



تأثیر افزودن نانوذرات به سیال برشی در روان کاری کمینه حین سنگ‌زنی به کمک ارتعاشات فراصوت

محمد زارعی^۱، میرمجید مولائی^۲، جواد اکبری^{۳*}، محمدرضا موحدی^۴

۱- کارشناسی، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۴- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

* تهران، صندوق پستی ۹۵۶۷-۱۱۱۵۵، akbari@sharif.edu

چکیده

فرآیند سنگ‌زنی به دلیل حصول صافی سطح بالا از مهم‌ترین روش‌های ماشین‌کاری سستی محسوب می‌شود؛ اما انرژی مخصوص تراش زیاد و نیروهای بزرگ مورد نیاز برای براده‌برداری باعث بالا رفتن هزینه‌های سنگ‌زنی می‌شود. تا کنون تحقیقات فراوانی در مورد فرآیند سنگ‌زنی برای کاهش نیروهای سنگ‌زنی انجام شده است. سه روش نوین برای این کار عبارتند از: استفاده از نانوسیال، ارتعاشات فراصوت در حین فرآیند سنگ‌زنی و روان کاری کمینه. در این مقاله نتایج تجربی تغییرات نیروی عمودی، نیروی مماسی و نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی فرآیند سنگ‌زنی فولاد ای‌آی‌اس‌آی ۵۲۱۰۰ سخت‌کاری شده ناشی از استفاده هم‌زمان از هر سه روش بررسی شده است. ابتدا تأثیر افزودن نانوذرات اکسید آلومینیوم با ابعاد و درصد حجمی‌های مختلف به سیال سنگ‌زنی مورد بررسی قرار گرفته است. سپس مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از سه نانوذره اکسید آلومینیوم، نانولوله کربنی و گرافیت انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که افزایش درصد حجمی و ابعاد نانوذرات اکسید آلومینیوم افزوده شده به سیال پایه‌ی روان کاری کمینه باعث کاهش بیش‌تر نیروها می‌شود. همچنین افزودن نانولوله کربنی به سیال سنگ‌زنی تأثیر محسوس بر نیروها ندارد، درحالی‌که، نانوذرات گرافیت بهتر از نانو ذرات اکسید آلومینیوم عمل می‌کنند. همچنین حضور ارتعاشات فراصوت باعث کاهش بیش‌تر نیروهای سنگ‌زنی و افزایش نسبت نیروها می‌شود.

کلید واژگان: سنگ‌زنی، ارتعاشات فراصوت، نانوسیال، روان کاری کمینه

Nanoparticles in minimum quantity lubrication (MQL) cutting fluid for ultrasonic-assisted grinding (UAG)

Mohammad zareei, MirMajid Molaie, Javad Akbari*, MohammadReza Movahhedy

Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 11155-9567, Tehran, Iran, akbari@sharif.edu

ABSTRACT

Grinding is one of the most interested conventional machining processes, due to its ability to achieve low surface roughness, but it costs much more than the most of the conventional machining processes because of high forces and specific machining energy needed for material removal. Up to now, many researches have investigated the grinding process to reduce grinding forces. Three recent methods for force reduction are incorporation of nano-fluid, ultrasonic-assisted grinding and minimum quantity lubrication. In this article, empirical results of simultaneous use of these methods on tangential, normal forces and tangential force to normal force ratio are investigated during grinding of AISI52100 hardened steel. First, the effect of adding aluminum oxide nanoparticles is investigated in different sizes and concentrations to base fluid. Then, the corresponding results of different nanoparticles (aluminum oxide, multi-walled carbon nano-tube, and graphite) are compared to each other. It's shown that increment of nanoparticles' size and concentration in base fluid causes more decrement of ultrasonic-assisted grinding forces. Adding MWCNTs to the base fluid doesn't have any significant effect on grinding forces while graphite nanoparticles reduce grinding forces more than aluminum oxide nanoparticles. Also, the presence of ultrasonic vibration causes the decrement of grinding forces and increment of force ratio during grinding.

Keywords: Grinding, Minimum Quantity Lubrication (MQL), Nano-Fluid, Ultrasonic Vibrations.

