از استفاده حدود 60% تا 80% با آب رقیق می‌شوند.

از عوامل مهمی که با سیال برشی درگیر است اپراتور، دستگاه، قطعه کار و محیط‌زیست است. در طول زمان ماشین‌کاری عمدتاً مایعات پاشیده شده و موجب تشکیل افشانه‌ها[3] می‌شوند. بخارات حاصل از مایعات برش یکی از عوامل زیان‌آور شیمیایی محیط کار محسوب می‌شوند که تقریباً از تمام فرآیندها نظیر ماشین‌کاری، برشکاری و پرداخت‌کاری بر روی قطعات فلزی به‌صورت بخارات روغن وارد هوای محیط کار می‌شوند.

1-Minimum Quantity Lubrication
2- Emulsion
3- Mist

شکل 1 پسماند ایجاد شده در مرور زمان در مخزن سیال برشی دستگاه سنگزنی

تماس با مایعات ماشین‌کاری منجر به بیماری‌های پوستی و تنفسی، انواع سرطان‌ها (دستگاه تنفسی و گوارشی) و بیماری‌های غیر توموری (آسم شغلی) می‌شود [2]. در ارتباط با دستگاه، مصرف سیالات برشی زنگ‌زدگی دستگاه، تخریب پکینگ‌ها و به تبع آن تخریب بلبرینگ‌ها ، لجن و کثافت ایجاد شده در دستگاه، افزایش مصرف ابزار، افزایش نشتی روغن و افزایش هزینه‌های تعمیراتی را در پی دارد. زنگ‌زدگی قطعات، کیفیت پایین سطوح قطعات، کاهش سرعت برشی و افزایش زمان براده برداری، افزایش زمان‌های توقف دستگاه و بالا رفتن هزینه تولید از معایب سیال برشی در مورد قطعه‌کار است. همچنین ایجاد باکتری، قارچ، متعفن شدن محیط کار و ضرورت تخلیه آن به محیط‌زیست از جمله عواملی است که علاوه بر نابودی محیط‌زیست مستلزم هزینه‌های بیشتر برای کارخانه خواهد بود [3]. شکل 1 پسماند ایجاد شده به مرور زمان در مخزن سیال برشی دستگاه سنگزنی مورد استفاده در انجام آزمایش‌های سنگزنی را نشان می‌دهد.

1-2- جایگزین برای سیال‌های برشی در ماشین‌کاری پاک

همان‌طور که اشاره گردید دو عامل مهم زیست‌محیطی و مصرف بالای سیال برشی، چالش جدی در استفاده از سیال‌های برشی ایجاد کرده است. از این‌رو تحقیقات گسترده‌ای در زمینه حذف و یا کاهش سیال‌های برشی در دهه گذشته انجام شده است.

ماشین‌کاری خشک، اولین گزینه جهت جایگزین کردن با ماشین‌کاری مرسوم به‌منظور کاهش استفاده از سیال برشی است. ماشین‌کاری خشک منابع آبی و هوا را آلوده نمی‌کند. ماشین‌کاری خشک به منظور افزایش عمر ابزار در سرعت‌های برشی کم و با نرخ تولید کم دارای مزیت‌هایی است [1]. با این وجود ماشین‌کاری خشک به علت نبود روانکار-خنک‌کار منجر به مشکلاتی نظیر افزایش بیش از اندازه گرمای[4] ابزار می‌شود. اصطکاک بالای بین ابزار و قطعه‌کار باعث می‌شود تا دمای منطقه درگیر به‌صورت قابل‌توجهی بالا رود و این منجر به سایش، دیفیوژن[5] و اکسیداسیون بیشتر می‌شود. درنتیجه گرمای وارده بسیار به قطعه‌کار دست‌یابی به تلورانس‌های بسته ممکن نیست و در لایه سطحی قطعه‌کار آسیب‌های حرارتی رخ می‌دهد. محدودیت جدی در کاربرد سنگ‌زنی خشک نیز وجود عیوب حرارتی و شکل‌گیری لایه سفید شکننده بر روی سطح قطعه‌کار است [4].

گزینه دیگر که جزو روش‌های تازه توسعه‌یافته است، ماشین‌کاری برودتی است و در حال حاضر روش‌های تبرید مورد استفاده برای توسعه تجهیزات گاز خنک‌ساز عموماً شامل استفاده از گازهای برودتی همچون هلیوم و نیتروژن به‌عنوان خنک‌کار، تبرید تبخیر نیتروژن مایع، تبرید بخار متراکم، تبرید انبساط بی‌دررو و تبرید خنک‌کن هوای چرخشی (اسلحه هوای سرد یا

4- Over-Heating
5- Diffusion

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

ورتکس تیوب[1]) است [5]. به علت توانایی سیال برودتی در کاهش ضریب اصطکاک در سطح ابزار و براده، نیروهای به دست آمده از این روش کمتر از حالت خشک است [1].

پاول اثر خنک‌کاری جت نیتروژن مایع (خنک‌کاری برودتی) را با دو محیط خنک‌کار-روانکار مرسوم برای پنج نوع فولاد بررسی کرد. بر مبنای نتایج آنها با به‌کارگیری نیتروژن مایع در سنگ‌زنی فولادها، نیرو، دما و تنش پسماند کاهش می‌یابد و کاهش قابل‌توجه دمای منطقه سنگزنی در عمق‌های بیشتر و داکتیلیته بیشتر قطعه کار مشاهده می‌شود، درحالی‌که در سنگ‌زنی پاشش پیوسته سیال، دمای منطقه برش به طور قابل‌توجهی قابل‌کنترل نیست و سنگ‌زنی خشک منجر به تنش‌های پسماند کششی بالا در سطح سنگ‌زنی تمامی نمونه‌ها می‌شود [۶،7]. نبیل تأثیر خنک‌کاری برودتی بر مقاومت خستگی فولاد ضدزنگ AISI 301 را بررسی کرد. به موجب ترک‌های خستگی کوچک‌تر به علت کاهش دما، بهبود رفتار خستگی مشاهده می‌شود و سطوحی با زبری سطح کمتر، عیوب کمتر و تنش پسماند کششی کمتر و سختی کار دیده می‌شود [8].

با این وجود به‌کارگیری خنک‌کاری برودتی به علت گران‌تر بودن تجهیزات خنک‌کننده و نیتروژن نسبت به سیال‌های معمولی تنها برای قطعات بسیار حساس که تحت بارهای شدید دینامیکی و خستگی هستند محدود می‌شود. کار اخیراً صورت گرفته توسط پوساوک پیشنهاد می‌کند تا زمانیکه هزینه نیتروژن تبریدی در حجم واحد به صورت چشمگیری از امولسیون معمولی بیشتر است، استفاده از آن منجر به هزینه‌های بسیار بیشتر می‌شود [9].

در زمینه به‌کارگیری تکنیک روانکاری کمینه در فرآیند سنگ‌زنی و بررسی عملکرد آن تحقیقات محدودی صورت گرفته است. توکلی و همکاران تأثیر پارامترهای روانکاری کمینه از قبیل دبی روغن، فشار هوا و موقعیت و فاصله نازل نسبت به چرخ سنگ را مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها با معرفی موقعیت نازل به‌عنوان یک پارامتر مؤثر بر عملکرد روانکاری کمینه، دریافتند که قرارگیری نازل تحت زاویه نسبت به قطعه کار منجر به بهبود عملکرد سنگ‌زنی می‌شود. آن‌ها همچنین نشان دادند که با افزایش دبی هوای فشرده و دبی روغن، عملکرد سنگ‌زنی بهبود می‌یابد [10].

برونر و همکاران [11] نشان دادند که در سنگ‌زنی روانکاری کمینه با روغن استر در مقایسه با روغن معدنی در سنگ‌زنی 16MnCr5 ، نیروهای مماسی و نرمال به یک سوم کاهش می‌یابد، اما زبری سطح را50% افزایش می‌دهد. تحقیقات برینکسمایر این نتایج را تصدیق کرد و نشان داد که نوع خنک‌کننده در سنگ‌زنی روانکاری کمینه (روغن استر یا امولسیون) می‌تواند بطور قابل‌توجهی نتایج پروسه را تحت تأثیر قرار دهد [12]. وی آزمایش‌های سنگ‌زنی روانکاری کمینه را با فولاد سخت شده 16MnCr5 و فولاد تمپر شده Mo4V42Cr انجام داد و متوجه شد که در صورت کم بودن نرخ براده برداری، صافی سطح مطلوب حاصل می‌شود. درعین‌حال نوع روغن و ترکیبات آن تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر صافی سطح قطعه کار دارد. کلوکه نیز تأثیرگذاری مهم ترکیبات پایه روغن روانکاری کمینه بر نتایج فرآیند سنگ‌زنی را تأیید کرد[13].

در مطالعه دیگری، توکلی و همکاران روش روانکاری کمینه را برای سنگ‌زنی فولاد سخت شده 100Cr6 و فولاد نرم 42CrMo4 توسط چرخ سنگ اکسید آلومینیوم به کار گرفتند. آن‌ها دریافتند که برای هر دو فولاد، ضریب اصطکاک و نیروی مماسی در حالت روانکاری کمینه نسبت به حالت استفاده از سنگ‌زنی خشک و پاشش پیوسته سیال بطور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. همچنین زبری سطح فولاد سخت با روش روانکاری کمینه کاهش و کیفیت سطح بهبود می‌یابد، در حالیکه زبری سطح فولاد نرم افزایش می‌یابد [14]. تحقیقات ربیعی این نتایج را تصدیق کرد [15]. بر اساس نتایج وی در بررسی تأثیر روانکاری کمینه در عملیات سنگ‌زنی چهار نوع فولاد سخت و نرم، این روش برای فولادهای سخت منجر به کاهش زبری، نیروی مماسی و ضریب اصطکاک می‌شود. از سوی دیگر در سنگ‌زنی فولادهای نرم اگرچه روانکاری کمینه منجر به کاهش نیروهای مماسی و ضریب اصطکاک می‌شود ولی از نظر کیفیت سطح عملکرد مناسبی ندارد و افزایش زبری سطح را در پی دارد. با توجه به نتایج آن‌ها دامنه کاربرد روانکاری کمینه به فولادهای سخت محدود می‌شود.

اشرفی‌جو [16] تأثیر کاربرد محیط‌های مختلف روانکاری کمینه در عملیات سنگ‌زنی را در حضور سه گاز آرگون، نیتروژن و هوا بررسی کرد. بر مبنای ضریب انتقال حرارت جابجایی اندازه‌گیری شده مشابه گاز آرگون و نیتروژن، عملکرد سنگ‌زنی برای این دو محیط نیز شبیه به هم بود. ولی هوا که بیشترین ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به دو گاز دیگر داشت، عملکرد سنگ‌زنی بهتری در زمینه زبری سطح ارائه می‌دهد.

