

بررسی اثرات خنک کاری فوق سرد بر سنگ زنی آلیاژ تیتانیوم

محمد نساج پور اصفهانی^۱ و مجید قریشی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۶/۲۰)

چکیده

در این مقاله سعی شده است با استفاده از خنک کاری فوق سرد با نیتروژن مایع آسیب‌هایی از جمله زبری سطح، میکروتُرک‌ها، اکسیداسیون و سوختگی سطحی، همچنین نیروهای سنگ زنی در سنگ زنی آلیاژ تیتانیوم کنترل و به حداقل میزان خود برسند. علاوه بر این جدیدترین روش‌های آماری متناسب با طبیعت فرآیند، تاثیرات هر یک از پارامترهای سنگ زنی (سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش) و همچنین، تعامل اثر آنها را بر روی خروجی‌های زبری سطح، نیروی عمودی و نیروی مماسی مورد بررسی قرار داده و بهترین سطح را برای آنها مشخص کرده است. این مقاله نشان می‌دهد استفاده از نیتروژن مایع به عنوان خنک کننده تاثیر مثبتی بر روی کاهش زبری سطح و نیروهای سنگ زنی دارد، همچنین باعث کاهش آسیب‌های سطحی قطعه کار شده و از اکسیداسیون سطح آلیاژ تیتانیوم هنگام سنگ زنی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این هر یک از پارامترهای سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش بر روی خروجی‌های مورد مطالعه، موثر می‌باشد و به طور مثال افزایش سرعت برشی، باعث افزایش زبری سطح و کاهش نیروهای سنگ زنی می‌شود، همچنین افزایش عمق برش، افزایش زبری سطح و نیروها را در پی دارد.

واژه‌های کلیدی: سنگ زنی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V)، خنک کاری فوق سرد، نیتروژن مایع، طراحی آزمایش‌ها

A Study of Cryogenic Cooling Effects on Grinding Titanium Alloy

M. Nassajpour Esfahani and M. Ghoreishi

Mechanical Engineering Department

K.N. Toosi University of Technology

(Received: 16/March/2015; Accepted: 11/September/2015)

ABSTRACT

In this paper try with use of cryogenic cooling by liquid nitrogen damage such as surface roughness, micro cracks, surface oxidation and burns, as well as control the grinding force in grinding titanium alloy to get their minimum. In addition to the latest statistical techniques appropriate to the nature and effect of each of the grinding parameters (cutting speed, work speed and depth of cut) and the interaction effect of surface roughness on the output power of vertical and tangential force put to their optimal levels has identified. This paper demonstrates the use of liquid nitrogen as a coolant has a positive effect on reducing surface roughness and grinding forces, the surface also reduces the damages of the work piece and the titanium alloy surface oxidation during grinding to prevent. In addition, each of the parameters including, cutting speed, work speed and depth of the outputs of the paper, to be effective, for example by increasing shear rate increases the surface roughness and grinding forces are reduced, as well as increased depth of cut increases the surface roughness and forces.

Keywords: Grinding Titanium Alloy (Ti-6Al-4V), Cryogenic Cooling, Liquid Nitrogen, Design of Experiment

۱- کارشناس ارشد: mnasajpur@mail.kntu.ac.ir

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): ghoreishi@kntu.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

a_e	عمق برش (mm)
C	چگالی ذرات ساینده فعال
d_e	قطر چرخ سنگ (mm)
h_{cu}	ضخامت براده تغییر شکل نیافته (mm)
P	احتمال مهم نبودن
r	فاکتور شکل ذرات ساینده
S	مربعات
Sq	مجموع مربعات
V_s	سرعت برشی (m/s)
V_w	سرعت پیشروی (سرعت قطعه کار) (m/s)
علائم یونانی	
α	معیار مهم نبودن پارامتر

۱- مقدمه

به طور کلی تاثیر گرمای تولیدشده در طی فرآیند سنگ زنی بر کیفیت قطعه کار، حیاتی است. علت تولید گرما، اصطکاک نسبتا بالا به هنگام سنگ زنی است. سیال برشی علاوه بر کاهش اصطکاک قسمتی از حرارت تولیدشده را نیز منتقل و دفع می کند، در نتیجه حرارت کمتری تولید شده و سهم قطعه کار نیز از این حرارت تولیدی کاهش می یابد. هرچه این سیال خنک تر باشد بازدهی آن در انتقال حرارت بیشتر خواهد بود [۱].

مشکلات در سنگ زنی آلیاژ تیتانیوم تا حد زیادی به درجه حرارت بالای تولیدشده نسبت داده می شود، این موضوع به دلیل قابلیت انتقال حرارت پایین تیتانیوم است، که منجر به پایداری گرمای ناشی از براده برداری در منطقه سنگ زنی می شود. سطح سنگ خورده فعال آلیاژ تیتانیوم تمایل به واکنش با اکسیژن هوا و اکسیداسیون دارد که درجه حرارت بالای گفته شده این امر را تشدید می کند. تحقیقات نشان می دهد برای رسیدن به شرایط مطلوب سنگ زنی نیاز به شرایط ویژه از جمله کاهش سرعت برشی چرخ سنگ می باشد، تحقیقاتی نیز بر روی نوع چرخ سنگ و سرعت دورانی آن، مایع خنک کننده، عمق برش و سرعت پیشروی صورت گرفته است [۲]. یکی دیگر از مشکلات در سنگ زنی آلیاژ تیتانیوم رسوب گیری مجدد است. رسوب گیری مجدد، فرآیندی است که براده ها پس از برداشت از قطعه کار به دلیل گرمای زیاد منطقه سنگ زنی، مجدداً به سطح قطعه کار جوش خورده که سبب خرابی سطح می شوند، همچنین این گرما تنش های پسماند کششی در لایه های سطح ایجاد می کند

که منجر به میکروتَرَک های سطحی شده، در نتیجه عمر خستگی قطعه کار را کاهش می دهند. تورلی^۱ با مقایسه پارامترهای مختلف در سنگ زنی پیشنهاداتی برای کاهش این اثرات ارائه کرده است که می توان به استفاده از چرخ سنگ سیلیکون کاربید سبز و خنک کار سولفور کلر اشاره کرد [۲].

خنک کاری فوق سرد برای اولین بار در سال ۱۹۵۳ توسط بارتلی^۲ و همکاران توسط دی اکسید کربن^۳ مایع در ماشین کاری مورد استفاده قرار گرفته است [۳]. هولیس^۴ از دی اکسید کربن مایع به عنوان خنک کار در دمای حدود -78°C در ماشین کاری با سرعت بالای آلیاژ تیتانیوم استفاده کرده و افزایش طول عمر ابزار کاربیدی مورد استفاده را گزارش داده است [۴].

چاتوپادهی^۵ و همکاران از جت نیتروژن مایع به عنوان خنک کننده در ماشین کاری با سرعت بالای فولاد استفاده کردند که منجر به کاهش نیروهای برشی و بهبود زبری سطح شده است [۵].