۱- مقدمه

اندازه-اندازه‌ی براده‌ی بسیار کوچک- انرژی مورد نیاز برای برداشت حجم واحد ماده بسیار زیاد است [۲].

سنگ‌زنی به کمک ارتعاشات فراصوت با دامنه‌ی کم یک روش مناسب برای افزایش میزان درگیری دانه‌ها با قطعه‌کار است که اولین اختراع ثبت شده در این باره متعلق به بالاموث به سال ۱۹۴۵ باز می‌گردد [۳]. در نتایج گزارش شده توسط بادوری و همکاران [۴] که تأثیر ارتعاشات فراصوت بر سنگ‌زنی سوپرآلیاژهای پایه نیکل بررسی شده است، آمده است که افزودن ارتعاشات

در حین فرآیند سنگ‌زنی، تنها تعداد بسیار کمی از دانه‌های چرخ سنگ‌زنی که با قطعه‌کار در تماس هستند به‌طور فعال نقش براده‌برداری ایفا می‌کنند، در حالی که باقی آن‌ها بدون انجام براده‌برداری، فقط روی سطح تماس چرخ سنگ‌زنی با قطعه‌کار کشیده شده و ایجاد حرارت می‌کنند [۱]. همچنین به دلیل زوایای براده‌ی بسیار منفی، بزرگ‌تر بودن ابعاد ناحیه‌ی ساییده شده در دانه‌های فعال نسبت به ابعاد مشابه در قلم‌های تک‌لبه‌ای و نیز به دلیل اثر

Please cite this article using:

M. zareei, M.M. Molaie, J. Akbari, M.R. Movahhedy, Nanoparticles in Minimum Quantity Lubrication (MQL) Cutting Fluid for Ultrasonic-Assisted Grinding (UAG), *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 306-310, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

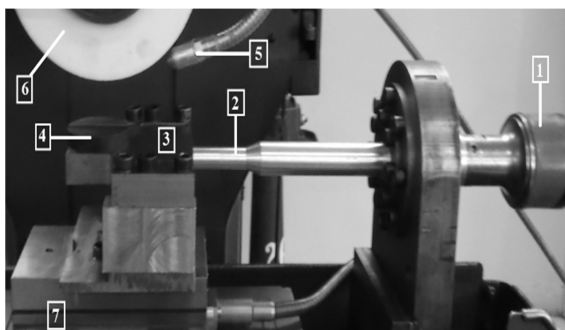
هورن و تقویت کننده، از آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵^۹ و برای سازه‌ی قابل انعطاف از آلیاژ معمولی فولاد استفاده شده است.

۲-۲- شرایط ماشین کاری و تجهیزات اندازه گیری

آزمایش های سنگ زنی به صورت تخت و با استفاده از ماشین جونز شپمن^{۱۰} مدل ۶۹۵۶۹ انجام شده است. پارامترهای سنگ زنی در جدول ۱ آورده شده اند. نیروهای سنگ زنی توسط نیروسنج سه مؤلفه ای کیستلر مدل بی ۹۲۵۷^{۱۱} و توسط نرم افزار داینور^{۱۲} تحلیل شده اند. برای به دست آوردن شرایط مشابه برای همه ی آزمایش ها، چرخ سنگ زنی قبل از هر آزمایش درس^{۱۳} شد. شرایط درس در جدول ۱ آورده شده است. برای بهینه کردن مشخصه های روان کاری کمینه آزمایش هایی از قبل انجام شد و بهترین مقادیر پارامترها برای انجام آزمایش های اصلی انتخاب شدند که در جدول ۱ آورده شده اند.

