



ارزیابی اثرات روش خنک کاری غوطه‌وری سنگ‌زنی (ICG) بر مشخصات سطحی و تغییرات ریزساختاری در سنگ‌زنی فولاد CK45

رضا رجبی^۱، مسعود پور^{۲*}، علی حیدری^۳

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

۲- دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: m.pour@qiet.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی

دریافت: ۲۴ دی ۱۴۰۲
پذیرش: ۱۱ بهمن ۱۴۰۲

کلیدواژگان:

روش خنک کاری غوطه‌وری
تغییرات فازی
زبری سطح
سختی سطحی
فولاد CK45

چکیده

در این پژوهش، به منظور کاهش تأثیرات مضر ناشی از افزایش حرارت در سطوح قطعات سنگ‌زنی شده، روش ابداعی جدیدی جهت روان کاری و خنک کاری فرآیند سنگ‌زنی تخت با عنوان روش خنک کاری غوطه‌وری مطالعه شد. به منظور بررسی مزایای این روش، فولاد CK45 با دو روش خنک کاری غوطه‌وری و حداقل میزان روان کار (MQL) با دبی‌های متفاوت خنک کاری (۱۵ و ۴۰ cc/s) در دماهای مختلف (۲۵، ۰ و -۱۰ درجه سانتی‌گراد) و با عمق‌های برش مختلف (۰/۰۰۵، ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۳ میلی‌متر) سنگ‌زنی شدند. سایر پارامترها نظیر سرعت چرخ سنگ و سرعت حرکت طولی و عرضی میز کار در هر آزمایش ثابت در نظر گرفته شد. کمیت‌های اندازه‌گیری شده شامل زبری سطح، میزان سختی سطح (راکول C) و همچنین ارزیابی تغییرات ریزساختاری (با میکروسکوپ الکترونی روبشی) از سطح نمونه‌ها است. نتایج نشان می‌دهند استفاده از روش خنک کاری غوطه‌وری نسبت به روش حداقل میزان روان کار، در فولاد CK45 بهبود زبری سطح حدود ۳۴/۹۷٪ و افزایش سختی سطحی ۶٪ را داشته است. بنابراین استفاده از روش پیشنهادی می‌تواند در کاهش اثرات فرایند سنگ‌زنی بر روی سطح قطعه کارهای ساخته‌شده از فولاد CK45 مفید باشد.

Evaluation of the effects of immersion cooling grinding (ICG) method on the surface characteristics and microstructural changes in grinding of CK45 steel

Reza Rajabi¹, Masoud Pour^{2*}, Ali Heydari³

1- MSc Student, Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

2- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

3- Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Tarbat Heydarieh, Tarbat Heydarieh, Iran

* Corresponding Author's Email: m.pour@qiet.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Received: 14 January 2024
Accepted: 31 January 2024

Keywords:

Immersion Cooling Grinding
Grinding Process
Surface Roughness
Hardness
CK45 Steel

Abstract

In this research, a new innovative method for lubrication and cooling of the flat grinding process, called immersion cooling, was studied in order to reduce the adverse effects of heat buildup on the surfaces of ground parts. To evaluate the advantages of this method, CK45 steel was ground using two cooling methods, immersion cooling and minimum quantity lubrication (MQL), with different cooling flow rates (15 and 40 cc/s) at different temperatures (25, 0, and -10 degrees Celsius) and with different cutting depths (0.005/0, 0.01/0, 0.02/0, and 0.03/0 millimeters). Other parameters such as grinding wheel speed and longitudinal and transverse table feed rates were kept constant in each experiment. The measured quantities included surface roughness, surface hardness (Rockwell C scale), and evaluation of microstructural changes (using scanning electron microscopy) on the sample surfaces. The results indicate that the use of immersion cooling improved the surface roughness by approximately 34% and increased the surface hardness by 6% compared to the minimum quantity lubrication method in CK45 steel. Therefore, the use of the proposed method can be beneficial in reducing the effects of the grinding process on the surface of workpieces made of CK45 steel.

Please cite this article using:

Rajabi R, Pour M, Heydari A. Evaluation of the effects of immersion cooling grinding (ICG) method on the surface characteristics and microstructural changes in grinding of CK45 steel. Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2023 October 23;10(8):1-10. doi: 10.22034/IJME.2024.434795.1911 [In Persian]

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

بهبود زبری سطح و سختی سطح قطعه‌کار به دلایل فنی و اقتصادی نظیر کاهش اصطکاک قطعات در تماس باهم، افزایش طول عمر قطعات، نرخ تولید بالاتر و ساخت قطعات با تلورانس‌های دقیق‌تر از اهداف اصلی همه فرآیندهای ماشین‌کاری است. با توجه به این‌که اغلب فلزات و آلیاژها از جمله سوپر آلیاژها قابلیت سنگ‌زنی دارند، سنگ‌زنی به‌عنوان اصلی‌ترین عملیات پرداخت در صنایع مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. سنگ‌زنی در فلزات و آلیاژها از زوایای متفاوتی مورد مطالعه قرار گرفته است که ارزیابی پارامترهای کلی همانند: سختی سطح، زبری سطح، دما، نیرو، توپوگرافی چرخ سنگ، ارتعاشات چتر و سایش حائز اهمیت است. به دلیل اصطکاک به وجود آمده در منطقه برش بین قطعه‌کار و چرخ سنگ، انرژی حرارتی تولید می‌شود که عدم کنترل این حرارت موجب باقی ماندن تنش‌های پسماند کششی، ایجاد ترک، سوختگی‌های موضعی، اکسیداسیون سطحی، بروز زبری نامناسب و آسیب‌های مختلف متالورژیکی در سطح خارجی قطعه می‌گردد. این مشکلات به دلیل ضعف در انتقال حرارت در فرایند سنگ‌زنی رخ می‌دهد و توسط مالکین و همکارش [۱] مطالعه شده‌اند.

