

Investigating the Effect of Different Cooling and Lubrication Regimes on the Tool Wear Mechanism in Milling Process of Aluminium 7075

Ali Jamshidi, Behzad Jabbaripour^{*id}, Mohammad Hassan Pachenari

Department of Mechanical Engineering, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Article History

Received: April 21, 2025

Revised: May 23, 2025

Accepted: June 21, 2025

ePublished: August 01, 2025

ABSTRACT

This study investigates tool wear and elemental analysis (EDAX) on cutting tool surfaces, machined surface topography and microhardness variations in the cross-section of milled aluminium 7075 samples under dry, Flood Cooling and minimum quantity lubrication (MQL) conditions. The MQL method, by reducing the friction coefficient and effectively transferring heat, demonstrated better performance in reducing tool wear and improving workpiece surface quality compared to dry and water-based coolant machining. In dry machining, defects such as built-up layers and tool chipping were observed. In MQL milling, these defects were significantly reduced and tool chipping was eliminated. Based on elemental analysis of the tool surfaces, a combination of burning defects and adhered layers was detected in all three conditions. Increasing the cutting speed led to higher oxidation levels and a greater density of burn marks in all cases. The burn area was smallest in MQL machining and largest in dry machining. With increasing cutting speed, the workpiece average hardness in all three conditions increased compared to the bulk material. In dry conditions, due to the absence of a coolant and lubricant, localized heating at the cutting zone caused thermal softening, resulting in lower hardness values compared to the other conditions. Regarding surface topography, the lowest amount of adhered particle defects was observed in the MQL condition due to the presence of a lubricant film on the work surface, which prevented direct tool contact and reduced the surface friction coefficient. Conversely, the highest density and variety of defects were observed in dry machining.

Keywords: Milling, Aluminium 7075, Tool Wear, Topography, Microhardness, Minimum Quantity Lubrication (MQL).

How to cite this article

Jamshidi A, Jabbaripour B & Pachenari M.H, Investigating the Effect of Different Cooling and Lubrication Regimes on the Tool Wear Mechanism in Milling Process of Aluminium 7075. Modares Mechanical Engineering; 2025;25(04):241-252.

*Corresponding author's email: beh.jabbaripour@iaui.ac.ir

*Corresponding ORCID ID: 0000-0003-0081-3952



Copyright© 2025, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

۱- مقدمه

آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ یکی از پرکاربردترین آلیاژهای سری ۷۰۰۰ است که به دلیل خواص مکانیکی برجسته و قابلیت ماشین‌کاری مناسب، در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی و صنایع دفاعی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، ماشین‌کاری این آلیاژ با چالش‌هایی همراه است. این آلیاژ به دلیل هدایت حرارتی بالا، گرما را به سرعت منتقل می‌کند که این ویژگی می‌تواند باعث گرم شدن بیش از حد ابزار برش در تماس با قطعه‌کار شود و عمر ابزار را کاهش دهد. همچنین این آلیاژ تمایل زیادی به چسبیدن به سطح ابزار در دماهای بالا را دارد که می‌تواند منجر به تشکیل لایه‌های چسبیده روی ابزار و کاهش کارایی آن شود. شرایط مختلف خنک‌کاری و روانکاری و تغییر پارامترهایی مانند سرعت برش، نرخ پیشروی و عمق برش نیز می‌تواند به شدت بر کیفیت سطح قطعه کار و سایش ابزار تأثیر گذارد [1].

روش مقدار روانکاری کمینه (MQL) یک تکنیک نسبتاً پیشرفته خنک‌کاری و روانکاری است که در آن مقدار بسیار کمی از روانکار یا سیال خنک‌کار به صورت مستقیم و هدفمند به ناحیه برش تزریق می‌شود. در این روش، برخلاف خنک‌کاری آب‌صابون که حجم زیادی از سیال استفاده می‌شود، تنها چند ده میلی‌لیتر روانکار در هر ساعت مصرف می‌شود. در این روش ذرات بسیار ریز روغن به صورت مخلوط با جت هوا به ناحیه برش پاشش می‌شود. عملکرد ماشین‌کاری MQL به طور قابل توجهی به پارامترهای تنظیمی آن مانند نوع روغن، دبی جریان روغن، فاصله نوک نازل پاشش تا سر ابزار، فشار هوا، قطر نازل و سایر موارد بستگی دارد [2].

یکپارچگی سطح (Surface Integrity) ماشینکاری شده مفهومی است که به ترکیبی از خواص سطح ماده قطعه‌کار، از جمله ویژگی‌های مکانیکی، متالورژیکی، شیمیایی و توپوگرافی آن سطح، پس از فرآیند ماشینکاری (سنتی یا مخصوص) اشاره دارد. این خواص به طور قابل توجهی بر عملکرد، بهره‌وری و طول عمر یک قطعه تأثیر می‌گذارند [3].

مارکس و همکاران [6] در تحقیقی، به بررسی اثر افزودن روانکار جامد به روغن پایه گیاهی مورد استفاده در روش MQL در فرآیند تراشکاری آلیاژ Inconel 718 پرداختند. نرم شدن اولیه در ماشین‌کاری خشک به دلیل دمای بالاتر تولید شده در این حالت، بارزتر بوده است. آلیاژهای پایه نیکل رسانای حرارتی ضعیفی هستند و گرمای باقی‌مانده در قطعه‌کار، فرآیند نرم شدن ماده (Material Softening) را تسهیل می‌کند.

اعظمی و همکاران [7] در تحقیقی، فرآیند سنگ‌زنی فولاد AISI D₂ به روش MQL با افزودن نانوذرات MoS₂ و CuO به دو نوع روغن گیاهی کلزا و سویا با غلظت‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر نیروهای برشی و زبری سطح را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد که مقادیر نیروهای عمودی و مماسی با استفاده از پودر نانو اکسید

مس در روغن پایه سویا با غلظت ۴ درصد و نانو پودر MoS₂ در روغن پایه سویا با غلظت ۲ درصد، به ترتیب ۱۹ و ۳۵ درصد کاهش یافت. ساراواناکومار و همکاران [8] در تحقیقی، به بررسی فرآیند ماشین‌کاری فولاد S32760 تحت سه حالت خشک، MQL و گاز نیتروژن پرداختند. دمای برش در ماشین‌کاری با خنک‌کاری گاز نیتروژن و MQL نسبت به ماشین‌کاری خشک به ترتیب ۳۳/۱۶ درصد و ۴۴/۳۱ درصد کاهش یافت. در بحث سایش ابزار، این پارامتر در ماشین‌کاری با خنک‌کاری گاز نیتروژن و MQL نسبت به ماشین‌کاری خشک، به ترتیب ۵۲/۲۷ درصد و ۶۶/۴۵ درصد کاهش یافت. نتایج همچنین نشان داد که ماشین‌کاری MQL عملکرد بهتری در کاهش دمای برش و سایش ابزار در مقایسه با ماشین‌کاری خشک و ماشین‌کاری با خنک‌کاری گاز نیتروژن دارد. ژانگ و همکاران [9] در فرزکاری آلیاژ Inconel 718 به این نتیجه رسیدند که میزان شکست و یا سایش ابزار در حالت خشک بسیار بیشتر از حالت روانکاری کمینه است. این پدیده به دلیل اصطکاک کمتر در موضع تماس ابزار-براده- قطعه‌کار است که به دلیل روانکاری موثر با فیلم روغن، در حالت MQL اتفاق می‌افتد.