محدودیت اصلی روانکاری کمینه تأثیر و کارایی کم آن در خنک‌کاری سطح برش است [17]. بنابراین، روانکاری کمینه در عملیات برشی که در آن مشکلات حرارتی بسیاری رخ می‌دهد نتایج خیلی خوبی نمی‌دهد [18]. ازاین‌رو زمینه تازه روانکاری کمینه با خنک‌کار برودتی توسعه یافته است.

نگوین خنک‌کاری جت هوای سرد با دمای زیر صفر بر عملکرد سنگ‌زنی قطعه استوانه‌ای را مطالعه کرد. وی مشاهده کرد که هوای سرد به طور قابل‌توجهی افزایش دما در سنگ‌زنی را کاهش نمی‌دهد و اینکه تأثیر خنک‌کاری عموماً محدود می‌شود. مدل انتقال حرارت سه بعدی حاکی از پیچیدگی مکانیزم انتقال حرارت است که کارایی خنک‌سازی را محدود می‌کند [19]. مان گزارش داد در پرداخت فرزکاری تندبر[2] آلیاژ تیتانیوم، سایش ابزار کمتری در استفاده از افشانه روغن نیتروژن در مقایسه با افشانه روغن هوا رخ می‌دهد [20]. سو در پرداخت فرزکاری تندبر آلیاژ تیتانیوم، تأثیر روانکار-خنک‌کار در شرایط خشک، پاشش پیوسته، افشانه روغن نیتروژن، گاز نیتروژن فشرده سرد (CCNG[3]) در دمای 0 و 10- درجه سانتی‌گراد و گاز نیتروژن فشرده سرد همراه با افشانه روغن (CCNGOM[4]) بر سایش ابزار را بررسی کرد. بر مبنای گزارش آن‌ها بهترین عمر ابزار در حالت CCNGOM بدست می‌آید [21]. سو در کار دیگری گزارش کرد که در تراشکاری آلیاژ اینکونل 718، هوای برودتی و روانکاری کمینه با هوای سرد (CAMQL[5]) منجر به کاهش شدید سایش ابزار و زبری سطح و بهبود قابل‌توجه در شکل براده می‌شود. همچنین در فرزکاری AISI D2 ، هوای برودتی نسبت به خشک و روانکاری کمینه، منجر به عمر ابزار طولانی‌تر و زبری سطح نسبتاً بیشتر می‌شود. بنابراین به نظر می‌رسد هوای خنک‌ساز علاوه بر اینکه می‌تواند دوستدار محیط‌زیست باشد، می‌تواند بهبودهایی در زمینه ماشین‌کاری مواد سخت برش داشته باشد [5].

با وجود روانکاری خوب تکنیک روانکاری کمینه در سنگزنی در مقایسه با روش پاشش پیوسته سیال، روانکاری کمینه با توجه به منحنی‌های دمایی بدست آمده نمی‌تواند نیازمندی‌های خنک‌سازی را فراهم آورد و این دلیل اصلی است که کاربرد همه جانبه آن را محدود می‌کند [17]. همچنین طبق

1- Vortex Tube

2- High Speed
3- Compressed cold nitrogen gas
4- Compressed cold nitrogen gas and oil mist
5- Cold Air with Minimum Quantity Lubrication

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

مرور ادبیات صورت گرفته مکانیزم افزایش هدایت گرمایی سیال روانکاری کمینه هنوز واضح و مشخص نیست. با توجه به مراجع [14،15] بر خلاف فولادهای سخت، در سنگ‌زنی روانکاری کمینه فولادهای نرم زبری سطح نسبت به روش پاشش پیوسته سیال بیشتر است. علت این امر به میزان بالای شکل‌پذیری و جریان مواد و نیز مکانیزم براده برداری نرم در حین دمای بالای سنگزنی در این فولادها نسبت داده می‌شود که حرکت براده به اطراف و رسوب مجدد براده‌ها را تشدید می‌کند.

چنانچه از بررسی مقالات دیده شد بیشتر کارهای انجام‌شده در این زمینه مربوط به بررسی پارامترهای روانکاری کمینه و سنگ‌زنی بوده و در جهت بهبود خاصیت روانکاری و آزمایش در مورد به‌کارگیری انواع مختلف روغن سنگ‌زنی بوده است. کمتر کار انجام شده بر روی بهبود خاصیت خنک‌کاری این روش نیز مربوط به استفاده از تجهیزات گران‌قیمت یا گازهای مصرفی همچون نیتروژن بوده است. از منظر اقتصادی و محیط‌زیستی که همانا به حداقل رساندن مصرف در این روش است، نمی‌توان چشم‌اندازی برای فراگیر شدن این روش قائل بود.

هدف پروژه حاضر بهبود خنک‌کاری جت هوای روانکاری کمینه با به‌کارگیری دستگاه ساده و ارزان‌قیمت خنک‌کن هوای چرخشی است که قادر است نسبت به دمای محیط، هوای سرد فشرده با دمای کمتری را فراهم آورد. به عبارتی دیگر هدف از تحقیق حاضر، افزایش میزان حرارت دفع شده توسط روانکار- خنک‌کار، با کاهش دمای جت هوای ورودی، به‌منظور کاهش گرمای ورودی به قطعه‌کار و کاهش آسیب‌های سطحی و دست‌یابی به کیفیت سطح بهتر است. از این رو با به‌کارگیری دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی، اقدام به آزمایش در مورد تأثیر جت هوای برودتی با فشار و دماهای مختلف در عملیات سنگزنی فولاد ساده کربن متوسط CK45 (فولاد نرم) گردید. بدین منظور با استفاده از سامانه‌ای، ضریب انتقال حرارت جابجایی شرایط مختلف محیط روانکاری کمینه اندازه‌گیری شد. سپس به منظور بررسی مکانیزم انتقال حرارت در تکنیک روانکاری کمینه و توان خنک‌کاری ورتکس تیوب، شبیه‌سازی دمایی سامانه مذکور انجام گردید. در نهایت، آزمایش‌های سنگزنی نمونه فولادی انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه گردیده است. همچنین شرح ارتباط بین ضرایب انتقال حرارت و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های سنگزنی بیان شده است.

2- شرایط و تجهیزات انجام آزمایش‌ها

در این بخش ضمن معرفی تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها، جزئیات مربوط به نحوه انجام آزمایش‌ها ارائه می‌گردد. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق به دو فاز اصلی تقسیم می‌شوند. فاز اول مربوط به اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی در چهار فشار و دمای مختلف با استفاده از خنک‌کن هوای چرخشی و فاز دوم مربوط به آزمایش‌های سنگ‌زنی است.

2-1- شرایط و تجهیزات آزمایش اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی

مشابه روش پیشنهادی در کتاب انتقال حرارت اینکروپرا و وایت سامانه‌ای برای اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی محیط‌های مختلف روان‌کاری کمینه طراحی و ساخته شد [22]. این سامانه شامل یک بورد عایق حرارت، قطعه فولادی (که در معرض پاشش سیال قرار می‌گیرد)، المنت فشنگی به‌عنوان منبع حرارت، سه عدد ترموکوپل، یک ترمومتر دیجیتال، دو عدد مولتی‌متر[1] و یک دستگاه کامپیوتر است(شکل 2).

بورد عایق از جنس کلسیم سیلیکات با ضریب هدایت حرارت $(W/m^2.K)$ 0/1 در دمای ℃ 400 ، ابعاد mm^2 180x80 و ضخامت mm 50، است. بر روی سطح بورد عایق شیاری با ابعاد mm^2 90x10 و عمق mm 12 با استفاده از ماشین فرز دور بالا و ابزار HSS ماشین‌کاری گردیده است. قطعه فولادی از جنس CK45 با ضریب هدایت حرارت $(W/m^2.K)$ 41 در دمای ℃ 400 و با ابعاد مشابه شیار روی بورد عایق ماشین‌کاری شده است. سوراخی به قطر mm 6/5 و عمق mm 85 در داخل قطعه فولادی ایجاد شده و المنت فشنگی 200 وات با همان ابعاد سوراخ ایجاد شده به‌عنوان منبع حرارتی با انطباق پرسی در داخل سوراخ مذکور قطعه فولادی مونتاژ گردیده است. سه عدد سوراخ به قطر mm 0/7 و با فواصل مساوی از هم و فاصله mm 2 از سطح فوقانی قطعه فولادی و عمق mm 5 به روش سوپر دریل برای جاگذاری ترموکوپل‌ها ایجاد شده است. قطعه فولادی توسط چسب مقاوم در برابر حرارت در داخل شیار ایجاد شده روی بورد عایق قرار داده شده و سه عدد ترموکوپل، در سوراخ‌های مذکور جا زده شده است. ترموکوپل‌ها به یک ترمومتر مدل سری K و ترمومتر نیز با کابل RS232 به کامپیوتر متصل شده‌اند. داده‌های دمایی با استفاده از نرم‌افزار سیستم اندازه‌گیری لوترون[2] ثبت شده و در فایل اکسِل[3] استخراج[4] گردید. در مسیر اتصال منبع حرارتی به برق V 220 شهری دو عدد مولتی‌متر برای اندازه‌گیری ولتاژ ورودی به سامانه و شدت جریان عبوری از آن قرار داده شده است.

شیوه کار بدین صورت است که با اتصال سامانه به برق شهری، منبع حرارتی شروع به گرم شدن می‌کند. نمودار دما نسبت به زمان به‌صورت آنلاین افزایش دما با شیب تند را نشان می‌دهد. سپس سیستم هوای فشرده سرد با روانکاری کمینه را فعال نموده و شروع به پاشش افشانه روغن-هوا به روی سطح قطعه فولادی می‌کند (در حالت هوای سرد از سیستم روانکاری کمینه استفاده نمی‌شود و تنها جت هوای سرد در معرض برخورد با سطح فلز است). با انتقال حرارت به‌صورت جابجایی از سطح فوقانی قطعه‌کار توسط جت هوا شیب نمودار دما نسبت به زمان کمتر می‌شود تا بالاخره نمودار بدون شیب و به حالت افقی به روند خود ادامه می‌دهد. در این حالت نرخ انرژی ورودی به سیستم با نرخ انرژی خروجی از آن برابر بوده و اصطلاحاً سیستم پایا می‌شود (شکل 4).

با در نظر گرفتن فرض‌های زیر:

1. تمامی انرژی ورودی به سیستم به گرما تبدیل می‌شود.
2. تنها سطح قطعه‌کار برای انتقال حرارت، سطح فوقانی آن که در معرض پاشش سیال برشی است، می باشد.
3. مدار الکتریکی بسته شده یک مدار ساده اهمی است و می‌توان از خاصیت سلفی اجزا آن صرف‌نظر کرد.