تحقیقات اساسی روی انتقال حرارت حین پروسه سنگ‌زنی در تحقیقات پیترس [۲] انجام‌گرفته که به آنالیز حرارتی فرآیند سنگ‌زنی پرداخته است. در فولادهایی که قابلیت عملیات حرارتی دارند، می‌توان از حرارت تولید شده در طی فرآیند سنگ‌زنی برای نیتراسیون کوتاه‌مدت در لایه سطحی قطعه کار استفاده نمود [۳]. فرآیند خود خنک‌کننده تا حدی منجر به تبدیل فاز آستنیت به لایه‌لایه می‌شود. این موضوع در تمامی فولادها حائز اهمیت است، به‌طوری‌که در سال‌های اخیر نیز تحقیقاتی بر روی اثرات دما بر روی ساختار فولادها، نظیر تحقیق شاهوردی و همکاران [۴]، و همچنین اثر فرایند سنگ‌زنی بر تغییر ساختار فولادها، نظیر تحقیق حداد و همکاران [۵]، در حال انجام است. از طرف دیگر به سخت‌شدگی سطحی ایجاد شده در این روش نیز توجه ویژه‌ای شده است، به‌طوری‌که به آن لقب یک فناوری داده‌اند و به این فناوری سخت شدن ناشی از سنگ‌زنی می‌گویند [۶] که سبب بهبود مقاومت در برابر سایش آن‌ها می‌شود [۳].

استفاده از خنک‌کاری فوق سرد در فرآیند سنگ‌زنی به سال ۱۹۸۵ توسط چاتوپادهی و همکارانش برمی‌گردد، آن‌ها برای سنگ‌زنی، چهار نوع فولاد با سختی‌های مختلف، از سه روش خنک‌کاری، جت نیتروژن مایع، محلول در روغن و خشک استفاده و نتایج به‌دست‌آمده را با یکدیگر مقایسه کردند [۷]. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که روش خنک‌کاری فوق سرد در سنگ‌زنی با توجه به کاهش قابل توجه دما، می‌تواند به کاهش تنش‌های پسماند کششی، کاهش ترک‌های سطحی و همچنین بهبود زبری سطح اشاره کرد. زانگ هن‌زی و همکاران [۸] تأثیر خنک شدن بسیار سریع محل برش و براده را بر ریزساختار و اندازه دانه قطعه‌کار، میزان سخت‌کاری و تنش پسماند سطحی ارائه کردند. همچنین سالونیتیس پارامترهای عمق برش، طول تماس چرخ سنگ و قطعه‌کار می‌توانند در عمق نفوذ سختی تأثیرگذار باشند [۹]. هرچند در فولادهای AISI 4241 و AISI 1060 که بدین صورت سخت شده‌اند، تنش‌های فشاری باقیمانده و یک‌لایه سخت شده مارتنزیتی به عمق حداکثر ۲ میلی‌متر مشاهده شده است [۳، ۱۰]، اما شبیه‌سازی فولاد ۵۲۱۰ [۱۱]، حاکی از آن است که عمق تغییرات فازها در محدوده حداکثر ۱۰۰ μm است.

با توجه به اهمیت موضوع همچنان تحقیقات بر روی اثر نرخ خنک‌کاری بر روی مشخصات مکانیکی و ساختاری فولادها در حال انجام است که به‌عنوان نمونه می‌توان به مراجع [۱۲، ۱۳] اشاره کرد. لذا در این مقاله به بررسی اثر پارامترهای دبی و دما در یک روش پیشنهادی برای خنک‌کاری فرآیند سنگ زنی پرداخته شده است.

۲- روش تحقیق

به علت اصطکاک بالا و تولید حرارت شدید در فرآیند سنگ‌زنی و با در نظر گرفتن آسیب‌های حرارتی به‌عنوان یکی از محدودیت‌های اصلی فرآیند، سیال خنک‌کننده و روش استفاده از آن می‌تواند نقش بسزایی در این ارتقاء کیفیت محصول تولیدی در فرآیند سنگ‌زنی ایفا نماید. در شکل ۱، شار حرارتی وارد شده به قطعه کار و خروج حرارت از آن پس از عبور چرخ سنگ مشاهده می‌شود.