سارکار و همکاران [10] در تحقیقی، به بررسی امکان استفاده از روغن نارگیل به عنوان سیال برشی در کنار شرایط خشک و MQL در ماشین‌کاری سوپرآلیاژ پایه نیکل پرداختند. در فرآیند ماشین‌کاری، تنش‌های زیاد می‌تواند منجر به جوش خوردن ماده قطعه‌کار بر روی سطح براده ابزار شده و براده با لبه انباشته یا براده با لایه انباشته را تشکیل دهد. همچنین اثر سوختگی در حالت آب‌صابون همانند حالت خشک همراه با لایه چسبیده از قطعه‌کار بر روی سطح براده مشاهده شد. در عین حال در حالت MQL اثر سوختگی همانند دو حالت قبلی بر روی سطح براده ابزار وجود دارد اما به نسبت حالت‌های دیگر اثر سوختگی کمتر ایجاد شده است. در حالت MQL، چسبندگی و جوش خوردن براده و اثر سوختگی روی سطح ابزار به دلیل دمای پایین‌تر در موضع برش، به میزان بسیار کمتری ایجاد شده است.

ژانگ و همکاران [11] در پژوهشی به مطالعه بر روی عملکرد ماشین‌کاری ابزارهای پوشش‌دار تحت حالت MQL پرداختند. در حالت MQL با وجود ۳۴/۵۲ درصد وزنی عنصر اکسیژن، اما ناحیه بسیار کمتری از سوختگی بر روی سطح ابزار ایجاد شده است. به دلیل پاشش آبروسل هوا و روغن، دما در طول فرآیند فرزکاری کاهش یافته و از واکنش اکسیداسیون روی سطح ابزار، به میزان قابل توجهی جلوگیری شده است.

تحقیقات انجام‌شده در زمینه فرزکاری با استفاده از تکنیک روانکاری کمینه (MQL) بر روی آلیاژهای آلومینیوم، به‌ویژه آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، محدود و اندک است. این مطالعه تجربی به‌طور جامع به بررسی مکانیزم‌های سایش روی سطوح ابزار برش پرداخته و از میکروسکوپ الکترونی (SEM) برای مشاهده و آنالیز سطوح استفاده شده است. علاوه بر آن، آنالیز عنصری (EDAX) به منظور

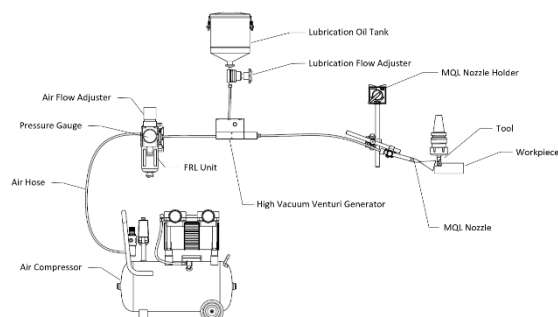
تعداد پاس‌های متوالی شیارتراشی در هر تست طراحی شده، برابر با ۴ پاس بوده است.

جدول ۱ پارامترهای برشی مورد استفاده در تست‌های ماشینکاری

Table 1 Cutting parameters used in the machining tests

Tool Feedrate (mm/tooth)	0.25 – 0.5
Spindle Speed (rpm)	3700 – 7400
Axial depth of cut (mm)	4 × 1.75 cutting pass (constant)

تصویر شماتیک مدار MQL طراحی و ساخته شده در تحقیق جاری، در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد. قبل از انجام تست‌های فرزکاری MQL، ابتدا با انجام تعداد زیادی پیش‌تست، تنظیمات مختلف و متنوع بر روی این مدار آزمایش شد و در نهایت پارامترهای بهینه مدار مطابق با جدول ۲، تعیین، تنظیم و استفاده شد. در شکل ۲، اجزای اصلی مدار MQL طراحی و استفاده شده، درج شده است.



شکل ۱ تصویر شماتیک مدار MQL مورد استفاده در تست‌های فرزکاری

Fig. 1 Schematic diagram of the MQL system used in milling tests

جدول ۲ تنظیمات و حالات بهینه مدار MQL

Table 2 Optimized settings and operating conditions of the MQL system

The optimized condition	Parameters
Nozzle positioning	Rear flushing (behind the tool)
Aerosol spray flow rate	70 – 80 (ml/hr)
Compressor air pressure	7 bar (constant)
Nozzle spray angle relative to the workpiece surface	20 (degrees)
Nozzle -tool tip distance	30 (mm)



شکل ۲ نمایش اجزای اصلی مدار MQL در تست‌های فرزکاری

Fig. 2 Display of main components of the MQL system in milling tests

شناسایی ترکیبات شیمیایی سطحی انجام می‌شود. توپوگرافی سطح قطعه‌کار نیز با استفاده از میکروسکوپ نوری، بررسی و تغییرات ریزسختی ویکرز در مقطع عرضی نمونه‌های فرزکاری شده آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ تحت شرایط مختلف (خشک، آب‌صابون و MQL) ارزیابی خواهد شد. این تحقیق با توجه به بررسی دقیق و گسترده مکانیزم‌های سایش ابزار برشی در فرآیند فرزکاری آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵، تحت شرایط مختلف خنک‌کاری و روانکاری، نسبتاً کم‌نظیر است. همچنین، در این پژوهش، یک مدار خاص روانکاری برای ماشینکاری به روش MQL طراحی، ساخته و استفاده شده است.

۲- مواد، تجهیزات و طراحی آزمایش‌ها

در این تحقیق جهت انجام تست‌های فرزکاری از دستگاه فرز کنترل عددی مدل DAHLI DMV-800 از نوع Vertical Machining Centre ساخت کشور چین و سال ساخت ۲۰۱۹ میلادی استفاده شد. حداکثر دور اسپیندل این دستگاه ۸۰۰۰ دور بر دقیقه با توان خروجی ۱۱ کیلو وات می‌باشد. در عملیات فرزکاری از ابزارهای اینسرتی (الماسه‌های) برند STC ساخت کشور چین با کد استاندارد APKT1035PDR-LHCQP810 استفاده گردید. برای هر تست ماشینکاری، یک لبه جدید اینسرت ابزار استفاده شده است. هولدر ابزار از برند X-Hold و مدل EM-API0-D12-C12-L120-Z1 بوده است. این هولدر تک اینسرت (تک‌لبه) بوده و دارای قطر ۱۲ میلی‌متر می‌باشد. برای انجام آزمایش‌های ماشینکاری، بلوک قطعه‌کار از جنس آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ به ابعاد $29/6 \times 120 \times 209$ میلی‌متر، تهیه و سپس عملیات دورتراشی و گونیا کردن روی سطوح آن انجام شد.

در تحقیق جاری دستگاه ریزسختی‌سنج مورد استفاده از برند Buehler و مدل Micromet 5114 ساخت کشور آلمان بوده است. در سختی‌سنجی به روش ویکرز، میزان نیروی بارگذاری روی ۱۰۰ گرم نیرو و زمان بارگذاری روی ۱۷ ثانیه تنظیم شد. برای بررسی توپوگرافی سطح ماشینکاری از میکروسکوپ نوری برند Olympus مدل BX51M استفاده شده است. جهت بررسی سایش سطوح ابزار از میکروسکوپ SEM مدل VEGA2-TESCAN استفاده شد تا هم میزان سایش ابزار برشی مورد بررسی قرار گیرد و همچنین با انجام آنالیز EDAX توسط همین دستگاه، آنالیز عنصری جهت تشخیص نوع عناصر شیمیایی و تغییرات غلظت آن‌ها بر روی سطوح ابزار برشی انجام شود.