یامایا^۶ و همکاران افزایش طول عمر ابزاری از جنس سرامیک آلومینا را در سرعت های بالای ماشین کاری، با استفاده از خنک کاری فوق سرد مشاهده کردند [۶]. استفاده از خنک کاری فوق سرد در فرآیند سنگ زنی به سال ۱۹۸۵ توسط چاتوپادهی و همکارانش برمی گردد، آنها برای سنگ زنی، ۴ نوع فولاد با سختی های مختلف، از سه روش خنک کاری، جت نیتروژن مایع، محلول در روغن و خشک استفاده و نتایج به دست آمده را با یکدیگر مقایسه کردند [۳]. دمای بالا در سنگ زنی باعث کاهش طول عمر چرخ سنگ و همچنین بازدهی فرآیند می شود، این مشکلات زمانی حادتر است که، قطعه کاری که از آن باربرداری صورت می گیرد از مواد سخت تشکیل شده و در بارگذاری های دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد که در این صورت استفاده از خنک کننده های فشرده ضروری است [۷]. استفاده از جت نیتروژن مایع به عنوان خنک کار، پیشرفت های قابل توجهی را در مکانیزم تشکیل براده و تولید براده های کوچک تر و همچنین، کاهش انرژی مخصوص سنگ زنی در مقایسه با دیگر خنک کننده ها از خود نشان می دهد [۷].

از جمله پارامترهای مهم در ارزیابی فرآیند سنگ زنی نیروها هستند، تحقیقات نشان می دهد خنک کاری فوق سرد تاثیر قابل

1- Turley
2- Bartley
3- CO₂
4- Hollis
5- Chattopadhyay
6- Yamaya

۲-۱- قطعه‌کار

آزمایش‌های سنگ‌زنی بر روی قطعاتی از جنس آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) در ابعاد $9 \times 15 \times 60$ میلی‌متر انجام شده است. آلیاژ تیتانیوم به‌علت داشتن نسبت استحکام به‌وزن بالا، مقاومت به‌خوردگی، مقاومت به‌خستگی و رشد ترک و دمای کاری بالا بدون خزش، به‌طور وسیعی در قسمت‌های مختلف هواپیما استفاده می‌شود. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی و در جدول ۲ خواص مکانیکی آلیاژ Ti-6Al-4V آمده است.

جدول (۱): ترکیب شیمیایی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V).

ماده	درصد وزنی
تیتانیوم (Ti)	۹۵/۶۲٪
آلومینیوم (Al)	۶/۱۳٪
وانادیوم (V)	۴/۰۳٪

جدول (۲): خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V).

خواصیت	Ti-6Al-4V
چگالی (g/cm^3)	۴/۴۶
مدول ویژه (GPa/Mg/cm^3)	۲۶
استحکام کششی (MPa)	۱۰۳۵
استحکام ویژه (MPa/g/cm^3)	۲۳۲
استحکام تسلیم (MPa)	۹۶۵
شکل‌پذیری (%)	۸
چقرمگی ($\text{MPa.m}^{1/2}$)	۴۴-۶۶
هدایت حرارتی (W/mK)	۷/۵
بیشینه دمای کاری ($^{\circ}\text{C}$)	۶۰۰

۲-۲- ماشین سنگ‌زنی و چرخ‌سنگ

برای سنگ‌زنی نمونه‌ها از دستگاه سنگ‌زنی رفت و برگشتی با میز مغناطیس، ساخت شرکت آلمانی میکرومات^۳، با سرعت دورانی 3000 rpm و توان 3 Kw و چرخ‌سنگی از جنس سیلیکون‌کاربید سبز استفاده شده است.

۲-۳- مخزن نیتروژن مایع

در زمانی که چرخ‌سنگ دستگاه شروع به حرکت می‌کند به‌دلیل سرعت دورانی بالا یک لایه هوایی اطراف آن تشکیل می‌شود، این لایه هوایی موجب می‌شود که خنک‌کار به‌طور کامل به

توجهی در کاهش نیروهای سنگ‌زنی در عمق برش بالا دارد. یکی از مشکلات در مورد خنک‌کننده‌ها در سنگ‌زنی، آلودگی‌های زیست محیطی و مشکلات تنفسی ایجاد شده برای کاربر دستگاه سنگ در هنگام استفاده از آن است، خنک‌کاری فوق‌سرد یک روش جدید برای کنترل دمای بالای منطقه سنگ‌زنی بدون آلودگی‌های زیست‌محیطی است [۸].

از دیگر مزایای خنک‌کاری فوق‌سرد در سنگ‌زنی باتوجه به کاهش قابل توجه دما، می‌توان به کاهش تنش‌های پسماند کششی، کاهش ترک‌های سطحی و همچنین بهبود زبری سطح اشاره کرد [۹-۱۰]. مانیماران^۱ و همکاران به‌بررسی اثرات تغییرات فشار جت نیتروژن مایع در سنگ‌زنی پرداختند، که افزایش فشار جت نیتروژن مایع باعث کاهش اصطکاک به‌دلیل کنترل بهتر دما و همچنین کاهش ریزش سنگ که بهبود زبری سطح را در پی دارد، می‌شود [۱۱]. علاوه‌بر این، آنها کاهش ۳۷ و ۱۳ درصدی نیروهای سنگ‌زنی در هنگام استفاده از نیتروژن مایع در مقایسه با شرایط خشک و تر و همچنین، بهبود ۵۹ و ۳۲ درصدی زبری سطح در مقایسه با شرایط گفته‌شده در سنگ‌زنی فولاد ضدزنگ ۳۱۶ را گزارش دادند [۱۲].

باتوجه به مشکلاتی که در سنگ‌زنی و ماشین‌کاری آلیاژهایی مانند آلیاژ تیتانیوم به‌علت فعال‌بودن و همچنین، پایین‌بودن هدایت حرارتی وجود دارد، در این مقاله از خنک‌کاری فوق‌سرد با استفاده از جت نیتروژن مایع برای بهبود قابلیت سنگ‌زنی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) استفاده شده است. همچنین، با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها^۲ تاثیرات پارامترهای سنگ‌زنی از جمله سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش و تامل اثرهای آنها بر روی خروجی‌ها بررسی و مقدار بهینه آنها مشخص شده است. علاوه‌بر این برای مقایسه تاثیرات نیتروژن مایع از خنک‌کار آب-صابون نیز استفاده و نتایج به‌دست‌آمده با یک‌دیگر مقایسه شده‌اند. همچنین، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی سطح قطعات مورد مطالعه قرار گرفته‌اند.

۲- تجهیزات و شرایط انجام آزمایش‌های تجربی

در این قسمت قطعه‌کار و تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌ها و همچنین، پارامترهای ثابت و متغیر موجود در فرآیند ارائه شده است.

1- Manimaran
2- Design Of Experiment(DOE)

بهبتر نتایج با استفاده از تعامل اثر فاکتورها بر یکدیگر، روش آماری طراحی عاملی^۸ برای ۳ فاکتور در نظر گرفته شده است که هر کدام از این فاکتورها دو سطح دارند. هر آزمایش همراه با ۲ تکرار و همچنین، بلوک بندی روی تکرار انجام شده که مبنای بلوک بندی نوع خنک کار (نیترژن مایع بلوک ۱، محلول آب- صابون بلوک ۲) می باشد.