جدول ۱ مشخصات کلسیم منیزیم استات

هیدراته	مواد ساکن	تراکم حجمی (g/cm ³)	٪ مواد نامحلول در آب	٪ کلسیم منیزیم استات	٪ کلسیم هیدروکسید	PH در محلول	اندازه ذرات
حدافل	حداکثر	۰/۷۹-۰/۶۵	۱	۹۹	۰/۲	۱۰-۸	۵-۱

باکس مخصوص از پی‌وی‌سی با ابعاد ۲۰۰mm×۵۰mm×۸۰mm و گنجایش یک لیتر مایع خنک‌کننده طراحی و ساخته شد. در این باکس با تنظیم شیرهای ورودی و خروجی از نوع شیر ورودی دبی مایع خنک‌کننده ۱۵cc/s و ۴۰cc/s قابل تنظیم و ثابت است. این کنترل دبی توسط فلوتر جریان انجام می‌شود. این باکس به دلیل استفاده از جنس پی‌وی‌سی کاملاً عایق حرارت بوده و توسط ۳۲ آهن‌ربای مخصوص تعبیه‌شده بر روی آن، توسط مغناطیس دستگاه سنگ‌زنی ثابت نگه‌داشته شود. از طرفی جهت جلوگیری از خروج مایع خنک‌کننده توسط دو عدد اورینگ مخصوص، کاملاً آب‌بندی شده است. دو عدد حس‌گر دما تیپ k با حساسیت بالا جهت اندازه‌گیری دماهای ورودی و خروجی بر روی آن نصب شده است. شلنگ‌های ورودی و خروجی از جنس مخصوص و دارای انعطاف‌پذیری بالا در دماهای پایین و کاملاً عایق بوده و دمای ۲۰°C را تحمل می‌کند. آزمایش‌های سنگ‌زنی بر روی فولاد CK45 با ترکیب عناصر و مشخصات مکانیکی ارائه‌شده در جداول ۲ و ۳ انجام شد.

به‌منظور جلوگیری از ورود اثرات پروسه‌های آماده‌سازی قطعات در ساختار سطحی، زبری سطح و همچنین سختی سطحی، تمامی قطعات با استفاده از دستگاه وایرکات سوئیسی AGIE به‌صورت قطعاتی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ میلی‌متر ساخته شده‌اند. برای انجام هر آزمایش از ۸ نمونه استفاده شده است.

جدول ۲ درصد عناصر موجود در فولاد

Mo	Cr	S	P	Mn	Si	C
≤۰/۱	۰/۴	۰/۰۳۵	۰/۰۳۵	۰/۸	۰/۴	۰/۵۰

جدول ۳ خواص فیزیکی

مقدار سختی (HB)	استحکام تسلیم (>Mpa)	استحکام کششی (Mpa)	افزایش طول (>%)	ضریب هدایت حرارتی (W/Mk)	چگالی (kg/cm ³)
۱۶۳	۵۰۰-۳۷۰	۸۵۰-۶۳۰	۱۶-۱۴	۱۵,۱	۷/۸۵

برای هر یک از فولادها یک گستره دمای آستنیتی به‌منظور سخت کردن وجود دارد که به دمای سخت کردن معروف است. دمای سخت کردن فولادهای CK45 بر طبق دیاگرام تعادلی آهن و کربن، در حدود ۸۰۰ تا ۱۴۰۰ °C است. این محدوده دمایی به‌گونه‌ای مشخص می‌شود که فولاد پس از سریع سرد شدن، در ضمن داشتن ساختاری با دانه‌های ریز، حداکثر مقدار سختی را داشته باشد. زمان نگهداری در دمای سخت کردن بستگی به نوع و درصد کاربیدهایی دارد که در فاز آستنیت حل می‌شوند. این زمان به‌گونه‌ای باید باشد که فازهای پرلیت و باینایت به وجود نیامده و کاربیدها به‌اندازه کافی حل شوند و سختی مطلوب به دست آید. اغلب زمان نگهداری در دمای سخت کردن بین ۵ تا ۱۵ دقیقه است که در فرآیند سنگ‌زنی این زمان در اختیار نیست و به‌جای آن از کاهش سریع دمای سطح قطعه کار استفاده می‌شود. با شبیه‌سازی المان محدود انجام شده توسط سالونیتیس نشان داده شده است که در زمان سنگ‌زنی CK45 با عمق برش ۰/۵ mm، ۰/۶ m/min و ۵۰/۴ mm/min دما به حدود ۱۲۰۰°C خواهد رسید و سرعت سرد کردن کمتر از ۱۰s می‌تواند سبب ایجاد ساختار مارتنزیتی در سطح قطعه کار شود [۱۴]. در این پژوهش، هدف تشکیل ساختار مارتنزیتی در فولاد و افزایش میزان سختی سطح است. تشکیل این ساختار زمانی امکان‌پذیر است که از دگرگونی آستنیت به مخلوط فریت و سمانتیت (تشکیل لایه‌های پرلیت در اثر دگرگونی یوتکتوئید) در دماهای بالا جلوگیری شود. بررسی رفتار سطح در عملیات سنگ‌زنی یک فولاد مستلزم آزمایش‌های مکرر برای دستیابی به مشخصات سطحی ایجاد شده است. به‌منظور رسیدن به اهداف بالا بررسی مقادیر زبری سطح، سختی سنجی و همچنین بررسی عکس‌های میکروسکوپی‌های نوری و الکترون روبشی بر روی فولادهای مذکور