در این پژوهش، با در نظر گرفتن دو سطح برای سرعت پیشروی به ازای هر دندانه ابزار و دو سطح برای سرعت اسپیندل، تحت سه حالت مختلف خنک‌کاری یعنی خشک، آب‌صابون و MQL، مجموعاً ۱۲ تست ماشینکاری مطابق با جدول ۱، طراحی و انجام شد. نوع تست‌های فرزکاری، شیارتراشی یک‌طرفه بوده است و

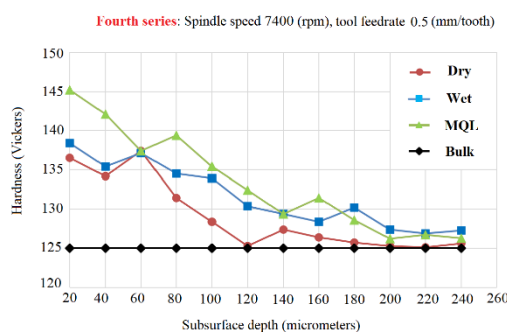
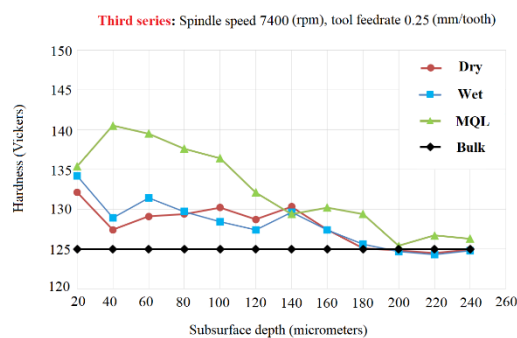
۳- نتایج و بحث

۳-۱- تغییرات ریزسختی

جهت بررسی ریزسختی ویکرز در مقطع عرضی (Cross section) سطوح فرزکاری شده، در نظر گرفته شد تا ریزسختی‌سنجی برای دو حالت برشی، از مجموع چهار حالت پارامترهای برشی انجام شده (تست‌های سری سوم و چهارم) که در جدول ۳ مشخص شده‌اند، انجام شود.

جدول ۳ نمونه‌های منتخب برای آزمون ریزسختی‌سنجی

Table 3 Selected specimens for microhardness measurement tests		
Test series	Spindle Speed (rpm)	Tool Feedrate (mm/tooth)
Third series	7400	0.25
Fourth series	7400	0.5



شکل ۳ نمودار ریزسختی برای نمونه‌های ماشینکاری شده در سری سوم و چهارم آزمایش‌ها

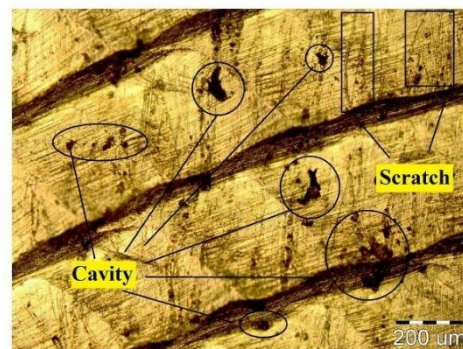
Fig. 3 Microhardness diagram for machined samples during the third and fourth experimental series

۳-۲- توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده

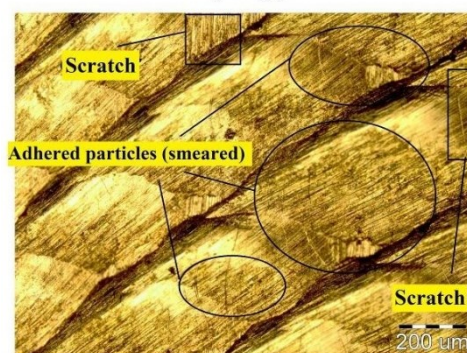
یکی از جنبه‌های مهم یکپارچگی سطح در مبحث ماشینکاری، توپوگرافی سطح قطعه‌کار می‌باشد که به بررسی عیوب در مقیاس میکرو روی سطوح ماشینکاری شده می‌پردازد که نمایانگر نقص‌ها، ایرادات و غیریکنواختی‌های ناشی از تنش و کرنش ایجاد شده به دلیل فرآیند فرزکاری بر سطح قطعه‌کار می‌باشد. به منظور بررسی دقیق سطح قطعه‌کار از تمامی نمونه‌های ماشینکاری شده در سه موقعیت ابتدا، میانه و انتهای مسیر فرزکاری به کمک میکروسکوپ نوری تصاویری با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر ثبت شده است. در شکل ۴ توپوگرافی سطح ماشینکاری شده برای سری دوم آزمایش‌ها یعنی

سختی‌سنجی ویکرز در سطح مقطع جانبی نمونه‌های فرزکاری شده از سطح تا عمق و با فواصل ۲۰ میکرومتری انجام شد و تا جایی ادامه یافت که مقادیر ریزسختی دیگر تغییر چندانی نداشته و یا به مقدار ثابتی رسیده باشد. مقدار میانگین ریزسختی ماده پایه (نمونه خام) قبل از فرآیند ماشینکاری برابر با ۱۲۵ ویکرز می‌باشد. نتایج حاصل از مقدار سختی‌سنجی برای سری سوم و چهارم آزمایش‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است. در سری سوم و چهارم آزمایش‌ها، رفتار تغییرات ریزسختی در حالت خشک و آب‌صابون مشابه یکدیگر و مقادیر سختی کمتر از حالت متناظر MQL می‌باشد. از آنجایی‌که آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ نقطه ذوب نسبتاً پایینی دارد و به دما حساس می‌باشد و استحکام و سختی این آلیاژ در دماهای بالا به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، با افزایش حرارت در موضع برش در حالت خشک، به دلیل نبود سیال خنک‌کار و روانکار و در حالت آب‌صابون احتمالاً به دلیل عدم وجود ظرفیت کافی جهت دفع موثر حرارت، نرم شدن حرارتی ماده قطعه‌کار رخ داده است. مشابه این تغییر رفتار و نرم‌شدگی ماده قطعه‌کار، توسط مارکس و همکاران [6] نیز گزارش شده است. در دماهای بالا، ممکن است تغییراتی در ساختار بلوری ماده ایجاد شود که این تغییرات احتمالاً شامل رشد دانه‌ها یا تغییرات فازی می‌باشد که می‌تواند سبب کاهش سختی شود. تغییر در اندازه دانه‌های ریزساختاری به شرایط برش و دما بستگی دارد. ریزساختارهای متالورژیکی ریزدانه به دلیل تراکم بیشتر مرز دانه‌ها، معمولاً سخت‌تر هستند، اما ریزساختارهای درشت‌دانه که به دلیل افزایش دما ایجاد می‌شود، می‌تواند منجر به کاهش سختی شوند [12]. در حالت MQL با ایجاد یک لایه روانکار و کاهش اصطکاک، به طور موثرتری حرارت دفع می‌شود و احتمالاً از رشد بیش از حد دانه‌ها و نرم شدن بیشتر سطح قطعه‌کار جلوگیری کرده و سبب می‌شود قطعه‌کار به دمای کمتر از دمای لازم جهت نرم‌شدگی شدید برسد. همچنین پاشش آبروسل هوا و روغن به موضع برش سبب کاهش نیروهای برشی شده و عملکرد ابزار را بهبود می‌بخشد [13] که منجر به ایجاد توپوگرافی سطح یکنواخت‌تر

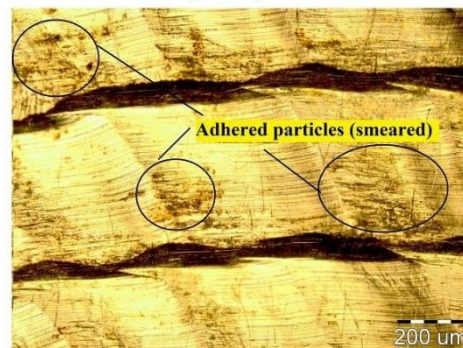
دور اسپیندل ۳۷۰۰ دور بر دقیقه و نرخ پیشروی ۰/۵ میلیمتر بر دندانه، ارائه شده است.