جدول (۳): فاکتورهای ثابت و متغیر و مقادیر آنها.

مقادیر	پارامترهای ثابت	مقادیر	پارامترهای متغیر
سیلیکون کاربید سبز	چرخ سنگ	۳۱/۴ و ۲۳/۵۵ متر بر ثانیه	سرعت برشی
تک نقطه ای	روش تراش چرخ سنگ	۰/۲ و ۰/۱ متر بر ثانیه	سرعت پیشروی
دستی	نوع پیشروی جهت تراش چرخ سنگ	۳۰ و ۵۰ میکرومتر	عمق برش
۳۰۰۰ دور بر دقیقه	سرعت محور دستگاه سنگ	نیترژن مایع، محلول آب- صابون	خنک کار

شکل ۱ نحوه اعمال نیترژن مایع هنگام انجام آزمایش سنگ زنی را نشان می دهد.



شکل (۱): سنگ زنی با استفاده از نیترژن مایع.

منطقه سنگ زنی نفوذ نکند به همین دلیل نیاز به نیترژن مایع تحت فشار می باشد [۹]. به همین منظور از مخزن تحت فشار نیترژن مایع که دارای فشار ۲/۵ بار می باشد، استفاده شده است. دمای بسیار پایین نیترژن مایع (-195°C) انتقال آن را با استفاده از لوله های معمولی غیر ممکن می سازد به همین دلیل از لوله های انعطاف پذیر از جنس فولاد ضد زنگ استفاده شده است.

۲-۴- اندازه گیری زبری سطح

زبری سطح قطعات توسط دستگاه زبری سنج شرکت ماهر^۱، مدل پرتومتر^۲ ساخت کشور آلمان، اندازه گیری شده است.

۲-۵- اندازه گیری نیرو

در فرآیند سنگ زنی دو نیروی عمودی و مماسی هنگام سنگ زنی به نمونه مورد آزمایش وارد می شود، در این پژوهش برای اندازه گیری نیرو از دستگاه دینامومتر شرکت کیستلر^۳، مدل 9257B ساخت کشور سوئیس استفاده شده است.

۲-۶- مورفولوژی سطح

برای مشاهده سطح قطعه و بررسی آسیب های سطحی قطعات از میکروسکوپ الکترونی^۴ شرکت تسکان^۵، مدل وگا^۶، ساخت کشور جمهوری چک استفاده شده که از قطعات مورد نظر در ۳ بزرگنمایی $500\times$ ، $800\times$ ، $1000\times$ عکس برداری و برای مشخص کردن عناصر موجود در سطح قطعه نیز از روش طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس^۷ بهره گرفته شده است.

۲-۷- پارامترهای فرآیند

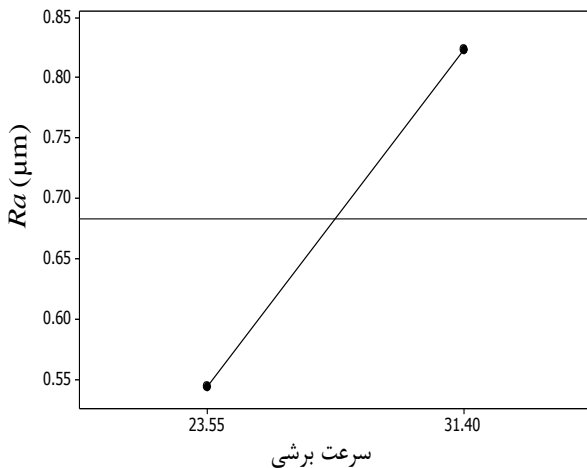
پارامترهای ثابت و متغیر در جدول ۳ ارائه شده است. این مقادیر با توجه به مطالعات صورت گرفته قبلی و همچنین بررسی نتایج به دست آمده از آزمایش های اولیه انتخاب شده اند.

۳- طراحی آزمایش ها و فرآیند

باتوجه به مطالعات صورت گرفته در مورد پارامترهای سنگ زنی و همچنین، امکانات موجود برای انجام آزمایش ها و نیز تحلیل

- 1- Mahr
- 2- Perthometer M2
- 3- KISTLER
- 4- SEM
- 5- TESCN
- 6- VEGA
- 7- EDX

می‌شود. در یکی از مطالعات صورت گرفته قبلی [۱۳] تاثیر سرعت برشی بر روی زبری سطح مورد مطالعه و سه سطح برای این پارامتر در نظر گرفته و این نتیجه حاصل شده است که، تاثیر سرعت برشی بر زبری سطح خطی نمی‌باشد و در ابتدا با افزایش سرعت برشی، زبری سطح افزایش می‌یابد، سپس روند کاهشی پیدا می‌کند، البته لازم به ذکر است این روند غیرخطی در نهایت منجر به افزایش زبری سطح می‌شود.



شکل (۳): تاثیر سرعت برشی بر زبری سطح.

۴-۱-۳- سرعت برشی × سرعت پیشروی

باتوجه به مقدار P در جدول ۵، تعامل اثر سرعت برشی و سرعت پیشروی به احتمال ۹۰/۷٪ مهم است. همان‌طور که در شکل ۴ دیده می‌شود، در شرایط کمینه سرعت برشی با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح کاهش می‌یابد ولی در شرایط بیشینه سرعت برشی با افزایش سرعت پیشروی، زبری سطح افزایش خواهد یافت.

اگر پارامتر سرعت پیشروی را به‌تنهایی مورد تحلیل قرار دهیم این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، براده‌برداری بیشتر می‌شود که این به معنی افزایش منطقه سایش برای ذرات ساینده است که منجر به شکستگی و کنده‌شدن بیشتر آنها می‌شود، نتیجه این سایش چرخ‌سنگ، یک سطح با زبری سطح بیشتر است. در شرایط بیشینه سرعت برشی با افزایش سرعت پیشروی تاثیرات هر یک از این دو عامل به‌تنهایی، که در بالا اشاره شد بر یک‌دیگر اثر گذاشته و موجب خرابی بیشتر سطح می‌گردد که نتیجه آن افزایش زبری سطح است.

علت را می‌توان بدین صورت تشریح نمود که مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بر زبری سطح، تیزی دانه‌های ساینده و لبه‌های برنده می‌باشد و هرچه تیزی این لبه‌ها بیشتر باشد، سطح زبرتری به‌دست خواهد آمد. نیتروژن مایع باعث کاهش دمای منطقه سنگ‌زنی می‌شود و این کاهش دما موجب افزایش سختی سطحی قطعه کار شده که این سختی نیروهای وارده به چرخ‌سنگ را کاهش می‌دهد. کاهش نیرو منجر به کاهش نرخ شکسته‌شدن دانه‌ها و تولید لبه‌های جدید می‌شود، همچنین این افزایش سختی سطحی، موجب کاهش چسبندگی براده‌ها به چرخ‌سنگ شده در نتیجه چرخ‌سنگ صاف‌تری خواهیم داشت که سطحی با زبری کم‌تر در پی دارد. یکی دیگر از عوامل زبری سطح، جوش خوردن براده‌های برداشته شده از قطعه کار به سطح قطعه است که به دلیل افزایش دما صورت می‌گیرد، در نتیجه، استفاده از نیتروژن مایع که منجر به کاهش دمای منطقه سنگ‌زنی می‌شود از این امر جلوگیری کرده و باعث بهبود زبری سطح می‌شود.