و پس از رسیدن سامانه به شرایط پایا (برابر شدن نرخ انرژی ورودی با نرخ انرژی خروجی) که همان شرایط عدم تغییر دما نسبت به زمان است، می‌توان رابطه (1) را به‌کار برد:

$$\dot{Q}_{in} = \dot{Q}_{out} \quad (1)$$

با پایا شدن سیستم، ولتاژ و شدت جریان عبوری از مولتی‌مترها ثبت شده که این مقادیر برای هر دو شرایط محیطی متفاوت مورد آزمایش در جدول 2 نشان داده شده است. اکنون با در دست داشتن این داده‌ها و به کمک قوانین اُهم و سرمایش نیوتن می‌توان ضریب انتقال حرارت جابجایی را برای هر کدام از محیط‌های روان‌کاری کمینه بدست آورد. بر اساس قانون سرمایش نیوتن داریم:

1- Multimeter

2- Lutron Measurement system
3- Excel
4- Export

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

$$q = hA(T_s - T_\infty) \quad (2)$$

که در آن q نرخ انرژی خروجی از سیستم بر حسب وات که همان حرارت دفع شده از سطح قطعه‌کار توسط سیال روان‌کاری کمینه است، h ضریب انتقال حرارت جابجایی سیال روان‌کاری کمینه بر حسب $W/m^2.K$، A مساحت سطحی که در معرض انتقال حرارت جابجایی قرار دارد بر حسب m^2، T_s دمای قطعه‌کار (میانگین دمای سه ترموکوپل) و T_∞ دمای هوای خروجی از نازل روان‌کاری کمینه بر حسب کلوین می‌باشند. با صرف‌نظر از خاصیت سلفی اجزا مدار الکتریکی، این مدار یک مدار ساده اهمی خواهد بود که توان آن از رابطه (3) بدست می‌آید:

$$P = E \cdot I \quad (3)$$

که در آن P توان ورودی به سیستم بر حسب وات که همان نرخ انرژی ورودی است، E ولتاژ ورودی و I شدت جریان عبوری از مدار است. با جاگذاری روابط (2) و (3) در رابطه (1) خواهیم داشت:

$$hA(T_s - T_\infty) = E \cdot I \rightarrow h = \frac{E \cdot I}{A(T_s - T_\infty)} \quad (4)$$

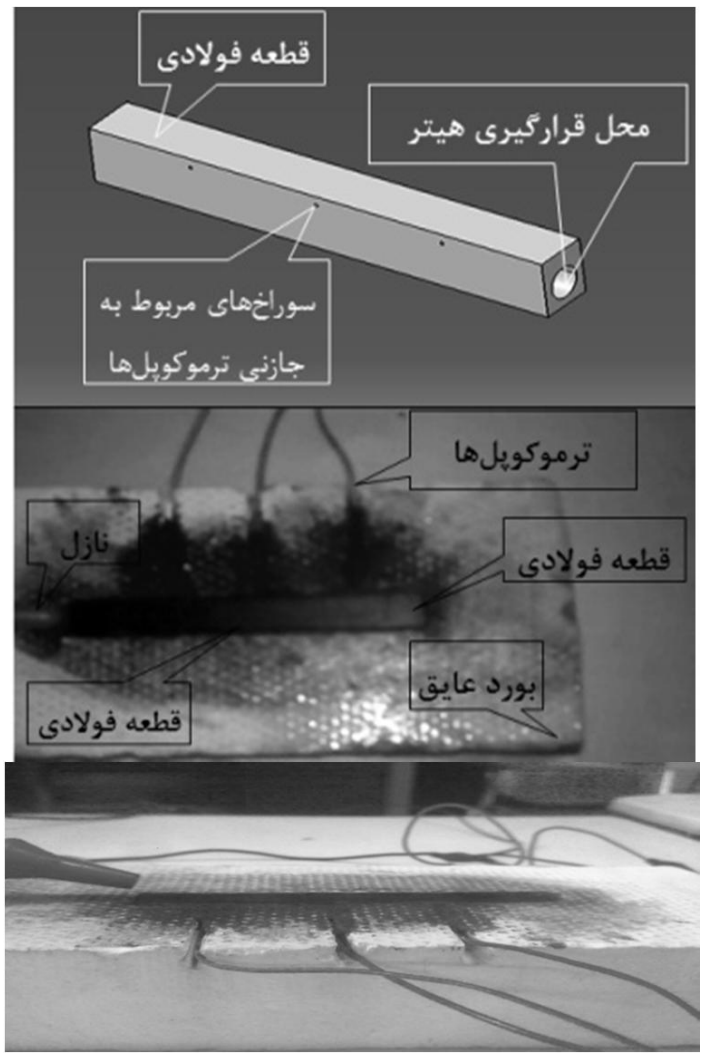
با پیچ قابل تنظیم در انتهای گرم تیوب می‌توان فشار و در نتیجه دمای خروجی قسمت خنک تیوب را تغییر داد. بنا به پیشنهاد سازنده ورتکس تیوب بهترین عملکرد ورتکس تیوب در فشار 7 بار ورودی به آن است. در فشار مذکور و دمای 24 °C هوای کمپرسور ورودی به ورتکس تیوب، فشار دینامیکی و دمای در قسمت سرد تیوب اندازه‌گیری شد. با بستن کامل پیچ قابل تنظیم، فشار خروجی در قسمت سرد ورتکس تیوب مورد استفاده، فشار 4 بار با دمای 14 °C اندازه‌گیری شد و با باز کردن پیوسته پیچ تنظیم، فشار خروجی هوای سرد به‌طور پیوسته تا فشار 1 بار کاهش پیدا می‌کند و دارای دمای سردتر -4 °C است. در فشارهای 3 و 2 بار خروجی قسمت سرد تیوب، به ترتیب دارای دمای 7 و 1 درجه سانتی‌گراد است.

دستگاه روانکاری کمینه مورد استفاده در انجام آزمایش‌ها ، دارای دو پمپ پیستونی پنوماتیکی جهت ارسال حداقل مقدار روغن روانکار به نازل خروجی است. روغن خروجی (مقدار دبی سیال مصرفی) توسط تنظیم پنوماتیکی و کورس پمپ‌ها قابل‌تغییر است. به منظور استفاده از جت هوای سرد دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی، شیر ورودی هوای دستگاه روانکاری کمینه بسته شده و فقط شیر ورودی روغن باز است. بدین صورت با انتقال روغن توسط دستگاه روانکاری کمینه از شیلنگ موئینی و هم‌محوری شیلنگ مذکور با شیلنگ جت هوای سرد از دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی، روغن و هوا در سر نازل مخلوط می‌گردند. در خروجی نازل، قطرات روغن توسط هوای فشرده به صورت افشانه روغن-هوای سرد به منطقه مورد نظر هدایت می‌گردند.

هر آزمایش اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی دو مرتبه تکرار گردیده و میانگین داده‌های بدست آمده به‌عنوان نتیجه گزارش شده است. پس از انجام هر تست، سطح قطعه‌کار از افشانه روغن مانده از تست قبل تمیز شده و قبل از شروع آزمایش بعدی به قطعه‌کار فرصت خنک شدن تا دمای محیط داده می‌شود.

2-2- شرایط و تجهیزات آزمایش‌های سنگزنی

در آزمایش‌های سنگزنی، قبل از انجام هر تست، ابتدا چرخ سنگ در شرایطی یکسان توسط دِرسر الماس تیز گردید تا سطح چرخ سنگ کاملاً تمیز شده و از باقی نماندن پلیسه‌ها در لابه‌لای ذرات ساینده اطمینان حاصل شود. بعد از تنظیم دستگاه در هر تست، عمل سنگ‌زنی به شکل پاندولی و در جهت طولی قطعه‌کار انجام شد.



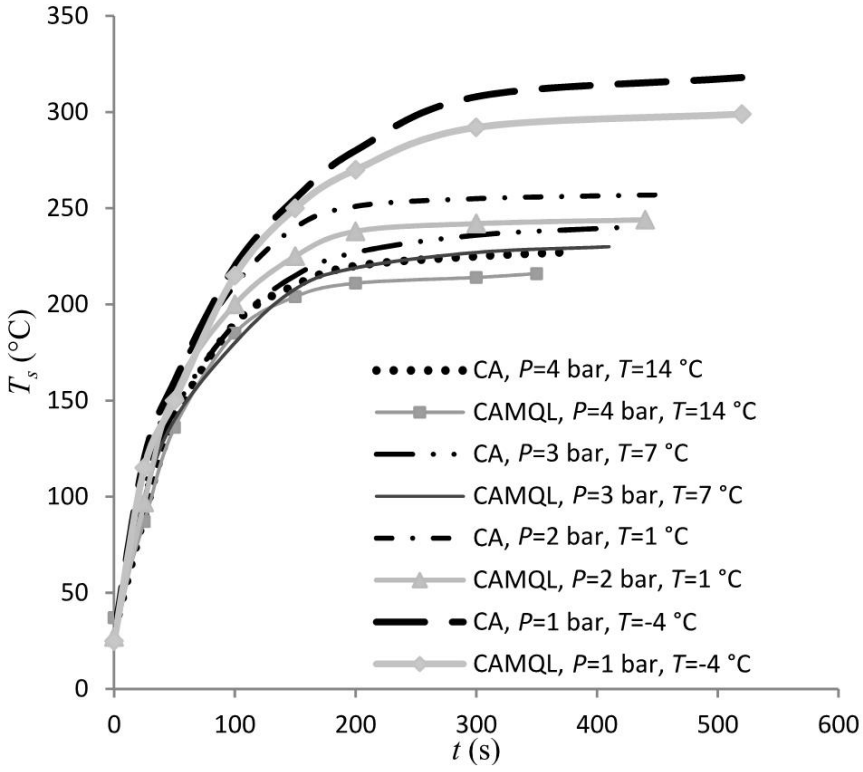
شکل 2 سامانه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی

جدول 1 شرایط آزمایش‌های اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی و آزمایش‌های سنگزنی