(Dry)



(Wet)



(MQL)

شکل ۴ تصاویر توپوگرافی سطوح ماشینکاری شده در سری دوم آزمایش‌ها (دور اسپیندل ۳۷۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلیمتر بر دندانه)
Fig. 4 Topography images of machined surfaces in the second series of experiments (spindle speed 3700 rpm, feedrate 0.5 mm/tooth)

با توجه به شکل ۴، عیبی که به طور عمده در بحث توپوگرافی سطح ماشینکاری شده مطرح است، عیب لبه انباشته یا ذرات چسبیده شده می‌باشد. زمانی که حرارت در موضع برش از حدی فراتر برود، ممکن است آلومینیوم به ابزار بچسبد و سبب ایجاد عیب ذرات چسبیده شود [12]. مطابق با شکل ۴، در حالت خشک به دلیل افزایش دما در موضع فرزکاری و عدم وجود خنک‌کار و به دلیل چسبندگی آلومینیوم در حرارت بالا، ذرات براده به سطح قطعه‌کار

جوش خورده و سبب تشکیل ذرات و لایه چسبیده می‌شود. با توجه به اینکه بر روی این لایه‌ها که حاصل جوش براده‌ها هستند تغییر شکل پلاستیک شدید رخ می‌دهد، این ذرات سختی و استحکام بسیار بالایی نسبت به مواد اولیه خواهند داشت، سپس این ذرات با حرکت مجدد ابزار ممکن است از روی سطح قطعه‌کار کنده شده و سبب تشکیل عیب حفره شود [15] که این نقص در شکل ۴، در حالت خشک مشاهده می‌شود. در حالت خشک به دلیل وجود حرارت بالاتر در موضع فرزکاری و عدم وجود سیال خنک‌کار، حجم بیشتری از ذرات براده به سطح قطعه‌کار جوش می‌خورد و با کنده شدن این ذرات حفره‌های بیشتری نسبت به دو حالت دیگر طبق شکل ۴ ایجاد شده است. در روش آب‌صابون نیز با وجود سیال خنک‌کار و نفوذ نسبی آن به موضع فرزکاری، اما بازهم ذرات چسبیده شده روی سطح قطعه‌کار مشاهده می‌شود. زمانی که سیال آب‌صابون به طور کامل توزیع نشود، آلومینیوم به سطوح ابزار می‌چسبد و این مواد چسبیده ممکن است به سطح قطعه‌کار منتقل شوند و با حرکت ابزار در پاس‌های بعدی ذرات چسبیده یا مالیده شده را ایجاد کنند. در روش MQL مقدار تراکم لایه‌های انباشته نسبت به دو حالت دیگر بسیار کمتر می‌باشد، چرا که وجود روانکار از طرفی سبب ایجاد فیلم روغن در موضع برش شده و مانع از تماس مستقیم ابزار و کاهش ضریب اصطکاک سطح می‌شود؛ در نتیجه نیروی ماشینکاری کم می‌شود که موجب عدم چسبندگی ذرات به سطح قطعه‌کار و عدم ایجاد حفره‌ها در این روش شده است. همچنین پاشش ایروسل هوا و روغن با سرعت و فشار بالا سبب دور کردن ذرات و براده‌های جدا شده از سطح می‌شود. از طرف دیگر در سرعت پیشروی بالا، احتمالاً سرعت جریان هوا در اطراف ابزار بیشتر شود [16] که می‌تواند قطرات روانکار MQL را بهتر به موضع برش هدایت کند و موجب بهبود روانکاری و کاهش عیوب سطحی ناشی از اصطکاک در حالت MQL می‌شود.

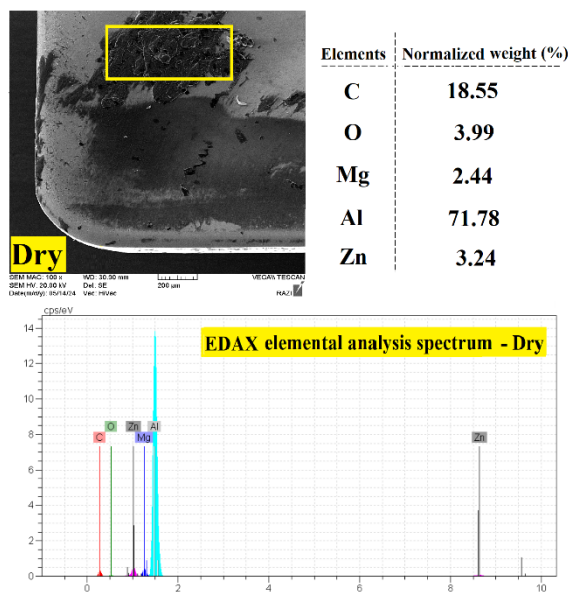
۳-۳- سایش ابزار و آنالیز عنصری EDAX

در این بخش جهت بررسی مکانیزم‌های سایش سطح براده و سطح آزاد اصلی ابزار، دو سری از چهار سری اینسرت‌های برشی تحت حالات فرزکاری خشک، آب‌صابون و MQL بررسی شده‌اند. بزرگنمایی میکروسکوپ SEM برای تصویربرداری، ۱۰۰ برابر بوده است.

در این پژوهش از آنالیز EDAX نیز به منظور بررسی آنالیز عنصری جهت تشخیص نوع عناصر شیمیایی و تغییر غلظت آن‌ها در نواحی مختلف سطوح ابزار برشی استفاده شد. نحوه کلی کار آنالیز عنصری به این صورت است که با استفاده از اشعه بازتاب شده در اثر بمباران الکترونی یک موضع سطحی، می‌توان عناصر شیمیایی تشکیل دهنده آن موضع را شناسایی کرد.

در این پژوهش برای هر آنالیز عنصری (EDAX) انجام شده روی ابزارها، سه نوع اطلاعات ارائه می‌شود: ۱- عکس میکروسکوپ SEM که ناحیه مورد نظر برای آنالیز با یک کادر مستطیلی مشخص

است. در حالت خشک به دلیل عدم حضور سیال خنک‌کننده، زمانی‌که دمای موضع برش به حد بحرانی برسد، به دلیل خواص آلومینیوم همچون هدایت حرارتی بالا و خاصیت چسبندگی در دمای بالا، نرم شدن آلومینیوم اتفاق افتاده و این نرم‌شدگی ماده قطعه‌کار، سبب چسبیدن آن به سطح براده ابزار می‌گردد. آنالیز EDAX در حالت خشک مطابق با شکل ۶، نشان‌دهنده وجود ۷۱/۷۸ درصد وزنی عنصر آلومینیوم (Al) روی سطح براده ابزار در ناحیه مشخص شده است که عیب براده با لایه انباشته را اثبات می‌کند. در حالت آب‌صابون و خصوصا MQL به دلیل استفاده مداوم از سیال‌های روانکار و خنک‌کار که سبب دورکردن براده‌ها، کاهش دما و کاهش اصطکاک بین براده و سطح ابزار شده است، هیچ‌گونه براده با لایه انباشته، روی سطح براده ابزار تشکیل نمی‌شود.