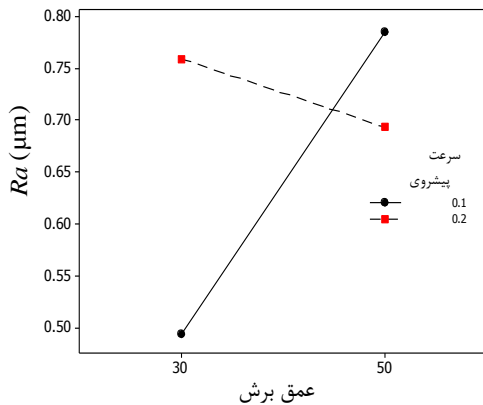
۴-۱-۲- سرعت برشی

باتوجه به مقدار P در جدول ۵، سرعت برشی به احتمال ۹۷/۸٪ مهم است، همان‌طور که در شکل ۳ مشخص می‌باشد، افزایش سرعت برشی موجب افزایش زبری سطح می‌شود.

تغییرات در سرعت برشی باتوجه به ثابت‌بودن سرعت دورانی محور دستگاه سنگ از جمله مشکلات محققین است و اکثر آنها از بررسی تغییرات این پارامتر صرف‌نظر می‌کنند، ولی در این مقاله با استفاده از دو چرخ‌سنگ با قطرهای متفاوت (۱۵۰ و ۲۰۰ میلی‌متر) نتایج در دو سرعت برشی مورد مطالعه قرار گرفته است. یک باور غلط در مورد سرعت برشی وجود دارد که با افزایش سرعت برشی زبری سطح بهبود می‌یابد، ولی در این مقاله این نتیجه حاصل شده است که با افزایش سرعت برشی زبری سطح به‌صورت مطلق بهبود نمی‌یابد و همان‌طور که در شکل ۲ مشخص می‌باشد، با افزایش سرعت برشی زبری سطح افزایش یافته است.

علت را این‌گونه می‌توان توضیح داد که با افزایش سرعت برشی دمای منطقه سنگ‌زنی افزایش یافته که این امر موجب افزایش زبری سطح می‌شود، همچنین این افزایش سرعت، لایه هوایی ایجاد شده اطراف چرخ‌سنگ را گسترش داده و مقاومت آن در برابر نفوذ مایع خنک‌کار بیشتر می‌شود، در نتیجه فقدان مایع خنک‌کار خود موجب افزایش دما و خرابی زبری سطح

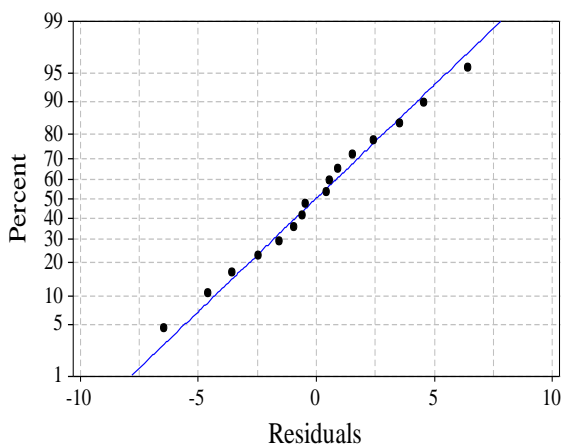
موضوع، کاهش دمای منطقه سنگ زنی را در پی دارد که در نهایت باعث کاهش زبری سطح می شود.



شکل (۵): تعامل اثر سرعت پیشروی و عمق برش بر زبری سطح.

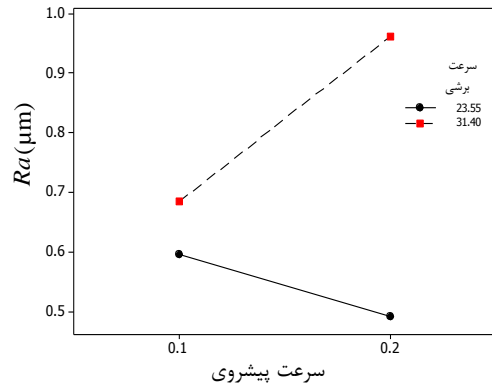
۴-۲- نیروی عمودی

پس از جمع آوری اطلاعات مربوطه به این پارامتر خروجی، آنالیز واریانس انجام گردیده و نتایج تحلیل با $\alpha = 0.15$ در جدول ۶ آمده است. در شکل ۶، نمودار توزیع نرمال باقی مانده نیروی عمودی آمده است که با توجه به این که نقاط برازش شده به صورت تصادفی و نزدیک به خط مایل پراکنده شده اند می توان به نرمال بودن توزیع داده ها و همچنین، نبود خطای سیستمی پی برد.



شکل (۶): نمودار توزیع نرمال باقی مانده نیروی عمودی.

مطابق با جدول ۶ عوامل زیر با احتمال بیش از ۸۵٪ بر نیروی عمودی اثرگذار هستند:



شکل (۴): تعامل اثر سرعت برشی و سرعت پیشروی بر زبری سطح.

علت کاهش که زبری سطح در شرایط کمینه سرعت برشی با افزایش سرعت پیشروی دارد را می توان این گونه توجیه کرد که این افزایش سرعت پیشروی به شکست لایه هوایی توسط مایع خنک کار کمک کرده، این افزایش حجم مایع خنک کار در منطقه سنگ زنی موجب بهبود نسبی زبری سطح می شود. لازم به ذکر است در شرایط بیشینه سرعت برشی در هر دو سطح سرعت پیشروی، زبری سطح بیش تر است که این نتیجه با تاثیر سرعت برشی به تنهایی، مطابقت دارد.

۴-۱-۴- سرعت پیشروی × عمق برش

باتوجه به مقدار P در جدول ۵، تعامل اثر سرعت پیشروی و عمق برش به احتمال ۸۸٪ مهم است. همان طور که در شکل ۵ دیده می شود در شرایط کمینه سرعت پیشروی با افزایش عمق برش، زبری سطح افزایش می یابد ولی در شرایط بیشینه سرعت پیشروی افزایش عمق برش باعث کاهش زبری سطح می شود. در شرایط کمینه سرعت پیشروی تاثیر عمق برش بر زبری سطح به مراتب بیش تر است. با افزایش عمق برش رسیدن مایع خنک کننده به منطقه سنگ زنی دچار مشکل شده که این فقدان مایع خنک کننده باعث افزایش نیروی اصطکاک شده که این امر موجب افزایش دما می شود. همان طور که قبلا اشاره شد افزایش دما خرابی سطح و افزایش زبری سطح را در پی دارد.