انجام شد. اندازه‌گیری زبری سطح و سختی سطحی به ترتیب با استفاده از دستگاه‌های Taylor Hobson Surtronic ۲۵ و Koopaco UV1 انجام شده‌اند. برای اندازه‌گیری سختی، مقدار میانگین سختی اندازه‌گیری شده در سه ناحیه مختلف از سطح سنگ‌زنی شده به‌عنوان معیار و سختی برحسب سختی راکول C مورد آزمایش قرار گرفت. اندازه‌گیری تحت نیروی ۱۵۰ کیلوگرمی و در مدت‌زمان ۴ ثانیه انجام شد.

به‌منظور انجام آزمایش‌ها و بررسی اثر عمق برش بر روی حرارت تولیدشده و پارامترهای سختی سطحی، زبری سطح و فازهای تشکیل‌شده روی فولاد CK45، طراحی آزمایش‌هایی مطابق جدول ۴ انجام‌شده است. همچنین لازم به ذکر است برای سنگ‌زنی رایج در بازار (MQL) از خنک‌کننده روغن حل‌شونده آمینوجی BC100 شرکت بهبود شیمی سپاهان استفاده گردید.

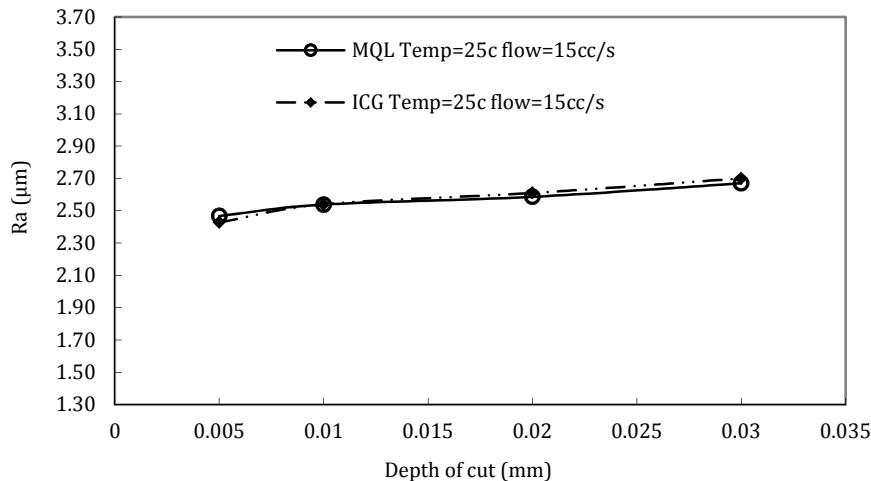
۳- نتایج و بحث

از آنجایی‌که روش پیشنهادی خنک‌کاری غوطه‌وری از مایع خنک‌کننده متفاوتی نسبت به مایع خنک‌کننده‌های متداول در پروسه‌های سنگ‌زنی استفاده می‌کند به بررسی روند تغییر زبری سنج در شرایط یکسان ماشین‌کاری با دو مایع خنک‌کننده پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است.

بررسی اثر تغییر نوع مایع خنک‌کننده نشان می‌دهد که تغییر محسوسی در زبری سطح در عمق برش‌های مختلف در روش‌های خنک‌کاری غیرمستقیم و حداقل میزان روان‌کار ایجاد نشده است.

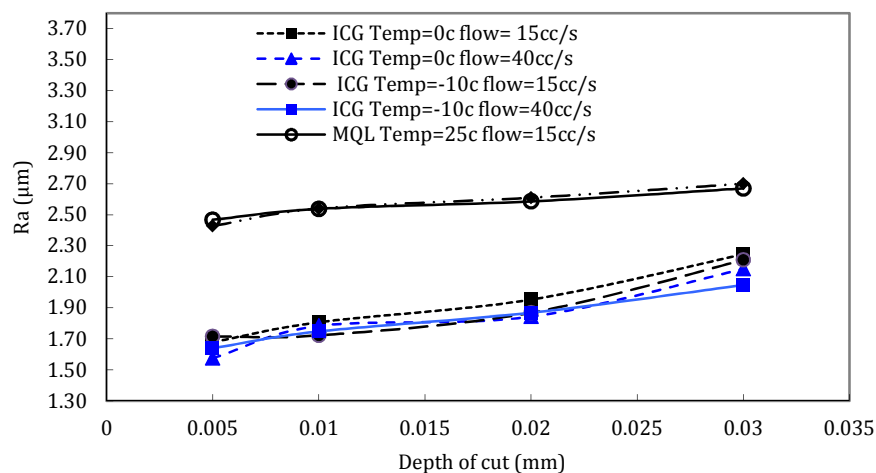
جدول ۴ مشخصات سنگ‌زنی انجام‌شده بر روی فولاد CK45