نوع سنگزنی	سنگزنی موافق (تخت)
چرخ‌سنگ	چرخ‌سنگ اکسید آلومینیوم (89A60K5V217)
جنس قطعه‌کار	فولاد ساده کربن متوسط CK45 با 0/45 درصد کربن (90 HRB)
ابعاد قطعه‌کار	عرض (10 میلیمتر)، طول (60 میلیمتر)
ماشین سنگزنی	دستگاه سنگزنی تخت، شرکت بولم آلمان
دستگاه روانکاری کمینه	RSK 100، ساخت شرکت رویال صنعت خاوران
دستگاه نیروسنج	مدل 92558 شرکت کیستلر آلمان
سرعت چرخ‌سنگ	20 متر بر ثانیه
پیشروی طولی	4000 میلیمتر بر دقیقه
عمق برش	5، 10 میکرومتر
تعداد پاس برش	5 پاس
محیط‌های خنک‌کار-روانکار	خشک، سیال برشی با پاشش پیوسته، روانکاری کمینه
سیال برشی در پاشش پیوسته	روغن حل‌شونده در آب (غلظت 5 درصد)
ابزار دِرِس	الماس تک لبه
تعداد پاس دِرِس	45 میکرومتر
سرعت پیشروی دِرِس	300 میلیمتر بر دقیقه
روغن روانکاری کمینه	روغن استر (بهران RS 1642)
دبی روغن روانکاری کمینه	120 میلی‌لیتر بر ساعت
فشار و دمای هوای فشرده	4 (14 °C)، 3 (7 °C)، 2 (1 °C)، 1 (-4 °C) بار
مدل ورتکس تیوب	CC3004
جنس ورتکس تیوب	Ss304
فشار هوای ورودی به ورتکس تیوب	7 بار
دمای هوای ورودی به ورتکس تیوب	24 درجه سانتی‌گراد
فشارسنج	با دقت 0/2 بار
رگلاتور	5 میکرون ساخت کره‌جنوبی با فیلتر آب نوع TPC

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

شکل 3 چیدمان تجهیزات مورد استفاده در انجام آزمایش‌های سنگزنی



شکل 4 منحنی دما-زمان در فشارهای مختلف در دو محیط هوای خنک‌کار(CA) و هوای خنک‌کار با روانکاری کمینه (CAMQL)

جهت افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج، هر آزمایش پنج مرتبه تکرار گردید و پس از حذف داده‌های غیرصحیح، میانگین نیروهای مماسی و عمودی سنگ‌زنی استخراج گردید. زبری سطح قطعات ماشین‌کاری شده تحت شرایط مختلف نیز در نُه نقطه مختلف در جهت عمود بر راستای سنگ‌زنی اندازه‌گیری شده و میانگین آن‌ها به‌عنوان زبری سطح در نظر گرفته شد. شرایط کلی انجام آزمایش‌ها در جدول 1 ارائه شده است. چیدمان تجهیزات سنگزنی نیز در هنگام اجرای آزمایش در شکل 3 نشان داده شده است.

3- نتایج آزمایش‌ها و بحث

در این بخش به نتایج آزمایش‌های انجام شده ضریب انتقال حرارت جابجایی و آزمایش‌های سنگزنی و بحث پیرامون نتایج آن‌ها پرداخته شده است.

3-1- آزمایش‌های ضریب انتقال حرارت جابجایی

مقدار میانگین دمایی اندازه‌گیری شده از سه ترموکوپل، برای هر آزمایش درفشارهای 1،۲،۳،۴ بار مربوط به هوای سرد (CA)و هوای سرد با روانکاری کمینه (CAMQL) در جدول 2 آمده است. نمودار دمای پایا- زمان متناسب با جدول 2 نیز، در شکل 4 نشان داده شده است.

همان‌طور که از جدول 2 و شکل 4 دیده می‌شود، در دو حالت هوای خنک‌کار و هوای خنک‌کار با روانکاری کمینه؛ با افزایش فشار، دمای پایا کمتر می‌شود هرچند فشار بیشتر در مقایسه با فشار کمتر دمای بیشتری دارد. اگرچه جت هوا با فشار کمتر دارای دمای کمتری است ولی به دو دلیل دمای پایای بیشتری دارد. اول اینکه به دلیل سرعت بالای هوا و فشار دینامیکی آن، زمان برخورد مولکول‌های هوا به سطح فلز در حال گرم شدن بسیار کم است. ازاین‌رو عمده انتقال حرارت صورت گرفته بین مولکول‌های هوا با سطح فلز به‌صورت جابه‌جایی واداشته[1] است [22]. به عبارت دیگر فاکتور تعداد مولکول‌های هوا نسبت به دمای آن، عامل مهم‌تری محسوب می‌شود. دلیل دوم نیز اینکه مقدار دمای پایین هوا در فشار کمتر به حدی نیست که بتواند بر عامل فشار غلبه کند. به‌عبارتی دیگر در فشار 4 بار به علت سرعت بسیار بالای مولکول‌های هوا، می‌توان از انتقال گرمای جابه‌جایی آزاد[2](یا طبیعی) چشم‌پوشی کرد، بطوریکه انتقال حرارت به‌صورت جابه‌جایی واداشته است. از شکل 4 نیز دیده می‌شود که در فشار بیشتر سامانه در زمان کمتری به دمای پایا می‌رسد که نشان‌دهنده اثر بهتر فشار بالاتر در خنک‌کاری توان حرارتی موجود است.

همچنین مشخص است که با افزودن روانکاری کمینه در فشار معین، دمای پایا کاهش می‌یابد که نشان‌دهنده مشارکت افشانه روانکار در خنک‌کاری است، اما کاهش دمای پایا به میزان قابل‌توجهی نیست و به‌طور متوسط تنها در حدود 5% از انتقال حرارت جابجایی بر عهده روانکار است (جدول 2). در انتقال حرارت توسط روان‌کاری کمینه، سهم عمده عمل دفع حرارت بر عهده هوای فشرده است و نقش عمده روغن عمل روان‌کاری در منطقه ماشین‌کاری است و ضرایب انتقال حرارت بدست آمده برای هوای فشرده خالی بدون روغن و هوای فشرده با روغن خیلی به هم نزدیک هستند (جدول 3). از طرفی وقتی صحبت از انتقال حرارت در روش روان‌کاری کمینه می‌کنیم، تنها انتقال حرارت جابجایی توسط گاز مطرح نیست بلکه هدایت حرارت توسط قطرات پاشیده شده روغن روی قطعه‌کار و همچنین جوشش و تبخیر این قطرات هم در فرایند دفع حرارت از قطعه‌کار تأثیر دارند [23،24]. نکته دیگر جدول 2 این است که سهم انتقال حرارت افشانه روغن در فشار کمتر، بیشتر است. از آنجایی که جت هوا در فشار پایین، دمای کمتری دارد، دمای کمتر خود افشانه روغن معلق در این جت هوا، موجب می‌شود که سهم بیشتری در انتقال حرارت داشته باشند. به‌عبارت‌دیگر در فشار 1 بار که سرعت مولکول‌های هوا کم و دارای دمای بسیار کم هستند، علاوه بر انتقال حرارت واداشته، انتقال گرمای جابه‌جایی آزاد قابل چشم‌پوشی نیست. به عبارتی دیگر، در این حالت انتقال حرارت به صورت آمیخته[3] است. به عبارت ساده‌تر به علت سرعت کمتر جت هوا در فشار کمتر و اختلاف دمایی بیشتر بین دمای جت هوا و قطعه‌کار در حال گرم شدن، انتقال حرارت به صورت آمیخته بیشتر است (نسبت به حالت جت هوا با فشار بیشتر). این امر در ضرایب انتقال حرارت نیز که در جدول 3 آمده است، دیده می‌شود. چنانچه پیداست، در یک فشار معین، اختلاف ضریب انتقال حرارت در دو محیط هوای سرد و هوای سرد با روانکاری کمینه در فشار کمتر (که دمای سردتری دارد) بیشتر است.

1- Force Convection
2- Free (or natural) Convection
3- Mixed Convection

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

جدول 2 فشار، دمای خروجی نازل، دمای پایا و ولتاژ و شدت جریان عبوری اندازه‌گیری شده در دو محیط متفاوت

فشار (بار)	دمای خروجی هوای سرد (T_∞)	دمای پایای محیط CA ($T_{s\text{-}CA}$)	دمای پایای محیط CAMQL ($T_{s\text{-}CAMQL}$)	شدت جریان عبوری محیط CA (I_{CA})	شدت جریان عبوری محیط CAMQL (I_{CAMQL})	ولتاژ ورودی محیط CA (V_{CA})	ولتاژ ورودی محیط CAMQL (V_{CAMQL})	میزان کاهش دما در حالت روانکاری کمینه (°C)	میزان کاهش دما در حالت روانکاری کمینه (درصد)
4	14	227	216	0/815	0/805	211/2	214/6	11	4/8
3	7	240	230	0/83	0/81	207/7	212	10	4/2
2	1	257	243	0/825	0/8	209/2	203/3	14	5/1
1	-4	318	299	0/84	0/82	204	210/8	19	5/9

با جاگذاری داده‌های بدست آمده از جدول 2 به طور جداگانه در رابطه (4) می‌توان ضرایب انتقال حرارت جابجایی را برای دو محیط مختلف هوای سرد (CA) و هوای سرد با روانکاری کمینه(CAMQL) محاسبه نمود. این ضرایب در جدول 3 آورده شده است.

طبق نتایج جدول 3 چنانچه مورد انتظار نیز بود، نتایج حالت CA و CAMQL خیلی به هم نزدیک است. با این حال ضریب انتقال حرارت جابجایی در حالت CAMQL بیشتر است و روغن روانکاری کمینه در دفع حرارت بی‌تأثیر نیست. همان‌طور که در بخش قبلی نیز اشاره شد، صرف‌نظر از دمای جت هوا، با افزایش فشار آن دفع حرارت بصورت قابل‌توجهی افزایش می‌یابد و درنتیجه ضریب انتقال حرارت جابجایی نیز بیشتر می‌شود.

3-2- شبیه‌سازی دمای پایای سامانه اندازه‌گیری ضریب انتقال حرارت جابجایی

چنانچه اشاره شد در بحث دمای پایا و بهبود ضریب انتقال حرارت جابجایی تأثیر افزایش فشار بیشتر از تأثیر کاهش دمای جت هوا است، اما اینکه در چه شرایطی و چه میزان کاهش دما می‌تواند توان خنک‌کاری همانند افزایش فشار داشته باشد مشخص نیست. به‌منظور مشخص شدن این مسئله و نیز پیش‌بینی دمای پایا و ضریب انتقال حرارت جابجایی در فشارها و دماهای مختلف اقدام به شبیه‌سازی دمای پایای سامانه شد. از آنجایی که نتایج دمای پایا برای هوای خنک‌کار خشک و هوای خنک‌کار با روانکاری کمینه نزدیک به هم هستند و تفکیک اثرات اجزا مختلف دخیل در امر انتقال حرارت روان‌کاری کمینه پیچیدگی‌های خاص خود را دارد، شبیه‌سازی پیش‌بینی دمای پایا با هوای خنک‌کار بدون روانکاری کمینه در فشارها و دماهای مختلف انجام پذیرفته است.