باتوجه به شکل ۵، در بیشینه عمق برش با افزایش سرعت پیشروی زبری سطح کمی بهبود می یابد، علت را این گونه می توان توضیح داد که علاوه بر این که افزایش سرعت پیشروی باعث شکست لایه هوایی اطراف چرخ سنگ می شود، موجب افزایش سرعت انتقال گرما به محیط اطراف شده که این دو

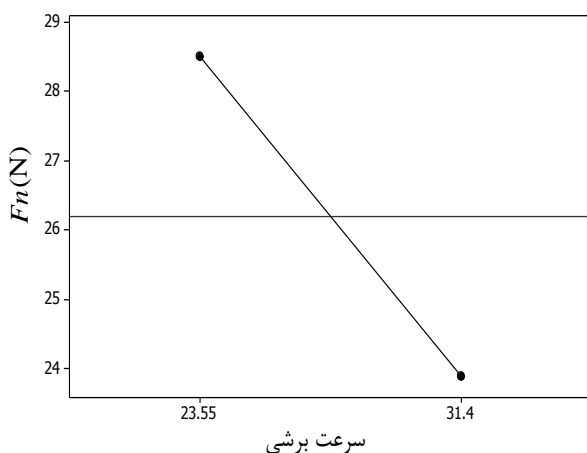
بلوک‌بندی، سرعت برشی، عمق برش، سرعت پیشروی \times عمق برش.

انعطاف‌پذیری قطعه کار شده که کاهش نیروی عمودی را در پی دارد.

۴-۲-۲- سرعت برشی

باتوجه به مقدار P به‌دست‌آمده از جدول آنالیز واریانس ۶، سرعت برشی به احتمال ۸۹٪ مهم است. همان‌طور که در شکل ۷ مشخص می‌باشد با افزایش سرعت برشی نیروی عمودی کاهش می‌یابد. علت این کاهش نیرو را می‌توان باتوجه به رابطه (۱) که ارتباط بین ضخامت براده و پارامترهای سنگ‌زنی را مشخص می‌کند [۱۴]، این‌گونه توضیح داد که با افزایش سرعت برشی ضخامت براده ایجادشده کاهش پیدا می‌کند که این امر موجب کاهش بار اعمال‌شده به ذرات ساینده می‌شود که نتیجه آن کاهش نیروهای سنگ‌زنی است.

$$h_{cu} = \sqrt{\frac{V_W}{V_S} \cdot \frac{1}{c.r} \cdot \sqrt{\frac{a_e}{d_e}}} \quad h_{cu} \ll a_e \quad (1)$$



شکل (۷): تاثیر سرعت برشی بر نیروی عمودی.

۴-۲-۳- عمق برش

باتوجه به مقدار P به‌دست‌آمده از آنالیز واریانس، عمق برش به احتمال ۹۹٪ مهم می‌باشد. شکل ۸ نشان می‌دهد با افزایش عمق برش نیروی عمودی افزایش می‌یابد. فقدان مایع خنک‌کننده در اثر افزایش عمق برش، منجر به شکستگی زودرس، کندشدن ذرات ساینده و جریان جانبی از قطعه کار به ذرات ساینده می‌شود، همچنین، افزایش عمق

جدول (۶): نتایج آنالیز واریانس نیروی عمودی.

عبارت	P-Value
بلوک‌بندی	۰/۰۲۳
سرعت برشی	۰/۱۰۲
سرعت پیشروی	۰/۹۶۱
عمق برش	۰/۰۰۳
سرعت برشی \times سرعت پیشروی	۰/۶۶۱
سرعت برشی \times عمق برش	۰/۷۳۳
سرعت پیشروی \times عمق برش	۰/۰۵۶
سرعت برشی \times سرعت پیشروی \times عمق برش	۰/۳۶۶
R-Sq=۸۷/۷۴%	
R-Sq(adj)=۶۷/۳۰%	
S=۴/۹۱۹	

۴-۲-۴- بلوک‌بندی

باتوجه به جدول آنالیز واریانس ۶، بلوک‌بندی به احتمال ۹۸٪ مهم می‌باشد و این به دین مفهوم است که استفاده از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کار تاثیر زیادی بر کاهش نیروی عمودی در سنگ‌زنی دارد. از جمله منابع ایجاد نیرو در سنگ‌زنی می‌توان به عمل برشی انجام‌شده بر روی قطعه کار توسط ذرات ساینده، شخم اولیه، شخم ثانویه، میکروشکست‌ها در قطعه کار و اصطکاک بین براده‌ها و سطح قطعه کار اشاره کرد. نیروهای سنگ‌زنی اساساً وابسته به عمل برش ذرات ساینده چرخ‌سنگ بر روی قطعه کار هستند، به‌همین دلیل تیزی و شکنندگی ذرات ساینده تاثیر مستقیمی بر روی آن‌ها دارد. توسعه دما در منطقه سنگ‌زنی باعث کاهش خاصیت مکانیکی قطعه‌کار و ذرات ساینده‌شده که این امر موجب کندشدن ذرات ساینده می‌شود، این کندشدن و شکست مکرر آنها نیروها را افزایش می‌دهد.

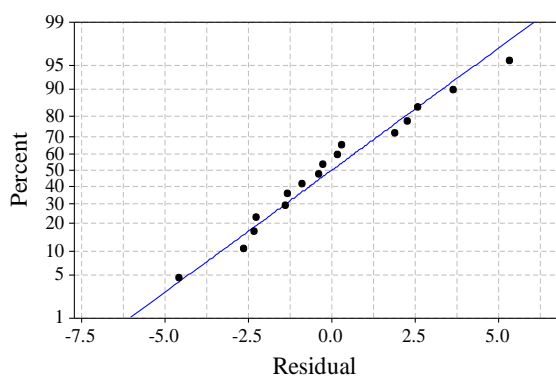
نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده در مقایسه با دیگر خنک‌کننده‌ها راحت‌تر به منطقه سنگ‌زنی نفوذ کرده که این امر موجب کنترل و کاهش بهتر دمای این منطقه می‌شود، درنتیجه اثرات افزایش دما که در فوق ذکر شد را به‌شدت کاهش داده و موجب کاهش نیروی عمودی می‌شود، همچنین دمای بسیار پایین نیتروژن مایع، موجب کاهش خاصیت

۴-۳- نیروی مماسی

پس از جمع‌آوری اطلاعات مربوط به این پارامتر خروجی، آنالیز واریانس انجام گردیده و نتایج تحلیل با $\alpha = 0.15$ در جدول ۷ آمده است. در شکل ۱۰، نمودار توزیع نرمال باقی‌مانده نیروی مماسی آمده است که باتوجه به این که نقاط برازش شده به صورت تصادفی و نزدیک به خط مایل پراکنده شده‌اند می‌توان به نرمال بودن توزیع داده‌ها و همچنین نبود خطای سیستمی پی برد.