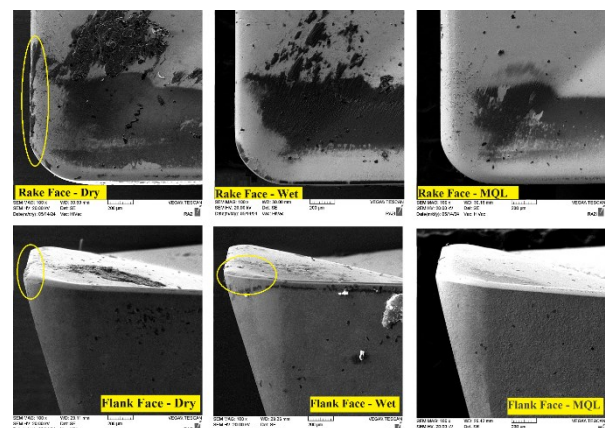
شکل ۶ آنالیز عنصری روی سطح براده ابزار در سری دوم آزمایش (دور اسپیندل ۳۷۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دندانه)
Fig. 6 Elemental analysis on the tool rake face in the second series of experiments (spindle speed 3700 rpm, feedrate 0.5 mm/tooth)

در شکل ۷ مطابق با آنالیز عنصری EDAX از ناحیه سوختگی روی سطح براده ابزارها (مشخص شده با کادر مستطیلی) عیب دیگری که در سه حالت خنک‌کار و روانکار در این سری از آزمایش‌ها ایجاد شده است که در تحقیق سارکار و همکاران [10] نیز این مکانیزم مشاهده شده است، اثر سوختگی توام با لایه چسبیده می‌باشد. در هر سه رژیم خنک‌کاری و روانکاری، عناصر آلومینیوم (Al)، اکسیژن (O)، منیزیم (Mg) و کربن (C) درصد وزنی بالایی نسبت به سایر عناصر داشتند. حضور عناصر آلومینیوم و منیزیم در هر سه حالت، ناشی از چسبندگی و انتقال ماده از سطح قطعه‌کار به روی سطح براده ابزار بوده و حضور عناصر اکسیژن و کربن نیز بیانگر فرآیند اکسیداسیون به همراه علائم سوختگی در سطح براده ابزار می‌باشد.

شده است. ۲- جدول درصد وزنی نرمال عناصر شیمیایی ردیابی شده در سطح آنالیز شده. ۳- نمودار پراش (پیک‌های) آنالیز عنصری.

۳-۱-۳- سایش ابزار و آنالیز عنصری سری دوم آزمایش (دور اسپیندل ۳۷۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دندانه)

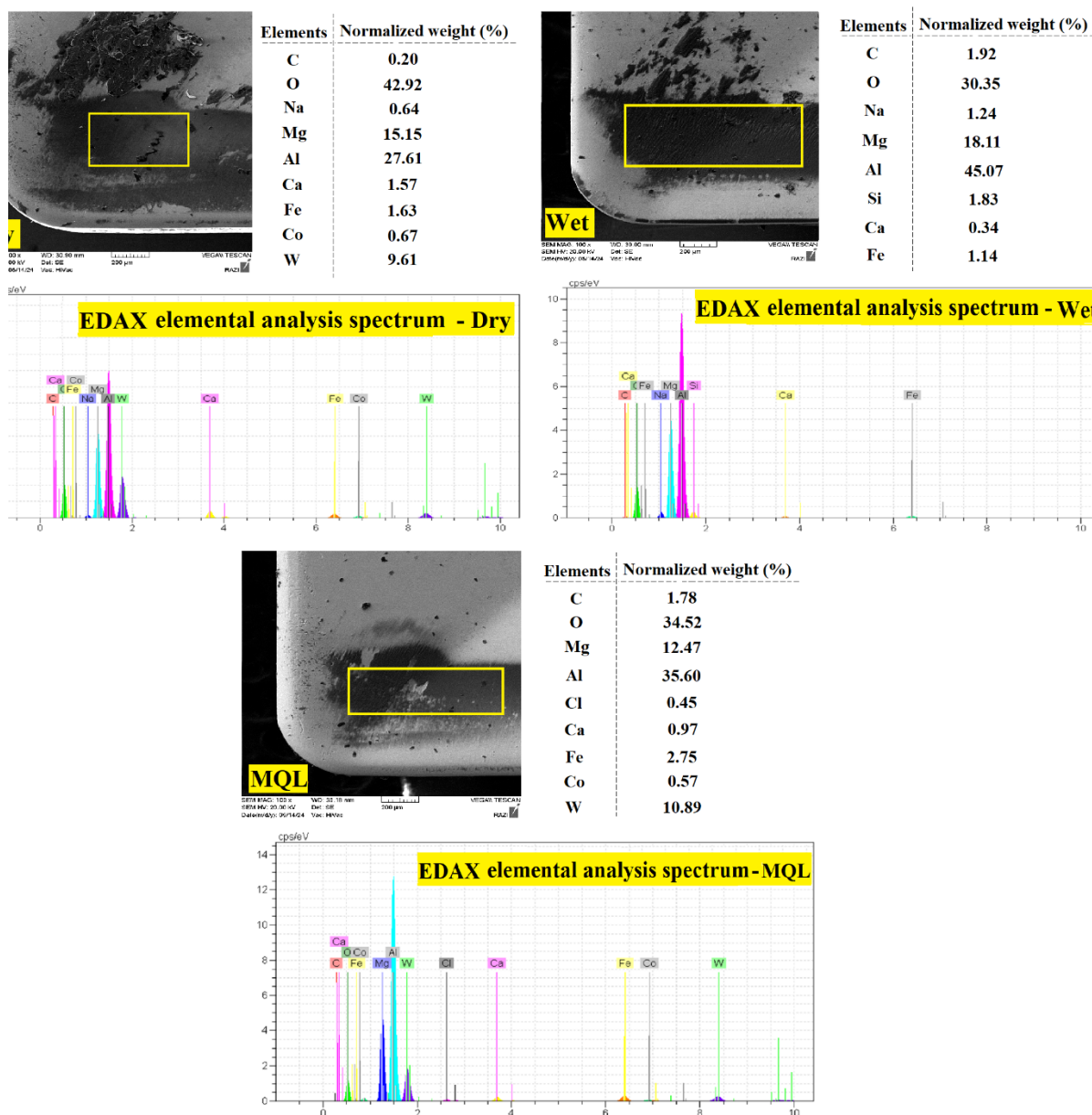
در حالت خشک مطابق با شکل ۵ سایش به صورت لب‌پریدگی (Chipping) در لبه ابزار مشاهده شد. مشابه با نتایج تحقیق ژانگ و همکاران [9]، علت ایجاد لب‌پریدگی در شرایط خشک، می‌تواند میزان حرارت بالا در موضع برش باشد که به علت عدم حضور خنک‌کار و روانکار منجر به افزایش اصطکاک بین سطح ابزار و قطعه‌کار می‌شود. سپس با نرم شدن براده‌های جدا شده و با انباشته شدن مواد روی هم و ایجاد لبه انباشته، وقتی تنش وارد به آن از تنش تسلیم ماده فراتر رود، لبه انباشته کنده می‌شود. به هنگام کنده شدن لبه انباشته، امکان لب‌پریدگی یا شکست نوک ابزار و یا چسبیدن لبه انباشته به سطح ماشین‌کاری وجود دارد [17].



شکل ۵ تصاویر SEM از سطوح ابزار در سری دوم آزمایش (دور اسپیندل ۳۷۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دندانه)
Fig. 5 SEM images of tool surfaces in the second series of experiments (spindle speed: 3700 rpm, feedrate: 0.5 mm/tooth)

در حالت آب‌صابون نیز سایش در نوک ابزار ایجاد شده که ممکن است به دلیل تغییر دمای سریع و تنش‌های حرارتی ناگهانی [15] رخ داده باشد که میزان آن نسبت به حالت خشک کمتر است. در حالت MQL مطابق با شکل ۵، تقریباً هیچ‌گونه آثاری از لب‌پریدگی مشاهده نمی‌شود. در حالت MQL به دلیل پاشش مداوم جریان آبروسل هوا و روغن و نفوذ بهتر آن به موضع برش، تماس مستقیمی بین ابزار و قطعه‌کار ایجاد نشده و با تبخیر نسبی روغن، حرارت در موضع برش کاهش می‌یابد [18].