عمق نهایی برش (mm)	تعداد پاس	عمق برش (mm)	دمای مایع خنک‌کننده (OC)		دبی سیال خنک‌کننده (cc/s)
			MQL	ICG	
۰/۱۵	۳۰	۰/۰۰۵		-۱۰	۴۰ و ۱۵
	۱۵	۰/۰۱		-۱۰	
	۷	۰/۰۲		-۱۰	
	۵	۰/۰۳		-۱۰	
	۳۰	۰/۰۰۵		.	
	۱۵	۰/۰۱		.	
	۷	۰/۰۲		.	
	۵	۰/۰۳		.	
۰/۱۵	۳۰	۰/۰۰۵	۲۵		۱۵
	۱۵	۰/۰۱	۲۵		
	۷	۰/۰۲	۲۵		
	۵	۰/۰۳	۲۵		
	۳۰	۰/۰۰۵		۲۵	
	۱۵	۰/۰۱		۲۵	
	۷	۰/۰۲		۲۵	
	۵	۰/۰۳		۲۵	



شکل ۳ مقایسه تغییرات زبری سطح با تغییر نوع مایع خنک‌کننده

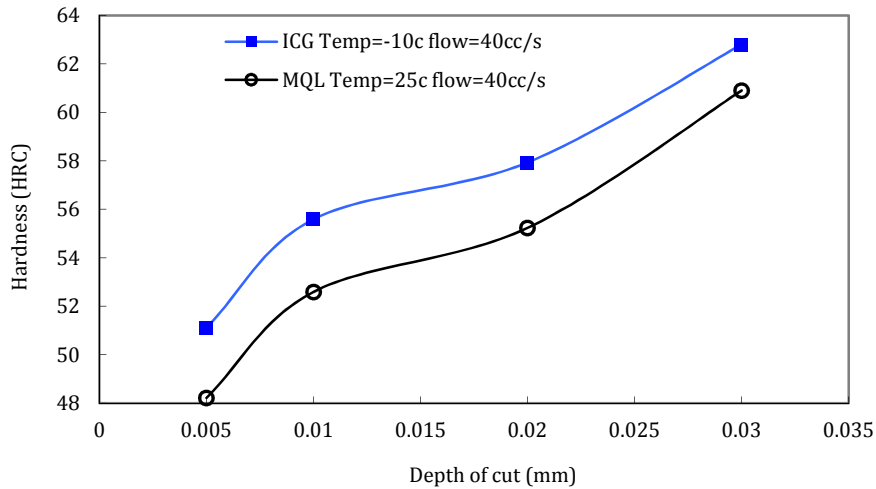
بدین ترتیب در آزمایش‌های بعدی تغییرات ایجادشده ناشی از نوع مایع خنک‌کننده نیست. در شکل ۴ تغییرات زبری سطح به ازای تغییر دما و دبی مایع خنک‌کننده مشاهده می‌شود.



شکل ۴ مقایسه تغییرات زبری سطح با تغییر دما و دبی مایع خنک‌کننده

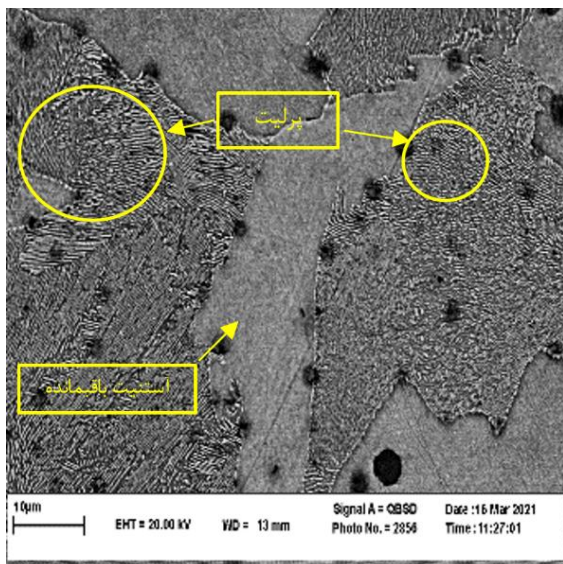
همان‌طور که مشاهده می‌شود، تغییر زبری سطح از دمای 25°C به 0°C در عمق برش 0.005mm حدود 32% است که به تدریج با افزایش عمق برش به 0.03mm به 22% می‌رسد. نکته قابل توجه آن است که با افزایش عمق برش اثر کاهش دما در بهبود بیشتر زبری سطح فراوان‌تر می‌گردد. این در حالی است که اثر افزایش دبی با افزایش عمق برش به 0.03mm تغییر محسوسی نیست. بدین ترتیب بررسی نتایج حاصله از زبری سنجی نشان می‌دهد که تأثیر اختلاف دما از 25 تا -10 در زبری سطح کاملاً محسوس بوده، لذا در ادامه آزمایش‌های سختی سطحی و همچنین ساختار متالورژیکی فولاد CK45 در دو روش MQL و ICG انجام گردید تا دلیل یا دلایل ایجاد تغییرات فراوان در زبری سطح ایجادشده آشکار گردد. توجه شود که براساس نتایج ارائه شده در مرجع [۱۵]، اگرچه عوامل بسیار زیادی در تغییر ضخامت لایه سخت شده می‌تواند موثر باشد، اما تغییرات فازها در اثر خنک‌کاری در محدوده حداکثر 100 میکرون است.