مطابق با جدول ۷، عوامل زیر با احتمال بیش از ۸۵٪ بر نیروی مماسی اثرگذار هستند:

بلوک‌بندی، سرعت برشی، عمق برش، سرعت برشی × سرعت پیشروی، سرعت برشی × سرعت پیشروی × عمق برش.



شکل (۱۰): نمودار توزیع نرمال باقی‌مانده نیروی عمودی.

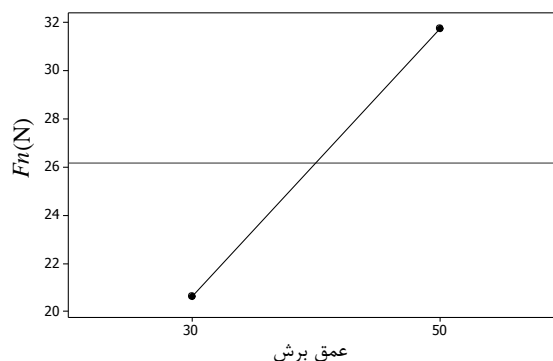
۴-۳-۱- بلوک‌بندی

باتوجه به جدول آنالیز واریانس ۷، بلوک‌بندی به احتمال ۹۵٪ مهم می‌باشد.

سنگ‌زنی فرآیندی شامل شکل‌گیری سریع براده‌هاست، به‌علت سرعت بالای فرآیند همچنین، کرنش‌های بزرگ ایجاد شده، فرآیند بدون اتلاف و کل انرژی به گرما تبدیل می‌شود. در نتیجه کنترل گرما در منطقه سنگ‌زنی بسیار مشکل و عامل مهمی در بهبود فرآیند از جمله کاهش نیروی مماسی می‌باشد. خنک‌کننده‌های معمولی اگرچه تاثیری بر روی فرآیند دارند ولی باتوجه به شکست و مشکلات آنها در رسیدن به منطقه سنگ‌زنی، مطلوب نمی‌باشند و نیتروژن مایع به‌مراتب کارآمدتر است.

علاوه بر این می‌توان به فعال بودن سطح تازه به‌دست‌آمده بعد از سنگ‌زنی و براده‌های تولیدشده اشاره کرد که دمای بالا،

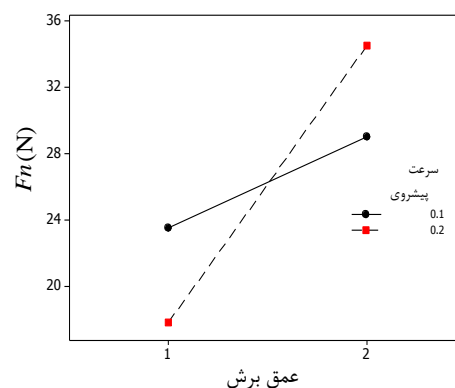
برش باتوجه به رابطه (۱) منجر به افزایش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، که افزایش نیروی عمودی را در پی دارد، می‌شود.



شکل (۸): تاثیر عمق برش بر نیروی عمودی.

۴-۲-۴- سرعت پیشروی × عمق برش

با توجه به جدول آنالیز واریانس ۶، تعامل اثر سرعت پیشروی و عمق برش به احتمال ۹۴٪ مهم می‌باشد.

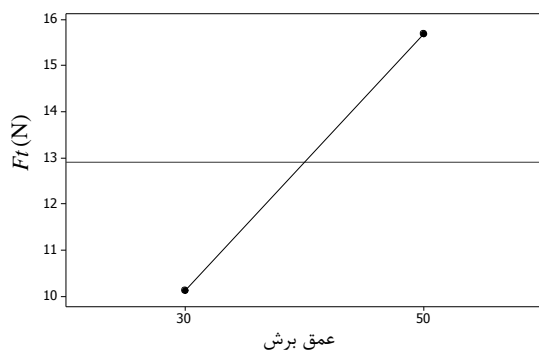


شکل (۹): تعامل اثر سرعت پیشروی و عمق برش بر نیروی عمودی.

همان‌طور که در شکل ۹ مشخص است، در عمق برش کمینه با افزایش سرعت پیشروی، نیروی عمودی کاهش می‌یابد ولی در عمق برش بیشینه با افزایش سرعت پیشروی، نیروی عمودی نیز افزایش می‌یابد. لازم به‌ذکر است در هر دو سطح سرعت پیشروی، با افزایش عمق برش نیروی عمودی نیز افزایش می‌یابد. اگر پارامتر سرعت پیشروی را به‌تنهایی مورد تحلیل قرار دهیم این نتیجه حاصل می‌شود که با افزایش سرعت پیشروی، منطقه تماس بین ذرات ساینده و قطعه کار بیش‌تر شده در نتیجه اصطکاک افزایش یافته که منجر به افزایش نیروی عمودی می‌شود.

مشخص می‌باشد، با افزایش عمق برش نیروی مماسی افزایش می‌یابد.

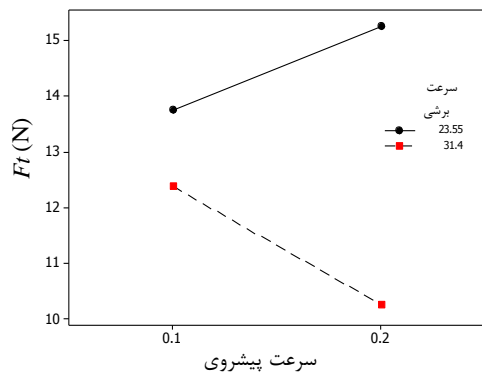
علت افزایش نیروی مماسی بر اثر زیاد شدن عمق برش را می‌توان این‌گونه توضیح داد، که افزایش عمق برش، موجب شکست خنک‌کننده و عدم رسیدن به ذرات ساییده و قطعه کار می‌شود که این امر، افزایش دمای منطقه سنگ‌زنی را در پی دارد، همان‌طور که گفته شد این افزایش دما باعث افزایش نیروی مماسی می‌شود. علاوه بر این می‌توان علل اشاره شده در مورد تاثیر عمق برش بر نیروی عمودی را نیز به نیروی مماسی تعمیم داد.



شکل (۱۲): تاثیر عمق برش بر نیروی مماسی.

۴-۳-۴- سرعت برشی × سرعت پیشروی

باتوجه به جدول آنالیز واریانس ۷، تعامل اثر سرعت برشی و سرعت پیشروی به احتمال ۸۵٪ مهم می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۱۳ مشخص است در سرعت برشی کمینه با افزایش سرعت پیشروی نیروی مماسی افزایش می‌یابد ولی در سرعت برشی بیشینه با افزایش سرعت پیشروی نیروی مماسی کاهش می‌یابد.



شکل (۱۳): تعامل اثر سرعت برشی و سرعت پیشروی بر نیروی مماسی.