مشابه به نتایج تحقیق سارکار و همکاران [10] مکانیزم سایش براده با لایه انباشته (BUL) در فرزکاری محیط خشک را می‌توان از تصویر SEM شکل ۵ و آنالیز EDAX مطابق با شکل ۶ در سطح براده ابزار مشاهده کرد که ناشی از چسبندگی مواد قطعه‌کار بر روی ابزار برش



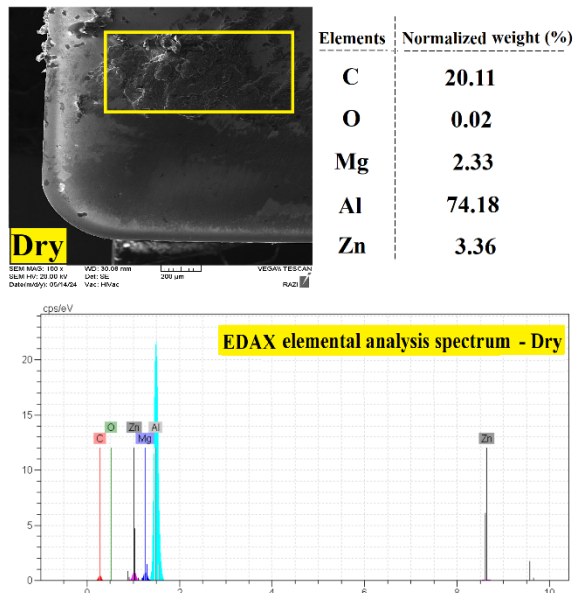
شکل ۷ آنالیز عنصری روی ناحیه سوختگی در سطح براده ابزار برای سری دوم آزمایش (دور اسپیندل ۳۷۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلیمتر بر دندان)

Fig.7 Elemental analysis of the burn area on the tool rake face for the second test series (spindle speed 3700 rpm, feedrate 0.5 mm/tooth)

آب‌صابون، عامل کاهش اثر سوختگی نسبت به حالت خشک می‌باشد. در حالت MQL، علیرغم وجود ۳۴/۵۲ درصد وزنی عنصر اکسیژن اما ناحیه بسیار کمتری از سوختگی نسبت به دو حالت دیگر ایجاد شده است. در حالت MQL به دلیل پاشش مستقیم و یکنواخت آبروسل به سطح ابزار برشی، مشابه با نتایج تحقیق ساراواناکومار و همکاران [8] دما در موضع برش کاهش یافته، دفع بهتر حرارت صورت گرفته و از واکنش اکسیداسیون به میزان قابل توجهی جلوگیری شده است و ناحیه سوختگی روی سطح ابزار محدودتر شده است.

مطابق با شکل ۷ در حالت خشک وجود ۴۲/۹۲ درصد وزنی عنصر اکسیژن، نشانگر فرآیند اکسیداسیون بیشتری نسبت به دو حالت دیگر بوده و نیز محدوده بیشتری در اثر سوختگی بر سطح براده ابزار ایجاد شده است که به دلیل نبود سیال خنک‌کار و افزایش دمای موضع برش ایجاد شده است. در حالت آب‌صابون به دلیل وجود سیال خنک‌کننده، درصد وزنی اکسیژن ۳۰/۳۵ بوده که کمتر از حالت خشک بوده و ناحیه سوختگی نیز نسبتاً محدودتر شده است. پژوهش راجاگورا و همکاران [18] نیز نشان داده است که پاشش مداوم آب‌صابون به موضع ماشینکاری سبب دفع نسبی حرارت در موضع برش می‌شود و کاهش حرارت به وجود آمده در روش

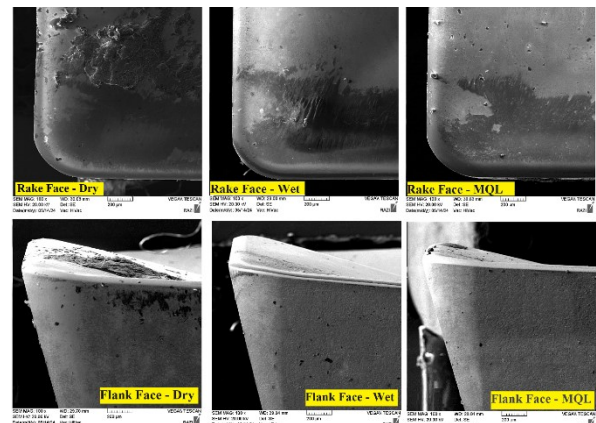
چشم می‌خورد. اما ناحیه محدودتر سوختگی خصوصا در حالت MQL روی سطح براده ابزار، همان‌طور که در تحقیق ژانگ و همکاران [11] نیز اتفاق افتاده است، احتمالا به دلیل وجود درصد بالایی از اسیدهای چرب اشباع شده و همچنین میزان ویسکوزیته بالا در آبروسل می‌باشد که سبب اصطکاک کمتر و روانکاری بهتر مابین قطعه‌کار و ابزار می‌باشد [19].



شکل ۹ آنالیز عنصری روی سطح براده ابزار در سری چهارم آزمایش (دور اسپیندل ۷۴۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دندانه)
Fig. 9 Elemental analysis on the tool rake face in the fourth test series (spindle speed 7400 rpm, feedrate 0.5 mm/tooth)

با توجه به شکل ۱۰ و بر اساس آنالیز EDAX، عناصری که درصد وزنی بالایی به نسبت سایر عناصر بر روی سطح براده ابزار داشتند، همانند سری دوم آزمایش، عناصر آلومینیوم (Al)، اکسیژن (O)، منیزیم (Mg) و کربن (C) می‌باشند. درصد وزنی عنصر اکسیژن بر روی سطوح براده در حالت خشک ۵۹/۳۷، در حالت MQL ۴۴/۵۶ و در حالت آب‌صابون ۴۳/۱۳ به ترتیب نزولی وجود دارد. لازم به ذکر است در سری چهارم آزمایش، با افزایش دور اسپیندل و به تبع آن افزایش سرعت برشی در فرزکاری، میزان اکسیداسیون و پیدایش علائم سوختگی به دلیل وجود درصد وزنی بیشتر عناصر اکسیژن (O) و کربن (C) در همه حالات خنک‌کاری به نسبت سری دوم آزمایش‌ها، افزایش یافته است. با افزایش دور اسپیندل و در نتیجه آن سرعت برشی، عمدتاً حرارت در موضع برش افزایش می‌یابد که این دمای بالاتر منجر به افزایش میزان اکسیداسیون روی سطح ابزار شده است.