۲-۳- تهیه ی نانوسیال و مشخصات نانوذرات معلق در سیال

برای تهیه ی نانوسیال، از روش دو مرحله ای استفاده شد. یعنی؛ ابتدا نانوذرات



شکل ۱ سیستم مولد ارتعاشات فراصوت: ۱. مبدل ارتعاشات ۲. انتقال دهنده و تقویت کننده ی ارتعاشات ۳. سازه ی قابل انعطاف ۴. قطعه کار ۵. نازل روان کاری کمینه ۶. چرخ سنگ زنی ۷. نیروسنج

جدول ۱ شرایط سنگ زنی و پارامترهای روان کاری کمینه

چرخ سنگ	نورتون ۵۵ جی ۴۶-جی وی اس ۱۵×۱۷۷ ^{۱۴}
سرعت برشی	۳۵ متر بر ثانیه
سرعت پیش روی	۵ متر بر ثانیه
عمق برش	۱۵ میکرومتر
سیال غوطه وری	آب صابون ۵ درصد حجمی
دبی سیال غوطه وری	۲/۵ لیتر بر دقیقه
دبی سیال برشی روان کاری کمینه	۳۰۰ میلی لیتر بر ساعت
فشار هوای سیستم روان کاری کمینه	۳ بار
زاویه ی نازل	۲۰ درجه نسبت به افق
جنس قطعه کار	فولاد ای آی اس آی ۱۵۲۱۰۰ سخت کاری شده با سختی ۵۵±۵۵ راکول سی
درس	الماس تک نقطه ای
عمق درسینگ	۴۰ میکرومتر
سرعت درسینگ	۴۰ متر بر ثانیه

فراصوتی سبب ۲۳٪ کاهش نیروی عمودی و ۴۵٪ کاهش نیروی مماسی شده است. همچنین اکبری و همکاران در سنگ زنی سرامیک های مهندسی به کمک ارتعاشات فراصوت، کاهش چشم گیر مؤلفه های نیروی سنگ زنی را گزارش کرده اند [۵].

در روش های معمول روان کاری، به مقدار زیادی روان کار برای روان کاری مؤثر در فرآیند سنگ زنی نیاز است که با توجه به مخاطراتی که روان کارهای صنعتی برای محیط زیست و سلامتی دارند، تمایل روزافزونی به استفاده ی کمتر از آن ها وجود دارد [۶]. روان کاری کمینه روش جایگزین مناسبی برای دستیابی به خنک کاری مطلوب در فرآیند ماشین کاری است [۷-۱۰]. کارایی این روش در فرآیندهایی با تأثیر قابل توجه اصطکاک همچون سنگ زنی، نیازمند استفاده از سیال برشی با خاصیت روان کاری بالا برای تسهیل دستیابی به انتقال حرارت بالا و کاهش نیروها حین فرآیند، است.

پنگ و همکاران [۱۱] با بررسی فیزیک نانوروان کار^۱ نشان دادند که نانوذرات به راحتی می توانند در سطح تماس نفوذ کرده و باعث روان کاری الاستوهیدرودینامیک^۲ قابل توجهی شوند. تاکنون نانوذراتی مختلفی از جمله مولیبدن دی سولفید، سیلیکون دی اکسید، گرافیت، اکسید آلومینیوم، الماس، نانولوله ی کربنی و ... برای بهبود فرآیند ماشین کاری بررسی شده اند.

کارایی استفاده از روان کاری کمینه با نانوسیال^۳ و سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، در کاهش نیروهای سنگ زنی اثبات شده است، در حالی که استفاده ی هم زمان از هر دو روش بررسی دقیق قرار نشده است و تاکنون پژوهشی در این باره انجام شده است.

در این پژوهش به بررسی روان کاری کمینه با استفاده از نانوسیال حین فرآیند سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت پرداخته می شود، انتظار می رود اعمال هم زمان آن ها باعث کاهش هرچه بیش تر نیروها شود. ابتدا اثر اندازه و درصد حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم بر کارایی روان کاری مورد بررسی قرار می گیرند و سپس مقایسه ای بین سه نانوذره ی اکسید آلومینیوم، نانولوله ی کربنی و گرافیت انجام خواهد گرفت. در آزمایش ها ارتعاشات فراصوت نیز به صورت هم جهت با پیش روش قطعه کار اعمال شده است. نیروی مماسی، نیروی عمودی و نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی به عنوان پارامتر خروجی و معیار قضاوت عمل کرد فرآیند در نظر گرفته شده است.