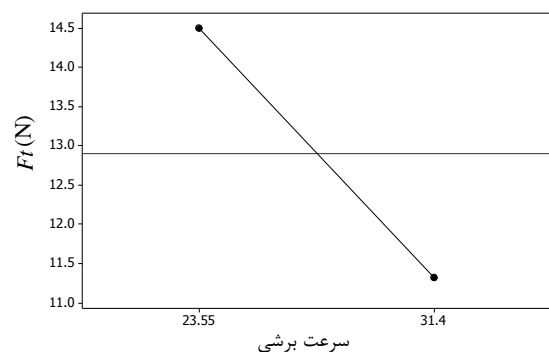
موجب تشدید چسبندگی براده‌ها به چرخ‌سنگ می‌شود، این امر موجب افزایش نیروی مماسی می‌شود. همچنین، می‌توان از دلایل این تاثیرگذاری مهم، استفاده از نیتروژن مایع به عنوان خنک‌کننده در کاهش نیروی مماسی، به همان موارد عنوان شده در مورد نیروی عمودی نیز، اشاره کرد.

جدول (۷): نتایج آنالیز واریانس نیروی مماسی.

P-Value	عبارت
۰/۰۵۲	بلوک‌بندی
۰/۰۲۳	سرعت برشی
۰/۷۸۴	سرعت پیشروی
۰/۰۰۱	عمق برش
۰/۱۴۲	سرعت برشی × سرعت پیشروی
۰/۷۰۲	سرعت برشی × عمق برش
۰/۱۶۷	سرعت پیشروی × عمق برش
۰/۱۴۲	سرعت برشی × سرعت پیشروی × عمق برش
S=۲/۹۱ R-Sq=۸۷/۲۳% R-Sq(adj)=۷۲/۶۳%	

۴-۳-۲- سرعت برشی

باتوجه به مقدار P به دست آمده از جدول آنالیز واریانس ۷، سرعت برشی به احتمال ۹۸٪ مهم است. همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص می‌باشد، با افزایش سرعت برشی نیروی مماسی کاهش می‌یابد. علت این کاهش نیرو نیز کم شدن ضخامت براده ایجاد شده و کاهش بار وارده به ذرات چرخ‌سنگ است.



شکل (۱۱): تاثیر سرعت برشی بر نیروی مماسی.

۴-۳-۳- عمق برش

باتوجه به مقدار P به دست آمده از جدول آنالیز واریانس ۷، عمق برش به احتمال ۹۹٪ مهم است. همان‌طور که در شکل ۱۲

بنابراین می‌توان نتیجه گرفت، در سنگ‌زنی به‌کمک نیتروژن مایع سطح قطعه اکسید نشده، ولی در قطعه سنگ‌زنی‌شده با محلول آب-صابون سطح قطعه اکسید شده است.

علت را می‌توان بدین‌صورت تشریح نمود که باتوجه به این‌که آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) فعال بوده و همچنین هدایت حرارتی کمی دارد، هنگامی‌که از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کار استفاده می‌شود، دمای ناحیه سنگ‌زنی به‌شدت کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه اکسیداسیون سطح صورت نمی‌گیرد.

جدول (۱۰): درصد عناصر موجود در قطعه سنگ‌زنی‌شده با محلول آب-صابون.

عنصر	درصد وزنی %
تیتانیوم	۱۰۳/۰۹
آلومینیوم	۶/۲۲
وانادیوم	۴/۵۷
اکسیژن	۱/۹۱
نیتروژن	۸/۲۲
مجموع	۱۲۴/۰

علاوه‌بر این می‌توان به خاصیت ضد اکسیداسیون نیتروژن مایع، همچنین تغییر اتمسفر محیط سنگ‌زنی که باعث کاهش اکسیژن و احتمال واکنش آن با سطح فعال قطعه کار تیتانیومی می‌شود، اشاره کرد.

یکی از مشکلاتی که احتمال می‌رفت به‌وجود آید، نفوذ نیتروژن به سطح قطعه کار بود که باتوجه به مقایسه مقدار عنصر نیتروژن در سطح سه قطعه می‌توان نتیجه گرفت، نیتروژن به سطح قطعه سنگ‌زنی‌شده با نیتروژن مایع نفوذ نکرده است.

لازم به‌ذکر است مقدار نیتروژنی که در آنالیز سه قطعه مشاهده می‌شود مربوط به نیتروژن محیط آنالیز است، البته درون محفظه دستگاه میکروسکوپ الکترونی که برای آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس استفاده می‌شود تا حدودی خلاء بوده ولی این خلاء کامل نیست.

۴-۵- مورفولوژی سطح

هدف از ارائه تصاویر میکروسکوپ الکترونی، بررسی سطح قطعات و مشخص کردن عیوبی که ممکن است در هنگام سنگ‌زنی قطعات ایجاد شود است.

۴-۳-۵- سرعت برشی × سرعت پیشروی × عمق برش
باتوجه به جدول آنالیز واریانس ۷، تعامل اثر سه‌تایی سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش به احتمال ۸۵٪ مهم می‌باشد.

۴-۴- عناصر موجود در سطح

یکی از مشکلات موجود در سنگ‌زنی آلیاژ تیتانیوم واکنش سطح آن با اکسیژن هوا و اکسیدشدن آن است، از جمله دلایل استفاده از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کار کاهش اکسیداسیون سطحی قطعه‌کار است. در جدول ۱۰-۸ آنالیز عناصر موجود در سطح قطعه خام اولیه، قطعه سنگ‌زنی‌شده با نیتروژن مایع و قطعه سنگ‌زنی‌شده با محلول آب-صابون که توسط آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس به‌دست‌آمده، ارائه شده است.

جدول (۸): درصد عناصر موجود در سطح قطعه خام اولیه.

عنصر	درصد وزنی %
تیتانیوم	۹۵/۶۲
آلومینیوم	۶/۱۳
وانادیوم	۴/۰۳
اکسیژن	۰/۰۱
نیتروژن	۵/۸۶
مجموع	۱۱۱/۷

جدول (۹): درصد عناصر موجود در قطعه سنگ‌زنی‌شده با نیتروژن مایع.

عنصر	درصد وزنی %
تیتانیوم	۹۴/۸۷
آلومینیوم	۶/۰۱
وانادیوم	۳/۳۷
اکسیژن	۰/۰۱
نیتروژن	۶/۹۹
مجموع	۱۱۱/۳

همان‌طور که در جدول ۹، مربوط به قطعه سنگ‌زنی‌شده با نیتروژن مایع، مشاهده می‌شود، درصد وزنی عنصر اکسیژن موجود در سطح ۰/۰۱٪ است که در مقایسه با جدول ۸، مربوط به قطعه خام اولیه، درصد یکسانی را نشان می‌دهد. ولی در جدول ۱۰، مربوط به قطعه سنگ‌زنی‌شده با محلول آب-صابون، درصد وزنی عنصر اکسیژن موجود در سطح ۱/۹۱٪ است.