3-2-1- شرایط شبیه‌سازی

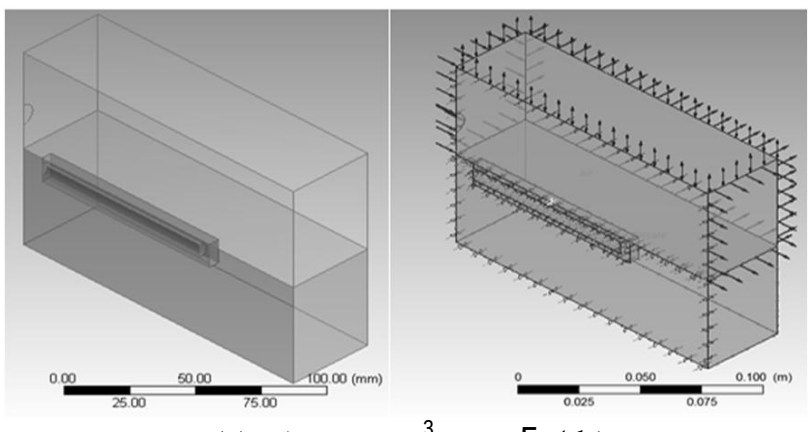
شبیه‌سازی در نرم‌افزار انسیس CFX انجام شده است. در این نرم‌افزار از یک روش ترکیبی که روش حجم محدود مبتنی بر المان[1] نامیده می‌شود، استفاده می‌گردد. در این روش توابع شکل برای توصیف تغییر متغیرها روی یک المان استفاده می‌شود. حجم‌های کنترلی اطراف هر گره به وسیله اتصال مراکز هندسی المان‌ها تشکیل می‌گردد. همانند روش حجم محدود، معادلات بقا به فرم انتگرالی به این حجم‌های کنترل اعمال می‌شود. همچنین شارهای[2] عبوری از مرزهای حجم کنترل و جملات منبع نیز بر اساس المان حساب می‌شوند.

همه شرایط مرزی نیز همان‌طور که در فیزیک مسئله بوده است در شبیه‌سازی نیز در نظر گرفته شده است، از جمله هندسه (فاصله عمودی مرکز نازل تا سطح قطعه 15mm؛ فاصله افقی مرکز نازل تا قطعه 10mm)، دما و فشار خروجی نازل (پارامترهای ورودی متغیر شبیه‌سازی) متناسب با فشارها و دماهای ورتکس تیوب در چهار حالت مختلف، جهت جریان ورودی نازل(با زاویه 30 درجه نسبت به سطح فلز)، تولید حرارت توسط هیتر (به صورت شار، با تقسیم توان هیتر به مساحت سطح بیرونی آن) و غیره. به علت تقارن فقط نصف سامانه شبیه‌سازی شده است تا حجم محاسبات کاهش پیدا کند (شکل 5).

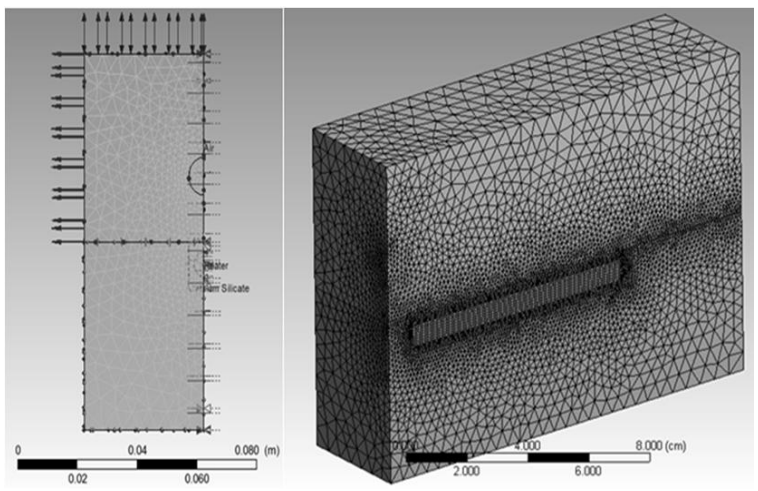
در مش‌بندی این نکته لحاظ شده است که در نزدیک سطح استیل که بخش مهم آزمایش است، و همچنین اطراف ورودی نازل، از شبکه‌ی ریزتری استفاده شده است تا دقت شبیه‌سازی بیشتر شود (شکل6).

جدول 3 ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده برای محیط‌های مختلف در فشار و دماهای متفاوت

فشار (بار)	دمای جت هوای سرد (°C)	شرایط محیط	ضریب انتقال حرارت جابجایی h (W/m².K)
4	14	CA	794
4	14	CAMQL	812
3	7	CA	762
3	7	CAMQL	778
2	1	CA	710
2	1	CAMQL	729
1	-4	CA	650
1	-4	CAMQL	672



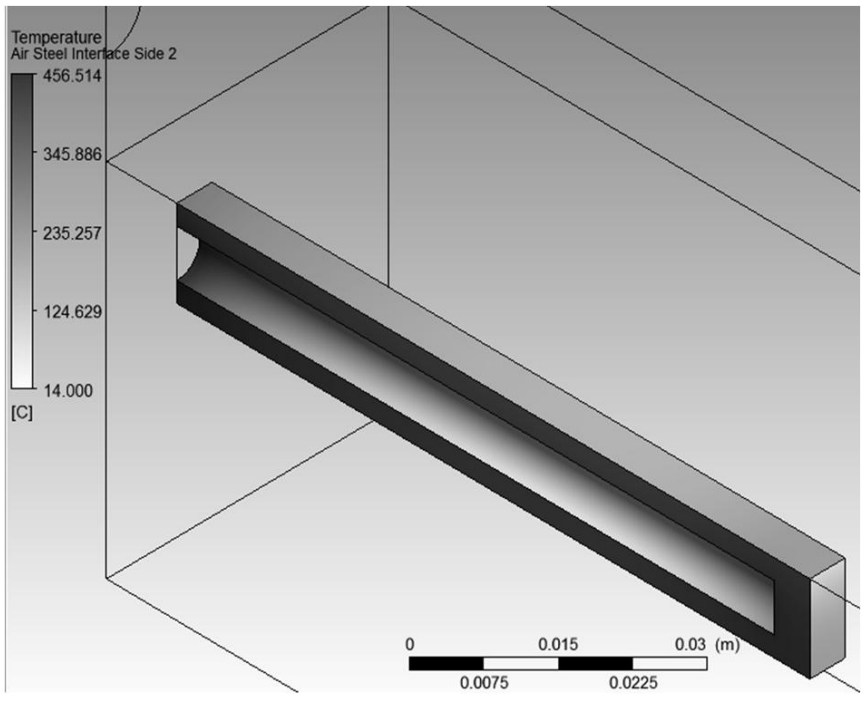
شکل 5 وضعیت[3] و هندسه مدل سامانه



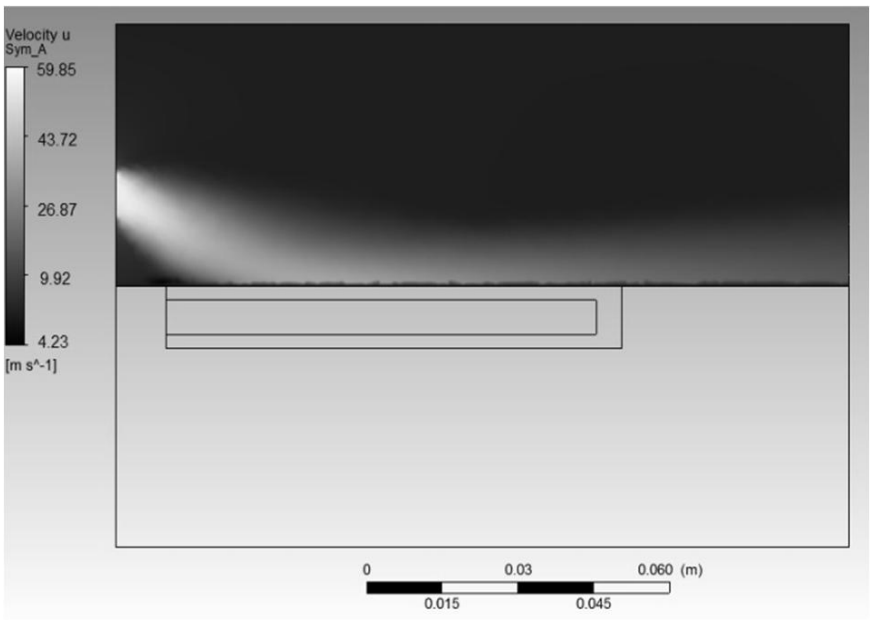
شکل 6 مش‌بندی مدل

1- Element Based Finite Volume
2- Flux
3- Setup

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]



شکل 7 نتیجه دمای پایای شبیه‌سازی سامانه



شکل 8 نتیجه پروفیل سرعت جت هوای شبیه‌سازی

همچنین در این شبیه‌سازی علاوه بر در نظر گرفتن معادلات پیوستگی[1]، انرژی و حرکت[2]، برای دقت بیشتر و رسیدن به نتایج واقعی‌تر معادلات گردابه‌های نوسانی توربولانسی[3] و انرژی جنبشی توربولانسی [4] نیز در شبیه‌سازی لحاظ شده‌اند و در ناحیه سیال هوا، مدل توربولانسی تنش برشی انتقالی[5] به‌کاربرده شده است.

بین سطوح تماس[6] قسمت‌های مختلف، از جمله سطح تماس هوا با فلز، هوا با کلسیم سیلیکات، استیل با کلسیم سیلیکات و فلز با هیتر، مدل انتقال حرارتی به‌صورت بقای شار سطوح تماس[7] و اتصال مش‌ها[8] در سطوح تماس از نوع GGI در نظر گرفته شده است. روش اتصال GGI به گروهی از اتصالات شبکه اطلاق می‌شود که در آن شبکه هر دو سمت سطح مشترک، بر یکدیگر منطبق نباشند. در حالت کلی، روش اتصال GGI، امکان استفاده از گره‌های غیر منطبق در دو سمت سطح مشترک، المان‌های متفاوت در دو سطح مشترک، سطح مشترک‌های غیر هم‌اندازه با شکل‌های متفاوت و حتی فیزیک جریان متفاوت در عرض سطح مشترک را فراهم می‌آورد (شکل 6).

معیار همگرایی[9] از نوع باقی‌مانده[10] RMS و از مرتبه 6- ^10 است.

1- Continuity
2- Momentum
3- Turbulence Eddy Frequency
4- Turbulence Kinetic Energy
5- Shear Stress Transport
6- Interface
7- Conservative Interface Flux
8- Mesh Connection
9- Convergence Criteria
10- Residual

حل‌گرهای استفاده شده، آپ‌وند[11] و دقت بالا[12] بوده که در آن بین فشار و سرعت کوپلینگی از نوع رِهی-چو[13] مرتبه‌ی چهارم لحاظ شده است که باعث پایداری بیشتر حل‌گر شده است. درنهایت نتیجه دمای پایای شبیه‌سازی حاصل از شبیه‌سازی دمای پایا و پروفیل سرعت جت هوا، به ترتیب به‌صورت شکل 7 و شکل 8 مشاهده می‌شود (به عنوان نمونه، نتایج مذکور در فشار 4 بار و دمای 4- درجه سانتی‌گراد جت هوا می‌باشند).