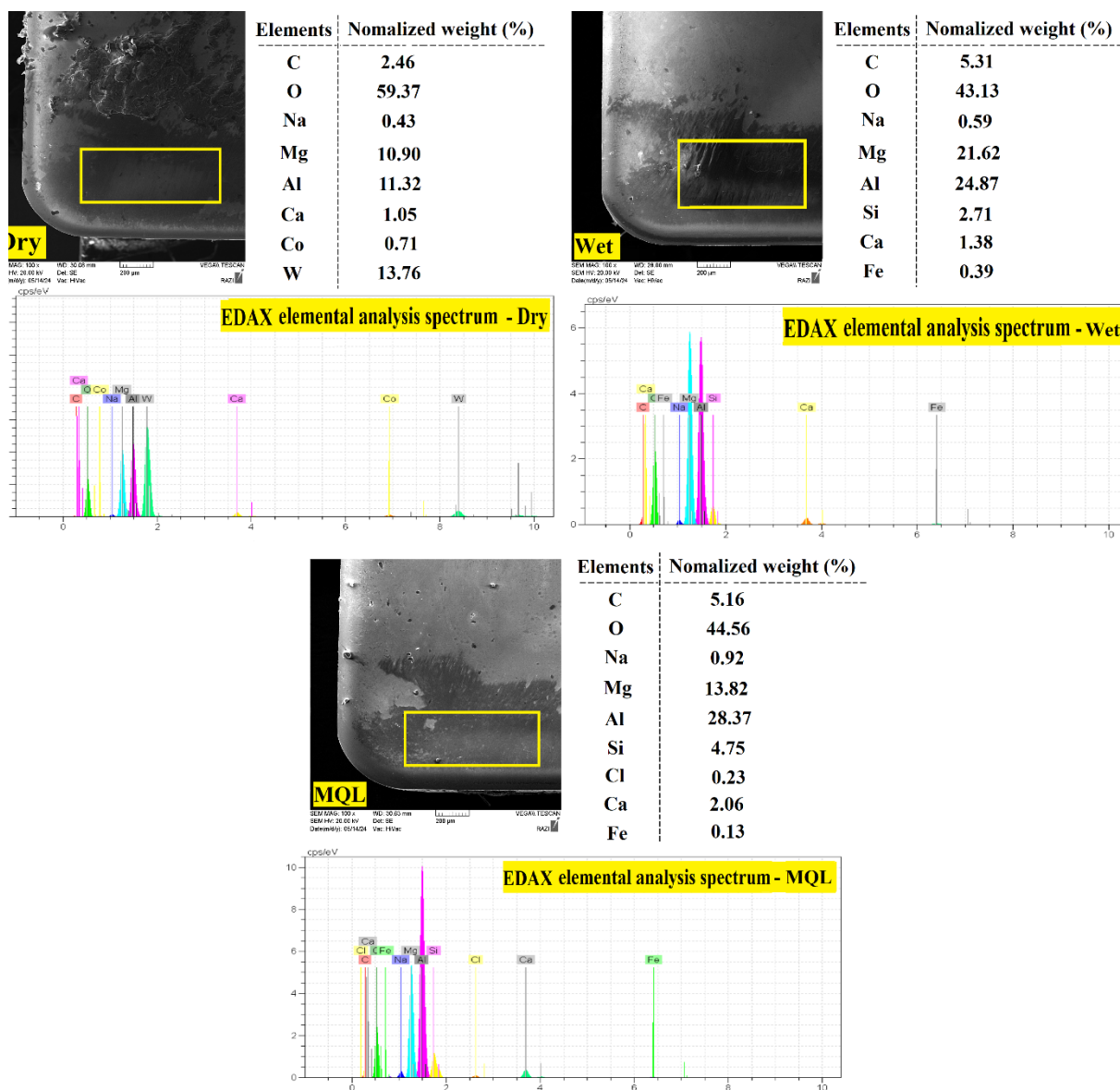
۳-۳-۲- سایش ابزار و آنالیز عنصری سری چهارم آزمایش (دور اسپیندل ۷۴۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دندانه)
 در سری چهارم آزمایش با افزایش سرعت اسپیندل (سرعت برشی)، با وجود وقوع سایش و برخی عیوب نظیر چسبیدگی براده توام با سوختگی بر روی سطح براده و آزاد الماسه‌های ابزار، اما برخی عیوب نظیر لب‌پریدگی و سایش در لبه ابزار که در حالت خشک و آب‌صابون در سری دوم ایجاد شده بود، مطابق با شکل ۸ در این سری تقریباً تشکیل نشده است. علت عدم تشکیل عیوب مذکور می‌تواند به دلیل افزایش سرعت برشی باشد که سبب کاهش نیروی برشی و تنش‌های مکانیکی روی لبه ابزار می‌شود و منجر به کاهش لب‌پریدگی شده است [12].



شکل ۸ تصاویر SEM از سطوح ابزار در سری چهارم آزمایش (دور اسپیندل ۷۴۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلی‌متر بر دندانه)
Fig. 8 SEM images of tool surfaces in the fourth test series (spindle speed 7400 rpm, feedrate 0.5 mm/tooth)

مطابق با شکل ۸، در حالت خشک به دلیل سیلان براده با سرعت بیشتر نسبت به سری قبل، آثاری از ذرات براده به صورت چسبیده به سطح آزاد ابزار ایجاد شده است. ذرات براده به دلیل دمای بالا حین جدا شدن از قطعه‌کار، نرم شده و با برخورد به سطح آزاد ابزار در نبود سیال خنک‌کار، به این ناحیه می‌چسبند. در حالت آب‌صابون و MQL به علت نوع خنک‌کاری و روانکاری و کاهش دما در موضع برش، هیچ‌گونه اثر ملموسی از سایش در سطح آزاد ابزار به چشم نمی‌خورد.

مطابق شکل ۱۰، با آنالیز EDAX در سطح براده ابزار برای هر سه رژیم خنک‌کاری و روانکاری، سوختگی توام با لایه چسبیده همانند سری قبل ایجاد شده است. وجود اثر سوختگی در حالت آب‌صابون و MQL امری غیرقابل انکار می‌باشد که با توجه به مقادیر نسبتاً شدید پارامترهای برشی در این سری از آزمایش‌ها، در حالت آب‌صابون احتمالاً به دلیل ناکافی بودن ظرفیت خنک‌کاری و در حالت MQL به دلیل تبخیر نسبی روغن موجود در آبروسل و به دنبال آن تشکیل لایه چسبنده آلومینیوم از ماده قطعه‌کار بر روی سطح براده ابزار به



شکل ۱۰ آنالیز عنصری روی ناحیه سوختگی در سطح براده ابزار برای سری چهارم آزمایش (دور اسپیندل ۷۴۰۰ دور بر دقیقه، نرخ پیشروی ۰/۵ میلیمتر بر دندانه)

Fig.10 Elemental analysis of the burn area on the tool rake face for the fourth test series (spindle speed 7400 rpm, feedrate 0.5 mm/tooth)

۴- نتیجه‌گیری

آبروسل روغن و هوا، نفوذ بهتری نسبت به سیال آب‌صابون به موضع برش داشته که همین امر سبب دور کردن براده‌های جدا شده از سطح کار می‌شود و عیوب سطحی کاهش یافتند.

(۳) طبق تصاویر SEM و آنالیزهای EDAX به دلیل خاصیت چسبندگی آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵ در دمای بالا، در سری دوم و چهارم آزمایش‌ها، پدیده لایه انباشته بر روی سطح براده ابزار، فقط در حالت خشک ایجاد شد.

(۴) آنالیزهای EDAX بر روی نواحی سوختگی در سطح براده ابزارها، وجود عناصر آلومینیوم و منیزیم از عناصر تشکیل‌دهنده ماده قطعه‌کار و وجود عناصر اکسیژن و کربن که

(۱) با افزایش نرخ پیشروی در سری چهارم آزمایش‌های ماشینکاری، مقادیر سختی در همه حالات خنک‌کاری و روانکاری افزایش یافت. در حالت MQL کاهش دمای موضع برش مانع از نرم شدن بیشتر سطح قطعه‌کار آلومینیومی شده است و منجر به مقادیر ریزسختی بالاتر نسبت به دو حالت خشک و آب‌صابون شده است.