بررسی شکل ۵ حاکی از افزایش سختی سطحی CK45 با کاهش دمای غوطه‌وری است. بدین ترتیب انتظار می‌رود پرلیت زیر دانه‌تری در سطح قطعه تولید شده باشد. برای بررسی بیشتر و دقیق‌تر موضوع ایجاد تغییر در زبری سطح در سطوح سنگ‌زنی شده، عکس‌های SEM با بزرگنمایی ۵۰۰۰ گرفته و تصاویر با استفاده از تکنیک‌های پردازش تصویر مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است.

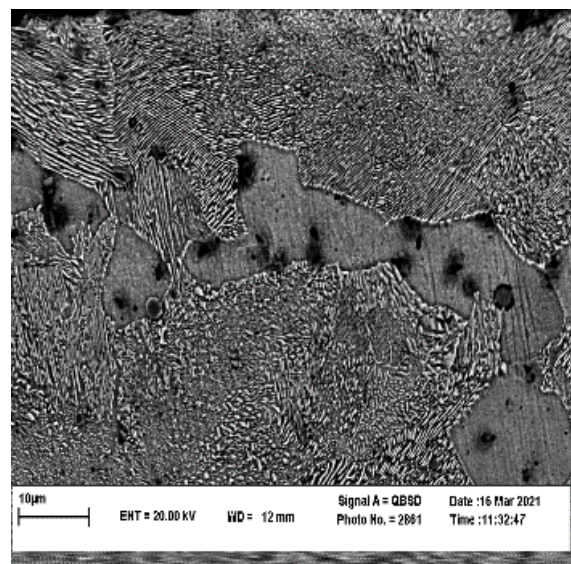


شکل ۵ مقایسه تغییرات سختی سطحی با تغییر دمای مایع خنک‌کننده

به‌منظور بررسی دقیق‌تر تغییرات ایجاد شده در فازهای فولاد CK45 مقایسه‌ای بین ساختار فازی ایجاد شده در روش ICG و MQL برای لبه قطعات تولید شده در شکل‌های ۶-۹ ارائه شده‌اند.

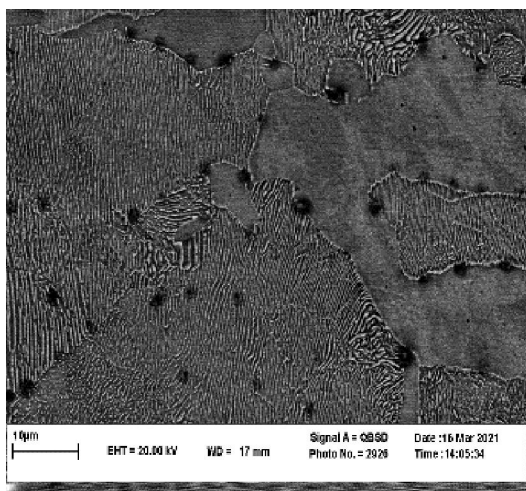


ICG- لبه- پرلیت ریزدانه

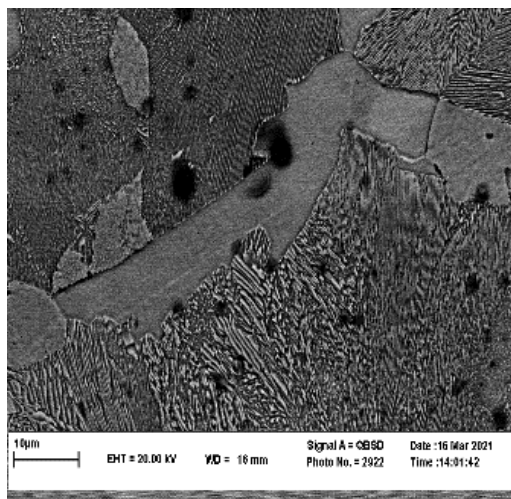


MQL- ساختار پرلیت درشت‌دانه

شکل ۶ مقایسه تغییرات ساختاری فولاد CK45 در روش‌های مختلف خنک‌کاری در عمق برش ۰.۳ mm