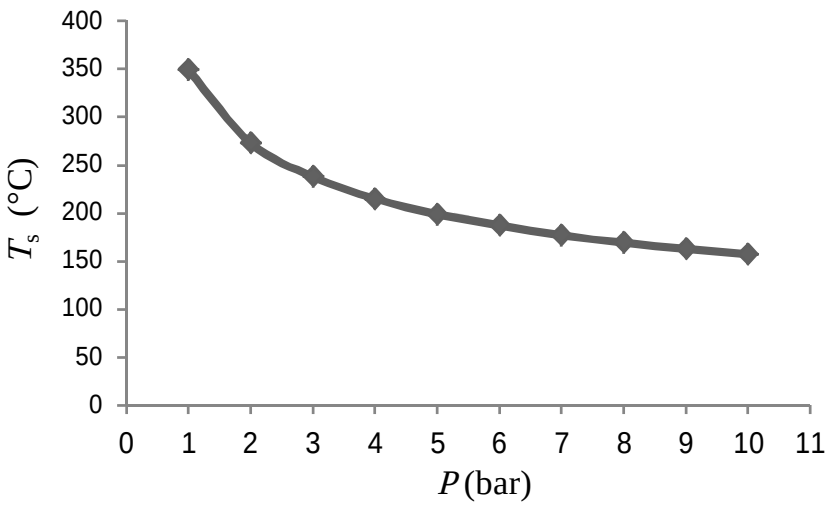
3-2-2- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی دمای پایا و مقایسه آن با نتایج تجربی در جدول 4 آمده است. همان‌طور که دیده می‌شود درصد خطای قابل‌قبول کمتر از 7% نشان از تطابق قابل‌قبول نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی است.

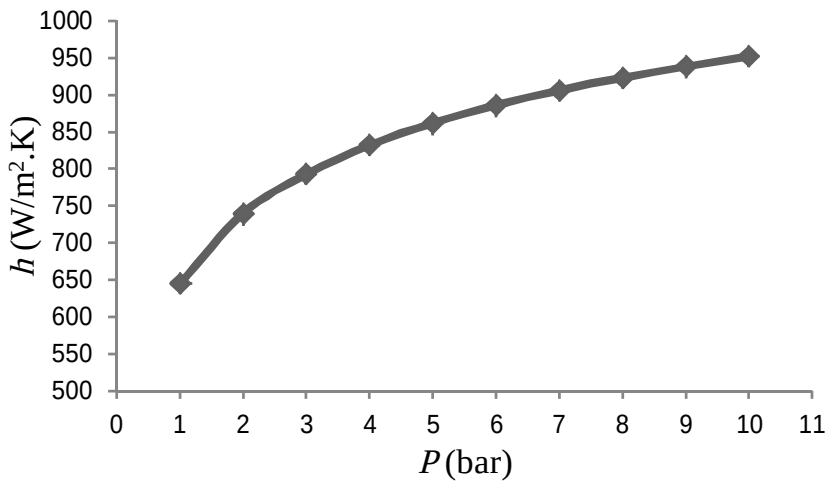
شکل 9 نتایج دمایی شبیه‌سازی را با در نظر گرفتن دمای ثابت محیط 25 درجه سانتی‌گراد برای فشارهای مختلف، نشان می دهد.. با استفاده از این مقادیر دمایی و فرض متوسط نتایج جدول 2 برای ولتاژ و شدت جریان، ضریب انتقال حرارت جابجایی برای فشارهای مختلف در این حالت محاسبه شد که مقادیر این ضرایب محاسبه شده به صورت منحنی در شکل 10 آمده است.

جدول 4 مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی

فشار (بار)	دمای جت هوا (°C)	دمای پایای میانگین سه ترموکوپل (°C)	دمای پایای شبیه‌سازی (°C)	اختلاف دما (°C)	درصد خطا
4	14	227	211	16	7
3	7	240	229	11	4/5
2	1	257	261	6	2/3
1	-4	325	318	17	5/3



شکل 9 منحنی دمای پایای شبیه‌سازی درفشارهای مختلف با دمای محیط



شکل 10 منحنی ضریب انتقال حرارت جابجایی محاسبه شده در فشارهای مختلف با استفاده از نتایج دمای پایای شبیه‌سازی

11- Upwind
12- High Resolution
13- Rhie-Chow

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

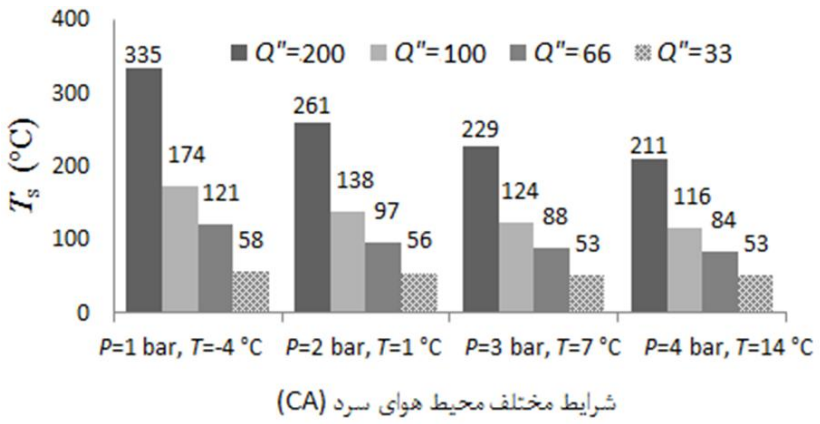
از شکل 9 می‌توان دید که افزایش فشار در فشارهای پایین‌تر موجب کاهش دمای پایای بیشتری نسبت به افزایش فشار در فشارهای بالاتر می‌شود. به عبارتی دیگر شیب نمودار در حال کاهش است. دلیل این امر از اشکال 7 و 8 توضیح داده می‌شود.

چنانچه از شکل 8 پیداست، با توجه به خاصیت تراکم‌پذیری و پروفیل سرعت جریان جت هوا، حوزه دمایی به وجود آمده بسیار غیریکنواخت است (شکل 7). در منطقه‌ای کمی عقب‌تر از منطقه تماس جت هوا با سطح، دمای هوا نزدیک به دمای محیط است. بنابراین، خنک‌کاری جت هوا تنها به سطح فلزی که با آن در تماس است محدود است. همچنین خنک‌کاری به ناحیه داخل دیواره جت موثر محدود می‌شود (شکل 8). جت هوا، به محض برخوردش با سطح قطعه‌کار، به صورت جانبی در راستاهای عمود بر جهت جریان دیواره جت به صورت قطری گسترش[1] می‌یابد. بنابراین، سرعت جت هوا با فاصله گرفتن از نازل کاهش می‌یابد .در فشارهای بالا، به دلیل اختلاف بیشتر فشار جت با فشار محیط گسترش دیواره جت نیز بیشتر می‌شود. از همین رو شیب نمودار دمای پایا در فشارهای بیشتر کاهش می‌یابد. به عبارتی دیگر، اتلاف جت هوا در فشارهای بالاتر، بیشتر است. در فاصله مشخصی از جت متلاطم و دورتر از ناحیه برخورد، جت هوا دیگر نقشی در خنک‌سازی ندارد که به خاطر جدایی جت است [25]. به عبارتی دیگر، ناحیه موثر خنک‌کاری عمدتاً به سطح ناحیه برخورد جت هوا محدود می‌شود. بنابراین افزایش فشار در فشارهای پایین‌تر موجب افزایش بیشتر مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبت به افزایش فشار در فشارهای بالاتر می‌شود. همچنین فشارهای بالاتر علاوه بر افزایش خطر پخش شدن ذرات روغن در محیط کار، ریزتر شدن قطرات روغن را در پی دارد که روانکاری منطقه سنگ‌زنی را کاهش می‌دهد [10]. ازاین‌رو فشارهای خیلی بالا در سنگ‌زنی به روش روانکاری کمینه توصیه نمی‌شود.

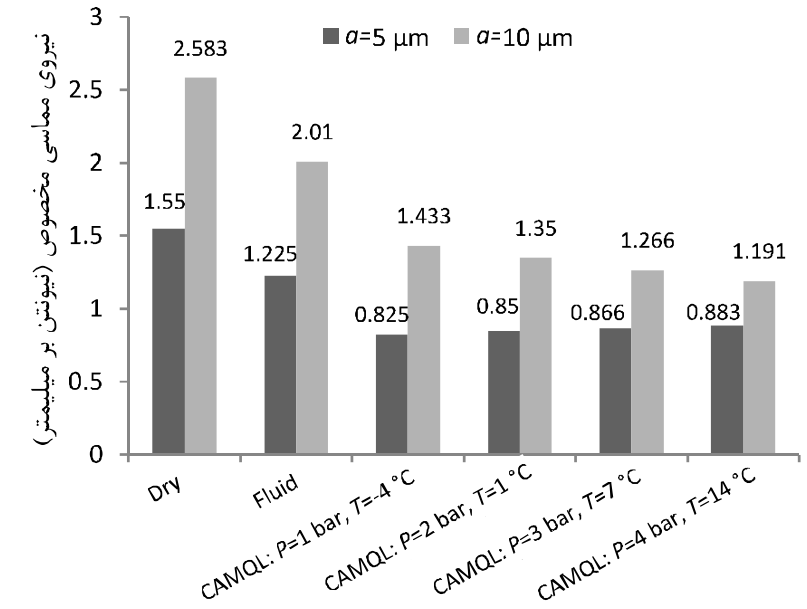
در شکل 11 با پارامترهای فشار و دمایی خنک‌کن هوای چرخشی، تغییرات و مقادیر دمای پایای شبیه‌سازی در توان‌های حرارتی مختلف دیده می‌شود. چنانچه مشاهده می‌شود در توان حرارتی بالا با افزایش فشار، دمای پایا کم می‌شود. همان‌طور که اشاره شد در توان حرارتی بالا انتقال حرارت جابه‌جایی واداشته عمده نقش را در دفع حرارت دارد. ازاین‌رو در بحث خنک‌کاری، افزایش فشار عامل مهم‌تری نسبت به کاهش دماست. با کاهش توان حرارتی، تأثیر فشار کم شده و در توان حرارتی 33 وات تأثیر فشار بالا و دمای پایین برودتی، در مقدار دمای پایا تقریباً یکسان می‌شود. به عبارت ساده‌تر، در توان حرارتی بسیار پایین، توان خنک‌کاری دمایی خنک‌کن هوای چرخشی محسوس است.