۲- تجهیزات و روش آزمایش

۲-۱- سیستم ارتعاشات فراصوت

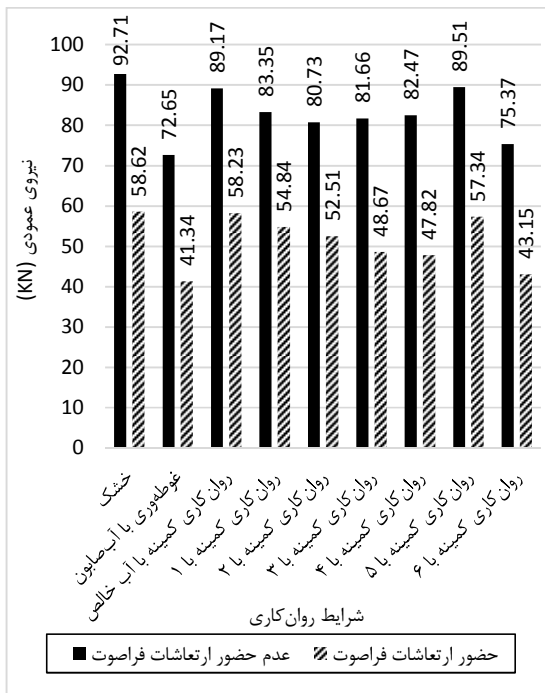
برای اعمال ارتعاشات با بسامد زیاد و دامنه ی کم به قطعه کار، یک تجهیز^۴، مطابق شکل ۱ طراحی شد که مبدل ارتعاشات^۵ برای تولید ارتعاشات با بسامد مشخص، هورن^۶ برای انتقال ارتعاشات، تقویت کننده ی^۷ ارتعاشات و سازه ی قابل انعطاف برای نصب قطعه کار روی آن، را شامل می شود.

آزمایش های سنگ زنی بدون حضور ارتعاشات فراصوت و در حضور ارتعاشات فراصوت انجام شده اند. ارتعاشات فراصوت توسط یک سیگنال ساز و مبدل ارتعاشات مدل مسترسونیک ام اس جی ۲۰۰۰^۸ با فرکانس ۲۱/۹ کیلوهرتز از فرکانس برق شهری (۵۰ هرتز) تولید و به قطعه کار اعمال شدند. برای ساخت

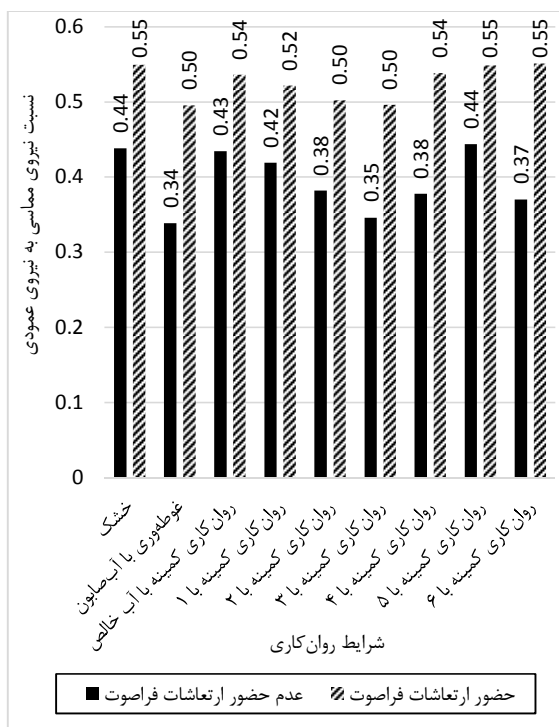
1. Nano lubricant
2. Elastohydrodynamic
3. Nano Fluid
4. Setup
5. Transducer
6. Horn
7. Booster
8. Mastersonic MSG 2000

۲- داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها

در شکل‌های ۲ تا ۴ به ترتیب نیروی مماسی، نیروی عمودی و نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی با افزودن نانوذرات مختلف به سیال برشی روان کاری کمینه بدون حضور ارتعاشات فراصوت و با حضور ارتعاشات فراصوت، نشان داده است.