(۲) تراکم و تعدد عیوب توپوگرافی سطح فرزکاری شده در حالت خشک و آب‌صابون به مراتب بیشتر از حالت MQL مشاهده شد. در حالت MQL به سبب ماهیت ریز ذرات روغن و پاشش این ذرات با سرعت و فشار بالا همراه با جت هوا،

- TiAl intermetallic," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 15, no. 1, pp. 56–68, 2013. doi: [10.1016/j.jmapro.2012.09.016](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.09.016)
- [4] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, and H. Faraji, "Investigating Output Characteristics in Powder Mixed Electrical Discharge Machining of γ -TiAl Intermetallic," *Modares Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 74–86, 2013. doi: [10.1001.1.10275940.1391.12.5.6.9](https://doi.org/10.1001.1.10275940.1391.12.5.6.9)
- [5] B. Jabbaripour, M. J. Ansari, and A. Taheri, "Investigating delamination, uncut fibers, tolerances and surface topography in high speed drilling of polypropylene composite reinforced with carbon fibers and calcium carbonate nano-particles," *International Journal of Material Forming*, vol. 14, no. 6, pp. 1417–1437, 2021. doi: [10.1007/s12289-021-01639-3](https://doi.org/10.1007/s12289-021-01639-3)
- [6] A. Marques, M. P. Suarez, W. F. Sales, and A. R. Machado, "Turning of Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools applying vegetable-based cutting fluid mixed with solid lubricants by MQL," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 266, pp. 530–543, 2019. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2018.11.032](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.11.032)
- [7] A. Azami, Z. Salahshournejad, E. Shakouri, A. R. Sharifi, and P. Saraeian, "Influence of nano-minimum quantity lubrication with MoS₂ and CuO nanoparticles on cutting forces and surface roughness during grinding of AISI D2 steel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 87, pp. 209–220, 2023. doi: [10.1016/j.jmapro.2023.01.029](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.01.029)
- [8] M. Saravanakumar, P. Tamilselvam, and M. Subramanian, "Eco-friendly machining of super duplex stainless steel (UNS S32760) under nitrogen gas cooled and vegetable oil based MQL system," *PalArch's Journal of Archaeology of Egypt*, vol. 17, pp. 5267–5294, 2020.
- [9] S. Zhang, J. F. Li, and Y. W. Wang, "Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions," *Journal of Cleaner Production*, vol. 32, pp. 81–87, 2012. doi: [10.1016/j.jclepro.2012.03.014](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.014)
- [10] S. Sarkar and S. Datta, "Machining performance of Inconel 718 under dry, MQL, and nanofluid MQL conditions: Application of coconut oil (base fluid) and multi-walled carbon nanotubes as additives," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 46, pp. 2371–2395, 2021. doi: [10.1007/s13369-020-05058-5](https://doi.org/10.1007/s13369-020-05058-5)
- [11] Y. Zhang, N. Liu, X. Li, Y. Zheng, L. Wu, T. He, H. Xia, and D. Li, "A new TiAlSiN coated tool and its machining performance evaluation for milling difficult-to-machining materials under MQL conditions," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 101, pp. 589–599, 2023. doi: [10.1016/j.jmapro.2023.05.112](https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.112)
- [12] M. K. Gupta, P. Nieslony, M. Sarikaya, M. E. Korkmaz, M. Kuntoglu, and G. M. Królczyk, "Studies on geometrical features of tool wear and other important machining characteristics in sustainable turning of aluminium alloys," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 10, pp. 943–957, 2023. doi: [10.1007/s40684-023-00501-y](https://doi.org/10.1007/s40684-023-00501-y)

نشانگر فرآیند اکسیداسیون ناشی از سوختگی است را در هر سه حالت خنک‌کار و روانکار تایید می‌کند. مطابق با آنالیزهای EDAX، پدیده سوختگی توام با تشکیل لایه چسبنده بر روی ابزار، که در حالت آب‌صابون و MQL در سری دوم و چهارم آزمایش‌ها رخ داده است، احتمالاً به دلیل ظرفیت ناکافی خنک‌کاری و یا تبخیر نسبی روغن آبروسل اتفاق افتاده است. با این وجود، در حالت آب‌صابون و MQL، به دلیل دفع بهتر حرارت نسبت به حالت خشک، درصد وزنی کمتری از عنصر اکسیژن روی سطوح ابزارها، ردیابی شده است.

۵) در سری چهارم آزمایش‌ها نسبت به سری دوم، درصد وزنی عنصر اکسیژن در همه حالات خنک‌کاری و روانکاری افزایش یافته است. با افزایش دور اسپیندل و متعاقباً سرعت برشی، حرارت در موضع برش افزایش یافته که منجر به اکسیداسیون بیشتر در سطح براده ابزار می‌شود. کمترین علائم سوختگی بر روی سطح براده ابزار در حالت MQL رخ داده است، چرا که فیلم روغن در موضع برش به طور نسبی از واکنش بین اکسیژن محیط و عناصر تشکیل دهنده ماده ابزار و قطعه‌کار جلوگیری کرده است.

تأییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای چاپ، به نشریه دیگری نیز فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر، هیچگونه تعارض منافی با سازمان‌ها و اشخاص دیگر ندارد.

نقش نویسندگان: علی جمشیدی (نویسنده اول)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۴۰٪)؛ بهزاد جباری‌پور (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی/روش‌شناس/تحلیل‌گر داده‌ها (۳۰٪)؛ محمدحسن پاچناری (نویسنده سوم)، پژوهشگر اصلی/نگارنده بحث (۳۰٪).

منابع مالی: توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

منابع

- [1] M. Y. Khalid, R. Umer, and K. A. Khan, "Review of recent trends and developments in aluminium 7075 alloy and its metal matrix composites (MMCs) for aircraft applications," *Results in Engineering*, vol. 20, p. 101372, 2023. doi: [10.1016/j.rineng.2023.101372](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101372)
- [2] N. Khanna, P. Shah, and Chetan, "Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO₂ techniques during the machining of 15-5PH SS alloy," *Tribology International*, vol. 146, p. 106196, 2020. doi: [10.1016/j.triboint.2020.106196](https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106196)
- [3] B. Jabbaripour, M. H. Sadeghi, M. R. Shabgard, and H. Faraji, "Investigating surface roughness, material removal rate and corrosion resistance in PMEDM of γ -

dry turning of CoCrMo alloy," *Procedia CIRP*, vol. 13, pp. 219–224, 2014. doi: [10.1016/j.procir.2014.04.038](https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.038)

[17] A. Andersson, "Built-up edge formation in stainless steel milling," M.Sc. thesis, Dept. Materials Sci. Eng., KTH Royal Inst. Technol., Stockholm, Sweden, 2017.

[18] J. Rajaguru and N. Arunachalam, "A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel," *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 276, p. 116417, 2020. doi: [10.1016/j.jmatprotec.2019.116417](https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116417)

[19] A. Pal, S. S. Chatha, and H. S. Sidhu, "Performance evaluation of various vegetable oils and distilled water as base fluids using eco-friendly MQL technique in drilling of AISI 321 stainless steel," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 745–764, 2022. doi: [10.1007/s40684-021-00355-2](https://doi.org/10.1007/s40684-021-00355-2)

[13] M. Z. A. Yazid, G. A. Ibrahim, A. Y. M. Said, C. H. Che Haron, and J. A. Ghani, "Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL," *Procedia Engineering*, vol. 19, pp. 396–401, 2011. doi: [10.1016/j.proeng.2011.11.131](https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.131)

[14] K. K. Wika, P. Litwa, and C. Hitchens, "Impact of supercritical carbon dioxide cooling with Minimum Quantity Lubrication on tool wear and surface integrity in the milling of AISI 304L stainless steel," *Wear*, vol. 426–427, pp. 1691–1701, 2019. doi: [10.1016/j.wear.2019.01.103](https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.103)

[15] E. Ozdemir and A. Gullu, "Investigation of the surface quality and machinability of AISI 316LVM," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 237, no. 3, pp. 1–14, 2023. doi: [10.1177/09544089231190764](https://doi.org/10.1177/09544089231190764)

[16] A. Bordin, S. Bruschi, and A. Ghiotti, "The effect of cutting speed and feed rate on the surface integrity in