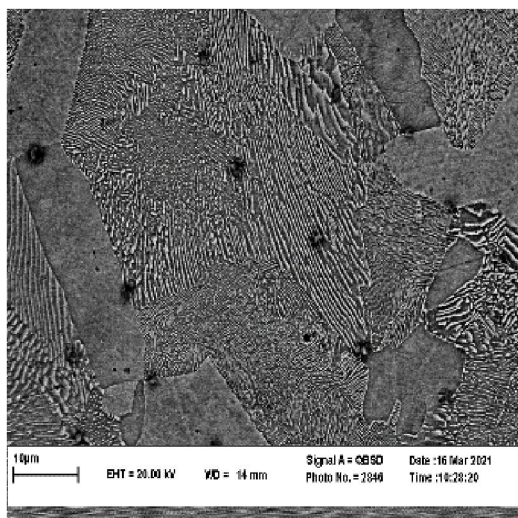


لیه ICG

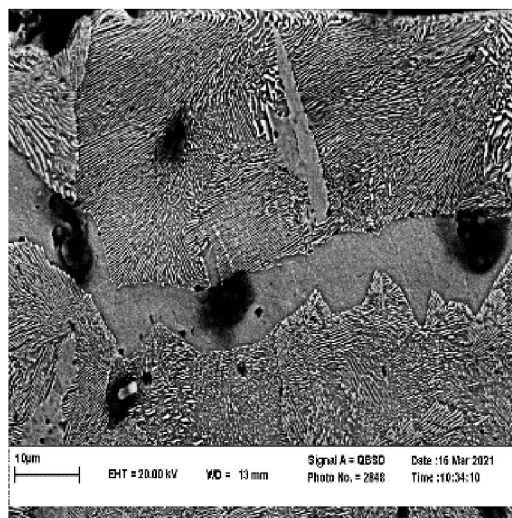


لیه MQL

شکل ۷ مقایسه تغییرات ساختاری فولاد CK45 در روش‌های مختلف خنک‌کاری در عمق برش ۰/۰۲ mm

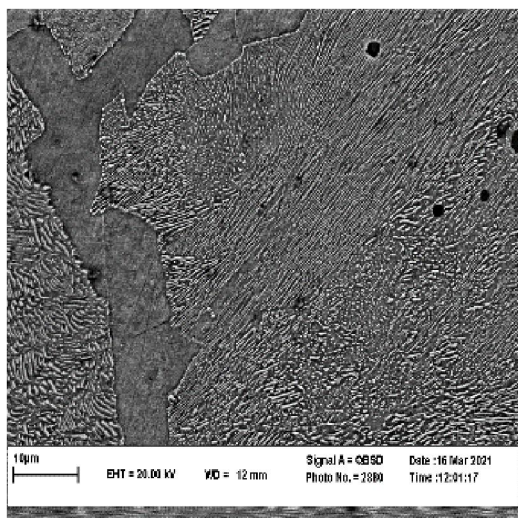


لیه ICG

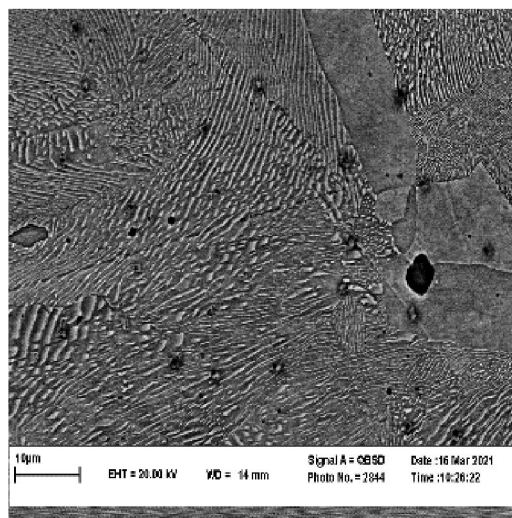


مرکز MQL

شکل ۸ مقایسه تغییرات ساختاری فولاد CK45 در روش‌های مختلف خنک‌کاری در عمق برش ۰/۰۱ mm



لیه ICG



مرکز MQL

شکل ۹ مقایسه تغییرات ساختاری فولاد CK45 در روش‌های مختلف خنک‌کاری در عمق برش ۰/۰۰۵ mm

همان‌طور که مشاهده می‌شود در لبه‌های قطعات سنگ‌زده‌شده در شرایط ماشین‌کاری ثابت ساختار پرلیت ایجاد شده در روش ICG از MQL ریزدانه‌تر است. این موضوع دلیل افزایش سختی قطعات ماشین‌کاری شده با روش ICG نسبت به MQL است. از طرف دیگر ریزدانه‌تر بودن سبب کم شدن ناهمواری‌های سطح خواهد شد که در نهایت کاهش زبری سطح نیز قابل توجیه است. دگرگونی‌های رخ داده شده می‌تواند به دلیل حضور عناصر الیازی مخصوصاً کروم نیز باشد [۱۶]، که بررسی آن در این مقاله انجام نشده است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی اثر دبی و دمای مایع خنک‌کننده در پروسه سنگ‌زنی فولاد CK45 پرداخته شده است و با ارائه روشی جدید برای خنک‌کاری سعی شد تا بهبودی در پارامترهای سطحی فولاد CK45 ایجاد شود. نتایج نشان داده‌اند که، استفاده از روش ICG با دمای ۱۰- درجه سانتی‌گراد و دبی ۴۰ cc/s می‌تواند سبب بهبود زبری سطح و همچنین افزایش سختی سطحی فولاد CK45 شود. بهبود ایجاد شده در زبری سطح بهبود با افزایش عمق برش کاهش می‌یابد که دلیل آن می‌تواند عدم نفوذ کاهش دما به عمق قطعه باشد. از طرف دیگر افزایش عمق برش سبب کاهش سختی نمونه‌های تولید شده با روش ICG نسبت به روش MQL می‌شود. دلیل این موضوع می‌تواند به دلیل حرارت تولید شده بالاتر در عمق برش‌های کمتر باشد که در تحقیقات اولیه روی فرآیند سنگ‌زنی توسط محققین بیان شده است. از سوی دیگر دلیل تغییرات سختی سطحی را می‌توان در ریزساختار شدن بیشتر در عمق برش ۰/۰۰۵ نسبت به ۰/۰۳ میلی‌متر جستجو کرد، زیرا پرلیت‌های ریزدانه سختی بالاتری از پرلیت‌های درشت‌دانه دارند. این موضوع با بررسی تصاویر SEM مورد تایید قرار گرفته است. نتایج نشان دادند که استفاده از روش پیشنهادی غوطه‌وری شدن قطعه کار در مایع خنک‌کننده به تنهایی عامل مناسبی برای بهبود زبری سطح و سختی نیست و کاهش دما به‌عنوان فاکتور اصلی مطرح است. همچنین اثر دبی نیز تأثیر هنگفتی در سختی سطحی و زبری سطح ایجاد نمی‌کند.