شکل ۲ نیروی عمودی سنگ زنی در شرایط مختلف روان کاری

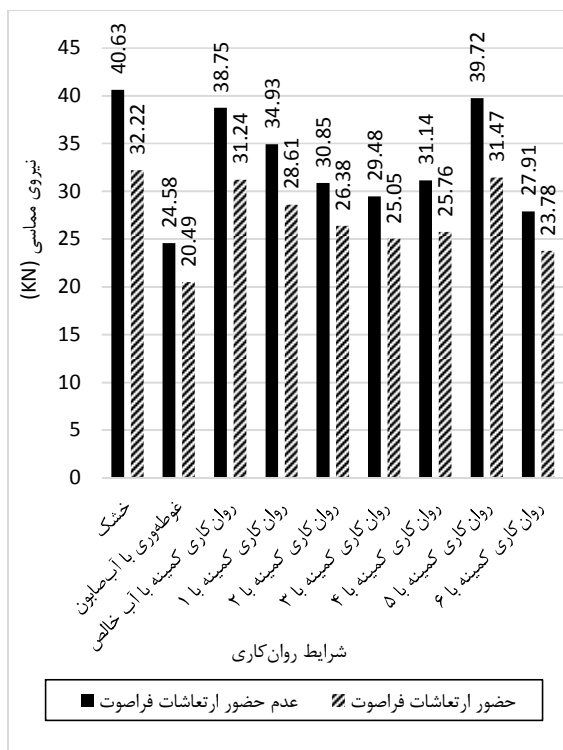


شکل ۴ نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی در شرایط مختلف سنگ زنی

تهیه شدند و سپس به سیال پایه^۱ افزود و پایدارسازی شدند. نانوذرات اکسید آلومینیوم بدون استفاده از سورفکتانت^۲ و صرفاً با استفاده از همزن فراصوت^۳ درون آب پایدار شدند. نانولوله‌های کربنی با استفاده از سدیم دودسیل سولفات^۴ به عنوان سورفکتانت و با استفاده از دستگاه حمام فراصوت^۵ درون آب پایدار شدند. نانوذرات گرافیت نیز با استفاده از سدیم دودسیل سولفات به عنوان سورفکتانت و با استفاده از دستگاه همزن فراصوت درون آب پایدار شدند. در جدول ۲، نوع، درصد حجمی و ابعاد نانوذرات استفاده شده در هر کدام از شرایط روان کاری کمینه آورده شده است. جزئیات چگونگی آماده سازی و سایر خصوصیات نانوذرات را می توان از [۱۲] استخراج نمود.

جدول ۲ مشخصات نانوذرات استفاده شده در هر شرایط مختلف روان کاری کمینه

شرایط روان کاری	نوع نانوذرات	درصد حجمی نانوذرات	ابعاد متوسط نانوذرات
۱	اکسید آلومینیوم	۱٪	۴۰ نانومتر
۲	اکسید آلومینیوم	۲/۵٪	۴۰ نانومتر
۳	اکسید آلومینیوم	۴٪	۴۰ نانومتر
۴	اکسید آلومینیوم	۲/۵٪	۱۳۰ نانومتر
قطر داخلی: ۱۵-۵ نانومتر			
۵	نانولوله ی کربنی	۱٪	قطر خارجی: ۸۰-۵۰ نانومتر
طول: ۲۰-۱۰ میکرومتر			
۶	گرافیت	۲/۵٪	۵۰ نانومتر



شکل ۲ نیروی مماسی سنگ زنی در شرایط مختلف روان کاری

1. Base Fluid
2. Surfactant
3. Ultrasonic Homogenizer Mixer
4. Sodium Dodecyl Sulfate (SDS or NaDS)- $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{11}\text{OSO}_3\text{Na}$
5. Ultrasonic Bath

۴- تأثیر ابعاد و درصد حجمی نانوذرات اکسید آلومینیوم

در این بخش نتایج حاصل از شرایط روان کاری کمینه با ۱ تا ۳ را با یکدیگر، و روان کاری کمینه با ۲ و ۴ را نیز با هم دیگر مقایسه خواهد شد.