3-3- آزمایش‌های سنگزنی

در شکل 12 تغییرات و مقدار عددی نیروی مماسی مخصوص (نیرو بر واحد عرض قطعه‌کار) در سه محیط خشک[2]، پاشش پیوسته سیال[3] و هوای سرد با روانکاری کمینه(CAMQL) در چهار فشار و دمای مختلف به ترتیب در دو عمق برش 5 و 10 میکرومتر به ترتیب با رنگ‌های روشن و تیره دیده می‌شود. نیروی مماسی، نیروی اصلی در سنگ‌زنی بوده و به‌صورت مستقیم با انرژی و توان مصرفی ($P=F_t V_s$)و گرمای ایجاد شده در منطقه سنگ‌زنی در ارتباط است.



شکل 11 نمودار و مقادیر عددی دمای پایای شبیه‌سازی در توان‌های حرارتی مختلف



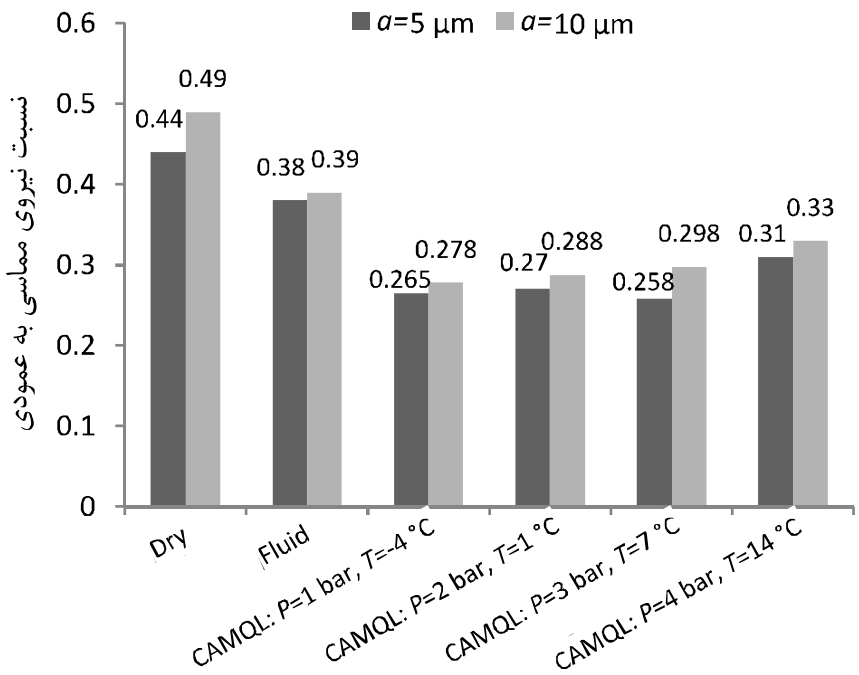
شکل 12 تغییرات و مقادیر عددی نیروی مماسی مخصوص در حضور محیط‌های مختلف سنگزنی در دو عمق برش متفاوت

چنانچه در مقدمه بحث شد، به علت نفوذ مؤثر قطرت روغن در روش روانکاری کمینه با هوای سرد این روش کمترین نیروها را داراست. نفوذ مؤثر و به موقع قطرات سنگ‌زنی موجب ایجاد لایه روانکاری مرزی پایدار در منطقه تماسی بین دانه‌های سنگ و قطعه‌کار ایجاد می‌شود. ازآنجایی‌که استحکام برشی لایه مرزی کمتر از استحکام برشی قطعه‌کار است، درنتیجه با بهبود رفتار تماسی دانه-قطعه‌کار، نیروهای سنگ‌زنی کاهش می‌یابد. بیشترین نیرو مربوط به روش خشک است که در آن روانکار-خنک‌کاری وجود ندارد. همچنین تغییر محسوسی در نیروها در روش روانکاری کمینه با هوای سرد در فشارها و دماهای مختلف دیده نمی‌شود. در محیط‌های مختلف سنگ‌زنی، افزایش عمق برش به دلیل افزایش سطح دانه با قطعه‌کار منجر به افزایش نیروها می‌شود. نکته دیگر، حساسیت کمتر روش روانکاری کمینه به افزایش نیرو در اثر افزایش عمق برش است که به علت روانکاری مطلوب این روش است. در دو روش پاشش پیوسته سیال و خشک، به‌ویژه خشک، با افزایش عمق برش نیرو با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.

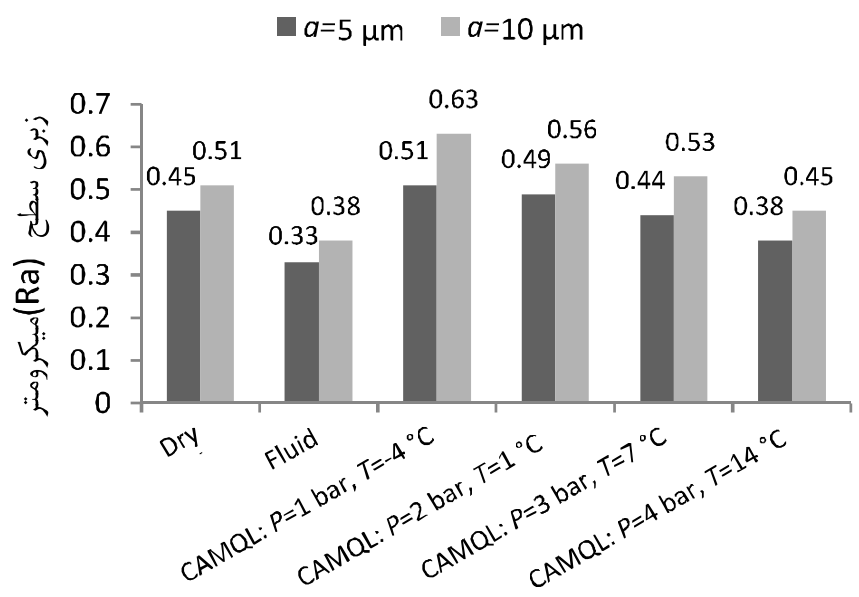
در شکل 13 تغییرات نسبت نیروی مماسی به عمودی، که نشان دهنده ضریب اصطکاک است، در سه محیط خشک، پاشش پیوسته سیال و هوای سرد با روانکاری کمینه با فشار و دمای مختلف به ترتیب در دو عمق برش 5 و 10 میکرومتر به ترتیب با رنگ‌های روشن و تیره دیده می‌شود. کاهش چشمگیر در روش روانکاری کمینه را می‌توان شاخص‌ترین عملکرد این روش دانست، چراکه علاوه بر کاهش مصرف سیال، با نفوذ مؤثر در منطقه برشی موجب کاهش ضریب اصطکاک می‌شود. اگرچه تغییرات قابل‌توجهی در ضریب اصطکاک محیط روانکاری کمینه با هوای سرد رخ نمی‌دهد اما با کاهش جزئی در فشار کمتر همراه است که به روانکاری بهتر فشار کمتر مربوط می‌شود.

1- Expand
2- Dry
3- Fluid

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]
[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]



شکل 13 تغییرات و مقادیر عددی نسبت نیروی مماسی به عمودی در حضور محیط‌های مختلف سنگزنی در دو عمق برش متفاوت



شکل 14 تغییرات و مقادیر عددی زبری سطح در حضور محیط‌های مختلف سنگزنی در دو عمق برش متفاوت

در فشار بالاتر قطرات افشانه روغن در جت هوا ریزتر می‌شود و به علت سرعت بالای جت، ذرات روغن بیشتری در هوا پخش می‌شود که منجر به کاهش خاصیت روانکاری منطقه سنگزنی می‌گردد. در محیط‌های مختلف سنگ‌زنی، افزایش عمق برش به دلیل افزایش سطح دانه با قطعه‌کار افزایش ضریب اصطکاک را در پی دارد.

در شکل 14 تغییرات زبری سطح در سه محیط خشک، پاشش پیوسته سیال و هوای سرد با روانکاری کمینه با فشار و دمای مختلف به ترتیب در دو عمق برش 5 و 10 میکرومتر به ترتیب با رنگ‌های روشن و تیره نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود به‌طور کلی، در استفاده از تکنیک روانکاری کمینه با وجود به‌کارگیری هوای برودتی و کاهش نیروهای مماسی، زبری سطح در فولاد نرم Ck45 نسبت به سنگزنی با پاشش پیوسته سیال و حتی سنگ‌زنی خشک افزایش می‌یابد (به غیر از حالت جت هوا با فشار 4 بار با دمای 14 درجه سانتی‌گراد).

علت این امر به افزایش نسبت حجم ماده تغییرشکل یافته به حجم براده تشکیل شده و نیز خاصیت شکل‌پذیری فولادهای نرم نسبت داده می‌شود. با کاهش ضریب اصطکاک در منطقه درگیری دانه ساینده، منطقه تغییر شکل الاستیک و پلاستیک افزایش می‌یابد و منطقه تشکیل براده کاهش یابد، به عبارت دیگر هر دانه باید به عمق بیشتری نفوذ کند تا منجر به تشکیل براده گردد. برخلاف مواد سخت به‌دلیل مکانیزم براده‌برداری ترد در سنگ‌زنی آن‌ها، این مسئله در فولادهای داکتیل که تمایل به مکانیزم براده‌برداری نرم دارند شدت بیشتری می‌یابد به گونه‌ای که تعداد کمتری از دانه‌ها می‌توانند منجر به تشکیل براده شوند چرا که بجای تشکیل براده، ماده را تحت تغییر شکل الاستیک و پلاستیک قرار می‌دهند و باعث جریان ماده به اطراف و تشدید رسوب مجدد براده می‌شوند. این پدیده منجر به تخریب سطح و افزایش زبری در فولادهای نرم می‌گردد [15].

نکته مهم که می‌توان دید این است که در تکنیک روانکاری کمینه با هوای سرد، جت هوای سرد با فشار بیشتر (با دمای بیشتر) در قیاس با جت هوای سرد با فشار کمتر (با دمای کمتر) زبری سطح بهتری دارد. این پدیده در راستای مطالب ارائه‌شده در بخش ضریب انتقال حرارت است. همان‌طور که در ضرایب انتقال حرارت اشاره شد در توان حرارتی بیشتر(دمای منطقه سنگ‌زنی بیشتر) اثر خنک‌کاری (دفع حرارت) فشارهای بالاتر بیشتر است (شکل 11). به عبارت ساده‌تر مکانیزم براده‌برداری در جت هوا با فشار 4 بار و دمای 14 درجه سانتی‌گراد به خاطر خنک‌کاری بهتر نسبت به فشار 1 بار و دمای 4- درجه سانتی‌گراد به سمت براده‌بردای ترد است. ازاین‌رو کیفیت سطح در فشار بالاتر بهتر است. تنها در این حالت روش روانکاری کمینه با هوای سرد است که کیفیت سطح بهتری نسبت به حالت خشک بدست می‌آید.