References

- [1] Malkin S, Guo C. Thermal analysis Grinding, CIRP Annals. 2007;56(2):760-82. doi: 10.1016/j.cirp.2007.10.005
- [2] Pierson, H.o, grafith, diamond and fullernes, Properties, Processing and Application, Handbook of carbon: 1994.
- [3] Heinzl C, Sölter J, Jermolajev S, Kolkwitz B, Brinksmeier E. A versatile method to determine thermal limits in grinding, Procedia CIRP. 2014;13:131-6. doi: 10.1016/j.procir.2014.04.023
- [4] Shahvardi H.R, Dehghani A.S, Zabihi, Emami M. Effect of intercritical annealing temperature and time on the microstructure and mechanical properties of medium Mn advanced high strength steel, Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2021;8(11):16-34. [In Persian]
- [5] Hadad M, Makarian J, Dehghanpour M. Investigation of the effects of wheel surface topography and coolant-lubricant types on wheel loading in grinding of Inconel 738 using image processing method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering. 2020;7(8):10-8. [In Persian]
- [6] Wilk T, Energieumsetzung und Gefügebeeinflussung beim Schleifhärten. Dr.-Ing. - Diss., Universität Bremen, Shaker Verlag, Bremen. 2008.
- [7] Chattopadhyay A B, Bose A, Chattopdhyay A K. Improvements in Grinding Steels by Cryogenic Cooling, Precision Engineering. 1985;7(2):93-8. doi: 10.1016/0141-6359(85)90098-4
- [8] Zong-Han X, Moona R. J, Hoffmana M, Munroea P, Cheng Y B. Role of microstructure in the grinding and polishing of α -sialon ceramics, International Journal of Machine Tools & Manufacture. 2003;23(13):2351-60. doi: 10.1016/S0955-2219(03)00046-3
- [9] Salonitis K. Grind-Hardening. The International Academy for Production Engineering Publisher: Springer Berlin Heidelberg, CIRP Encyclopedia of Production Engineering. 2017. doi: 10.1007/978-3-642-35950-7_16848
- [10] Judong L, Wei, Songwei H, Zhilong Xu. Experimental Study on Grinding-hardening of 1060 Steel, Energy Procedia. 2012;16:103. doi: 10.1016/j.egypro.2012.01.019
- [11] Li H, Gai K, He L, Zhang C, Cui H, Li M. Non-isothermal phase-transformation kinetics model for evaluating the austenitization of 55CrMo steel based on Johnson-Mehl-Avrami equation. Material Design. 2016;92:731-41. doi: 10.1016/j.matdes.2015.12.110

- [12] Porter A M, Kömi D J. Effect of cooling rate and composition on microstructure and mechanical properties of ultrahigh-strength steels. *Journal of Iron Steel Research*. 2019;1350–65. doi: [10.1007/s42243-019-00276-0](https://doi.org/10.1007/s42243-019-00276-0)
- [13] Wang H, Cao L, Li Y. Effect of cooling rate on the microstructure and mechanical properties of a low-carbon low-alloyed steel. *Journal of Material Science*. 2021;56:11098–113. doi: [10.1007/s10853-021-05974-3](https://doi.org/10.1007/s10853-021-05974-3)
- [14] Salonitis K, Kolios A. Experimental and numerical study of grind-hardening-induced residual stresses on AISI 1045 Steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;79:1443–52. doi: [10.1007/s00170-015-6912-x](https://doi.org/10.1007/s00170-015-6912-x)
- [15] Ling L, Luo L, Liu F. Effects of grinding treatment on surface properties and deformation microstructure in alloy 304L, *Surface and Coatings Technology*. 2021;408. doi: [10.1016/j.surfcoat.2021.126850](https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.126850)
- [16] Shah M, Das S K, Chowdhury S G. Effect of Alloying Elements on Microstructure and Mechanical Properties of Air-Cooled Bainitic Steel. *Metallurgical and Materials Transactions: A*. 2019;50:2092–102. doi: [10.1007/s11661-019-05177-1](https://doi.org/10.1007/s11661-019-05177-1)