۴-۱- تأثیر درصد حجمی نانوذرات

دیده می شود که در سنگ زنی سنتی^۱ و سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت با افزایش درصد حجمی نانوذرات از ۱/۱۰٪ به ۲/۵٪ و از ۲/۵٪ به ۴/۱۰٪، نیروهای سنگ زنی کاهش بیشتری می یابند (در سنگ زنی سنتی: ۱/۱۰٪، کاهش نیروی عمودی و ۱/۴۱۰٪ کاهش نیروی مماسی برای روان کاری کمینه با ۱، ۱۲/۹٪ کاهش نیروی عمودی و ۲۴/۱٪ کاهش نیروی مماسی برای روان کاری کمینه با ۲ و ۱۱/۹٪ کاهش نیروی عمودی و ۲۷/۴٪ کاهش نیروی مماسی برای روان کاری کمینه با ۳ - در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت: ۶/۴٪ کاهش نیروی عمودی و ۱۱/۲٪ کاهش نیروی مماسی برای روان کاری کمینه با ۱، ۱۰/۴٪ کاهش نیروی عمودی و ۱۸/۱٪ کاهش نیروی مماسی برای روان کاری کمینه با ۲ و ۱۷/۱۰٪ کاهش نیروی عمودی و ۲۲/۳٪ کاهش نیروی مماسی برای روان کاری کمینه با ۳). با دقت در شکل ۳ می بینیم که در سنگ زنی سنتی نیروی عمودی در روان کاری کمینه با ۳ کمی بیشتر از روان کاری کمینه با ۲ است که می تواند ناشی از خطاهای اندازه گیری باشد و چون این افزایش نیروی عمودی کمتر از ۱/۱۰٪ است، قابل صرف نظر است. صرف حضور ارتعاشات فراصوت نیز باعث ۳۶/۸٪ کاهش نیروی عمودی و ۲۰/۷٪ کاهش نیروی مماسی می شود.

نانوذرات معلق در سیال با نفوذ به ناحیهی تماس دانه های چرخ سنگ زنی با قطعه کار، افزایش لزجت و کاهش تماس مستقیم ساپنده با فلز شرایط روان کاری را بهبود می بخشد (۱۳، ۱۴) و هرچه نانوذرات بیشتری در سیال معلق باشند، به دلیل بهبود خواص انتقال حرارت و این که همانند بلبرینگ عمل می کنند، روان کاری بهتری مشاهده می شود [۱۵]. نانوذرات اکسید آلومینیوم هم که گروهی شکل هستند، از همین قاعده پیروی می کنند. نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی نیز که معیاری از شرایط اصطکاکی حاکم بر فرآیند است [۱۴]، با افزایش درصد حجمی نانوذرات معلق در سیال، چه در سنگ زنی سنتی و چه در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، کاهش می یابد که بیان گر افزایش بازدهی سنگ زنی و کاهش انرژی مخصوص براده برداری است [۱۴]. ولی صرف حضور ارتعاشات فراصوت باعث افزایش نسبت نیروها (ضریب اصطکاک) می شود که بیان گر کاهش بازدهی است، اما دقت به این واقعیت که این افزایش به دلیل کاهش شدید نیروی عمودی سنگ زنی است [۱۶]، این نتیجه را در بر دارد که در عمل حضور ارتعاشات فراصوت باعث افزایش هر چه بیشتر بازدهی فرآیند می شود.