در قیاس با مایعات، گازها به دلیل ضریب هدایت و ضریب هدایت ویژه حرارتی کمشان نسبتاً توانایی خنک‌کاری کمتری دارند. از آنجایی که آزمایش‌ها به روش سنگ‌زنی موافق انجام می‌شود، قسمت اعظمی از انرژی، 60-75%، به سمت قطعه کار هدایت می‌شود [26]. برخلاف آب در فاز مایع آن، ضریب انتقال حرارت هوا زمانیکه دما افزایش می‌یابد، بسیار کاهش می‌یابد. در نتیجه، دما در قطعه می‌تواند به‌راحتی روی هم جمع شود و موجب تخریب کیفیت سطح شود. با این حال، توانایی خنک‌کاری ضعیف گاز فشرده شده می‌تواند با تبرید آن برای ایجاد تفاوت دمایی بیشتر بین ناحیه برش و گاز ورودی بهبود یابد و از سوختگی سطح قطعه‌کار در عمق‌های برش بیشتر جلوگیری کند [5].

همچنین، خنک‌سازی به مدت زمانی که سطح قطعه‌کار درمعرض برخورد با جت هوا قرار دارد، محدود می‌شود. کاهش دمایی در قطعه با به کارگیری خنک‌ساز هوا فورا اتفاق نمی‌افتد. همانطور که اشاره گردید، ناحیه موثر دیواره جت تنها به بخشی از سطح قطعه‌کار محدود می‌شود. این ناحیه در معرض یک نازل با یک مکان ثابت است، اما قطعه‌کار به طور مداوم در حین عملیات سنگزنی در حال حرکت است. از آنجایی که ضریب انتقال حرارت هوا (h) کم است، در سرعت پیشروی مشخص قطعه‌کار زمان مورد نیاز برای کاهش دما کافی نیست. به علاوه، به دلیل سطح انحنای چرخ‌سنگ، شکل‌گیری لایه مرزی هوای چرخشی در اطراف چرخ‌سنگ و کاهش سرعت جت هوا پس از خروج از نازل، جریان هوا در معرض چرخ‌سنگ شکسته و خم شده و نفوذ جت هوا به منطقه سنگزنی با مشکل روبرو می‌شود [27]. این مشکل در جت با فشار کمتر، بیشتر شدت می‌یابد. درسنگ‌زنی با حالت پاشش پیوسته سیال برشی، در کل، به خاطر چگالی بسیار بیشتر آب (حدود 735 مرتبه بیشتر از گازها)، قسمت اعظمی از گرما توسط جریان وزین مایع به بیرون انتقال می‌یابد. از همین رو بهترین زبری سطح با روش پاشش پیوسته سیال بدست می‌آید.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر روش روانکاری کمینه درحضور هوای سرد با استفاده از دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی در فرآیند سنگزنی فولاد نرم شامل نیروی مماسی، ضریب اصطکاک و کیفیت سطح مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر بدست آمد:

1) نتایج آزمایش‌های ضریب انتقال حرارت جابجایی نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت جابجایی در دو حالت استفاده از هوای سرد با روانکاری کمینه و بدون روانکاری کمینه، بسیار نزدیک به هم است که نشان از نقش بسیار کم روانکار در خنک کاری است (در حدود 5 درصد). به علاوه، اثر افزایش فشار جت هوا در خنک‌کاری بیشتر از کاهش دمای آن است.

2) نتایج شبیه‌سازی دمایی علاوه بر تصدیق این موضوع حاکی از آن است که به علت گسترش بیشتر دیواره جت هوا در فشارهای بالاتر، میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابجایی در فشارهای بالاتر با نرخ کمتری رخ می‌دهد. همچنین بر مبنای نتایج شبیه‌سازی، اثر خنک‌کاری دمای پایین با فشار کمتر در توان‌های حرارتی کمتر نمایان می‌شود.

3) به دلیل نفوذ موثر قطرات روغن در روش روانکاری کمینه با هوای سرد، نیروی مماسی و ضریب اصطکاک در این روش نسبت به سنگزنی خشک و پاشش پیوسته سیال کمتر است که متعاقب آن انرژی، توان مصرفی و گرمای ایجاد شده در منطقه تماس کمتر می‌شود.

4) در تکنیک روانکاری کمینه، غیر از حالت فشار 4 بار با دمای 14 درجه سانتی‌گراد که بیشترین ضریب انتقال حرارت جابجایی را دارد، زبری سطح بدست آمده نسبت به دو روش مرسوم دیگر بیشتر است. علت این امر به مکانیزم براده‌برداری نرم فولادهای داکتیل، ضریب انتقال حرارت کم هوا، زمان ناکافی برخورد جت هوای برودتی و مشکل در نفوذ جت هوا به منطقه تماس مربوط می‌شود. حالت فشار 4 بار با دمای 14 درجه سانتی‌گراد به دلیل خنک‌کاری بهتر، کیفیت سطح بدست آمده بهتر از محیط خشک و نزدیک به کیفیت سطح بدست آمده از محیط پاشش پیوسته سیال است.

5) با بهبود عملکرد خنک‌کاری دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی در ایجاد هوای برودتی با دماهای پایین‌تر به‌ویژه در فشارهای بالاتر، می‌توان انتظار رفع مشکل خنک‌کاری تکنیک روانکاری کمینه با به‌کارگیری دستگاه خنک‌کن هوای چرخشی را داشت. روی هم رفته، هوای سرد با روانکاری کمینه می‌تواند در عمق‌های کوچک در سنگ‌زنی ظریف مورد استفاده قرار بگیرد. برای کارایی بیشتر، بایستی ظرفیت خنک‌کاری و روانکاری بیشتر توسعه یابد.

5- مراجع

[1] S. Debnath, M. M. Reddy, Q. S. Yi, Environmental friendly cutting fluids and cooling techniquesin machining: a review, *Journal of Cleaner Production,* Vol. 83, pp. 33-47, 2014.

[2] G. Senayi, Industrial Toxicology, Tehran: Tehran University, 1995. (In Persian)

[3] M. Aliabadi, *Toxicology of cutting fluids at workplace,* MSc Thesis, Department of Occupational Health, Medical Sciences University, Hamedan, 2003. (In Persian)

[4] A. E. Diniz, R. Micaroni, Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 42, No. 8, pp. 899-904, 2002.

[5] Y. Su, N. He, L. Li, A. Iqbal, M.H. Xiao, S. Xu, B.G. Qin Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 47, No. 9, pp. 927-933, 2007.

[6] S. Paul, A. B. Chattopadhyay, Determination and control of grinding zone temperature under cryogenic cooling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 36, No. 4, pp. 491-501, 1996.

[7] S. Paul, A. B. Chattopadhyay, Effects of cryogenic cooling by liquid nitrogen jet on forces, temperature and surface residual stresses in grinding steels, *International Journal of Cryogrnics,* Vol. 35, No. 8, pp. 515-523, 1995.

[8] N. B. Fredj, H. Sidhom, Effects of the cryogenic cooling on the fatigue strength of the AISI 304 stainless steel ground components, *International Journal of Cryogrnics,* pp. 1-15, 2014.

[9] F. Pusavec, D. Kramar, P. Krajnik, J. Kopac, Transitioning to sustainable production-Part II: evaluation of sustainable machining technologies, *Journal of Cleaner Production,* Vol. 18, No. 12, pp. 1211-1221, 2010.

[10] T. Tawakoli, M. J. Haddad, M.H. Sadeghi, Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 50, pp. 521-531, 2010.

[11] G. Brunner, *Schleifen mit mikrokristallinem aluminiumoxid,* Dr.-Ing, Universit ¨at Hannover, D ¨usseldorf, VDI-Verlag, 1998.

[12] E. Brinksmeier, T. Brockhoff, A. Walter, Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung beim Schleifen, HTM 52/3: 166– 170, Carl Hanser Verlag, M ¨unchen, 1997.

[13] F. Kloche, T. Beck, *Gut geschmeirt statt schlecht gekuhlt,* Werkstattstechnik, 88/9/10:400- 404, 1998.

[14] T. Tawakoli , M.J. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stockert, A. Rasifard, An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding, *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* Vol. 49, pp. 924-932, 2009.

[15] F. Rabiei, A. R. Rahimi, M. J. Hadad, M. Ashrafijou, Investigation of the effect of minimum quantity lubrication technique on performance of the grinding of HSS, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 4, pp. 1-12, 2013. (In Persian)

[16] M. Ashrafijou, *Investigation of the effects of different oilmists on Minimum Quantity Lubrication (MQL) grinding,* MSc Thesis, Department of Mechanical Engineering, Amirkabir University, Tehran, 2014. (In Persian)

[17] M.J. Hadad, T. Tawakoli, M.H. Sadeghi, B. Sadeghi, Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 54-55, pp. 10-17, 2012.

[18] Y. Su, N. He, L. Li, Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture,* Vol. 47, pp 927-933, 2007.

[19] T. Nguyen, M. Liu, L. C. Zhang, Cooling by sub-zero cold air jet in the grinding of a cylindrical component, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* Vol. 73, pp. 341-352, 2014.

[20] Z.L. Man, *Study on the high speed milling of Ti-alloy based on the green Manufacturing,* PhD Thesis, University of Nanjing, China, 2003.

[21] Y. Su, N. He, L. Li, An experimental investigation of effects of cooling/lubrication conditions on tool wear in high-speed end milling of Ti-6Al-4V, *International Journal of Wear,* Vol. 261, pp. 760-766, 2006.

[22] F.P. Incropera, D.P. Witt, *Fundamentals of heat and mass transfer,* Third Edittion, pp. 378-432, New York: John Wiley & Sons, 1990.

[23] S. Kurgin, J.M. Dasch, D.L. Simon, G.C. Barber, Q. Zou, Evaluation of convective heat transfer coefficient for MQL, *Industrial Lubrication and Tribology,* Vol. 64, No. 6, pp. 376-386, 2012.

[24] V.M. Luchesi, R.T. Coelho, Experimental investigations of heat transfer coefficient of cutting fluids in metal cutting processes: analysis of workpiece phenomena in a case study, *Journal of Engineering Manufacture,* pp. 1174-1184, 2012.

[25] N. Zuckerman, N. Lior, Jet impingement heat transfer: physics, correlations, and numerical modeling, *Advances in Heat Transfer,* Vol. 39, pp. 565-631, 2006.

[26] S. Malkin, C. Guo, Thermal analysis of grinding, *CIRP Annals - Manufacturing Technology,* Vol. 56, pp. 760-782, 2007.

[27] C. Gau, C. Chung, Surface curvature effect on slot-air-jet impingement cooling flow and heat transfer process, *Trans ASME,* Vol. 113, pp. 858-864, 1991.

[Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-04-25]

[DOR: 20.1001.1.10275940.1394.15.10.1.5]