آنالیز عکس‌های میکروسکوپ الکترونی سطح قطعه کار نشان می‌دهد، نیتروژن مایع باعث کاهش آسیب‌های سطحی از جمله، میکروتَرَک‌ها، کنده‌شدن قطعه کار از سطح، سوختگی سطحی و... می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

وجود تعامل اثر سرعت برشی، سرعت پیشروی و عمق برش بر یک‌دیگر چه در مورد زبری سطح و چه در مورد نیروهای عمودی و مماسی سبب گردیده تا پیش‌بینی رفتار فرآیند پیچیده شود و تنها با اعمال روش‌های آماری و طراحی آزمایش‌ها، به‌توان تا حدی اثر عوامل را بر خروجی‌ها بررسی نمود.

در مورد زبری سطح، بلوک‌بندی که باتوجه به نوع خنک‌کننده (نیتروژن مایع، محلول آب-صابون) مشخص شده بود، مهم‌ترین عامل تاثیرگذار بوده که می‌توان نتیجه گرفت نیتروژن مایع باعث بهبود زبری سطح می‌شود.

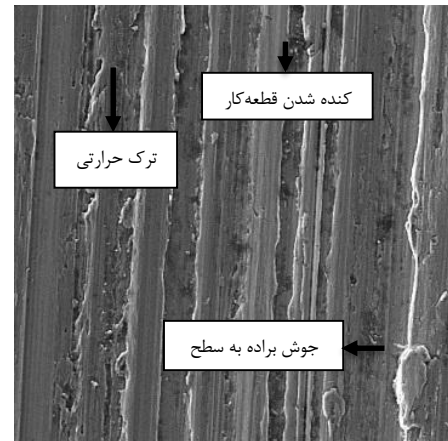
در مورد نیروی عمودی و مماسی، عمق برش و بلوک‌بندی مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بوده که باتوجه به مینای بلوک‌بندی می‌توان نتیجه گرفت، خنک‌کاری فوق‌سرد باعث کاهش نیروها در سنگ‌زنی شده که بهبود شرایط فرآیند را در پی دارد.

باتوجه به آنالیز طیف‌سنجی پراش انرژی پرتوایکس و تعیین عناصر موجود در سطح قطعه کار مشخص شد، استفاده از نیتروژن مایع به‌عنوان خنک‌کننده تاثیر به‌سزایی در کاهش اکسیداسیون سطح دارد، ضمن این‌که نیتروژن به سطح نفوذ نکرده و موجب تغییر در عناصر موجود در سطح نمی‌شود.

۷- مراجع

1. Malkin, S. "Theory and Application of Machining with Abrasives", Grinding Technology. Wiley. New York, 1989.
2. Turley, D.M. "Factors Affecting Surface Finish When Grinding Titanium and a Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)", Wear, Vol. 104, No. 4, pp. 323 - 335, 1985.
3. Chattopadhyay, A.B., Bose, A., and Chattopadhyay, A.K. "Improvements in Grinding Steels by Cryogenic Cooling", Precision Engineering, Vol. 7, No. 2, pp. 93-98, 1985.
4. Hollis, W.S. "The Application and Effect of Controlled Atmospheres in the Machining of Metals", Int. J. Mach. Tool Des. Res, Vol. 1, No. 1, pp. 59-78, 1961.
5. Chattopadhyay, A.B., Roy, T.K., and Hattacharyya, A.B. "Application of Cryogenics in Metal Cutting", J. Inst. Eng, 1972.

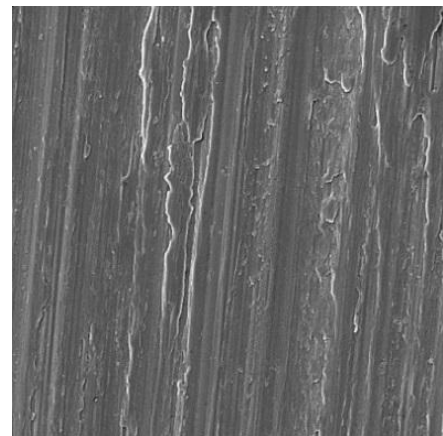
شکل‌های ۱۴-۱۵ که با بزرگ‌نمایی $1000\times$ تهیه شده، قطعات با پارامترهای سنگ‌زنی یکسان و مایع خنک‌کننده متفاوت را نشان می‌دهد، همان‌طور که مشخص می‌باشد، نیتروژن مایع باعث کاهش آسیب‌های سطحی می‌شود.



شکل (۱۴): سطح قطعه کار، خنک‌کار: محلول آب-صابون.

بررسی شکل‌های میکروسکوپ الکترونی از سطح قطعات سنگ‌زنی شده نشان می‌دهد، سطوح قطعاتی که با استفاده از محلول آب-صابون سنگ‌زنی شده‌اند، به‌مراتب عیوب بیشتری در مقایسه با سطوح قطعات سنگ خورده با استفاده از نیتروژن مایع دارند.

از جمله عیوبی که در قطعات سنگ‌خورده با استفاده از محلول آب-صابون بیشتر ایجاد می‌شود، کنده‌شدن ذرات قطعه از سطح، به‌جای براده‌برداری و ترک‌های سطحی است. علت را این‌گونه می‌توان توضیح داد که نیتروژن مایع به‌دلیل کاهش شدید دمای منطقه سنگ‌زنی آسیب‌های سطحی را به‌مراتب کاهش داده و موجب بهبود کیفیت سطح می‌شود.



شکل (۱۵): سطح قطعه کار، خنک‌کار: نیتروژن مایع.

6. Yamaya, S., Shibuki, K., and Anasai, N. "Study of Alumina Ceramic Tools", *Yungaloy*, Vol. 19, No. 26, 1974.
7. Paul, S. and Chaitopadhyay, A.B. "A Study of Effects of Cryo-Cooling in Grinding", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 35, No. 1, pp. 109-117, 1995.
8. Paul, S. and Chaitopadhyay, A.B. "The Effect of Cryogenic Cooling on Grinding Forces", *Int. J. Math. Tools Manufact.* Vol. 36, No. 1, pp. 63-72, 1996.
9. Paul, S. and Chaitopadhyay, A.B. "Effects of Cryogenic Cooling by Liquid Nitrogen Jet on Forces, Temperature and Surface Residual Stresses in Grinding Steels", *Cryogenics*, Vol. 35, No. 8, pp. 515-523, 1995.
10. Paul, S. and Chaitopadhyay, A.B. "Determination and Control of Grinding Zone Temperature under Cryogenic Cooling", *Int. J. Mach. Tools Manufact.* Vol. 36, No. 4, pp. 491-501, 1996.
11. Manimaran, G. and Pradeepkumar, M. "Effect of Cryogenic Cooling and Sol-Gel Alumina Wheel on Grinding Performance of AISI 316 Stainless Steel", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 3, pp. 304-312, 2013.
12. Manimaran, G. and Pradeepkumar, M. "Influence of Cryogenic Cooling on the Surface Grinding of Stainless Steel 316", *Cryogenics*, Vol. 59, pp. 76-83, 2014.
13. Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H., Daneshi, A., Stockert, S., and Rasifard, A. "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, No. 12, pp. 924-932, 2009.
14. "Handbook of Machining Grinding with Wheels", 2007.