۴-۲- تأثیر ابعاد نانوذرات

در سنگ زنی سنتی، با افزایش اندازهی نانوذرات، نیروهای سنگ زنی افزایش می یابند (افزایش قطر متوسط نانوذرات اکسید آلومینیوم از ۴۰ نانومتر به ۱۳۰ نانومتر باعث ۰/۷٪ افزایش نیروی مماسی و ۲/۲٪ افزایش نیروی عمودی می شود) در حالی که نسبت نیروها ثابت می ماند. دلیل این امر آن است که افزایش اندازهی نانوذرات، نفوذ آن ها را به ناحیهی سنگ زنی دشوارتر می کند و باعث کاهش اثر بلبرینگی نانوذرات می شود [۱۷]. اما در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، افزایش اندازهی نانوذرات باعث کاهش نیروهای سنگ زنی و افزایش نسبت نیروها می شود (افزایش قطر

متوسط نانوذرات اکسید آلومینیوم از ۴۰ نانومتر به ۱۳۰ نانومتر باعث ۲/۴٪ کاهش نیروی مماسی، ۸/۹٪ کاهش نیروی عمودی و ۸٪ افزایش نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی می شود) که بر خلاف آن چیزی است که در سنگ زنی سنتی دیده می شود. از آن جایی که صرفاً با مقایسهی نتایج دو آزمایش، نمی توان با یقین گفت که این روند، در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، معمول است، لازم است که آزمایش های بیشتری برای بررسی تأثیر اندازه نانوذرات در روان کاری کمینه ی فرآیند سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، انجام شود.

۵- مقایسهی نانوذرات مختلف

در این بخش نتایج حاصل از شرایط روان کاری کمینه ۱ با ۵ و ۲ با ۶ مقایسه خواهد شد.

۵-۱- مقایسهی کاربرد نانولولهی کربنی با کاربرد نانوذرات اکسید آلومینیوم

طی پژوهش های متعددی تأثیر افزودن نانولوله های کربنی چندجداره^۲ به سیال های مختلف بر خواص حرارتی بررسی شده است و ثابت شده است که این نانولوله ها بهبود دهندهی خواص حرارتی هستند [۱۸-۲۰] و تأثیر این نانوذرات در بهبود خواص روان کاری بسیار به ترکیب شیمیایی سیال پایه وابسته است [۲۱]. طی این آزمایش ها مشخص شد که افزودن نانولوله های کربنی چندجداره به آب، در روان کاری کمینه، تأثیر چندانی بر نیروها چه در سنگ زنی سنتی و چه در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، ندارد و حتا نیروها را کمی زیاده تر هم می کند (در سنگ زنی سنتی: ۲/۵٪ افزایش نیروی مماسی، ۰/۴٪ افزایش نیروی عمودی و ۲/۳٪ افزایش نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی - در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت: ۰/۷٪ افزایش نیروی مماسی، ۱/۵٪ کاهش نیروی عمودی و ۱/۹٪ افزایش نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی). دلیل این موضوع آن است که ابعاد طولی نانولوله های کربنی چندجداره نسبتاً بسیار بزرگ است (در حدود میکرون) که باعث معانعت از نفوذ این ذرات به ناحیهی سنگ زنی می شود و حتا خود این ذرات نیز باعث نفوذ کمتر سیال برشی را به این ناحیه می شوند. به همین دلیل افزودن نانولوله های کربنی به آب در روان کاری کمینه ی فرآیند سنگ زنی برخلاف نانوذرات اکسید آلومینیوم، چه در سنگ زنی سنتی و چه در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، توجیهی ندارد.

۵-۲- مقایسهی نانوذرات گرافیت با نانوذرات اکسید آلومینیوم

همان گونه که در شکل های ۲ تا ۴ دیده می شود، نانوذرات گرافیت نسبت به نانوذرات اکسید آلومینیوم در آب به عنوان سیال پایه عمل کرد بهتری از نظر روان کاری و کاهش نیروهای سنگ زنی (در سنگ زنی سنتی نانوذرات گرافیت نیروی مماسی را ۷/۶٪ و نیروی عمودی را ۶٪ بیشتر از نانوذرات اکسید آلومینیوم کاهش می دهند و در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت نانوذرات گرافیت نیروی مماسی را ۸/۳٪ و نیروی عمودی را ۱۶/۱٪ بیشتر از نانوذرات اکسید آلومینیوم کاهش می دهند) دارند. در مورد نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی نیز، در سنگ زنی سنتی، نانوذرات گرافیت نسبت به نانوذرات اکسید آلومینیوم باعث کاهش بیشتر نسبت نیروها می شوند در حالی که در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، نانوذرات گرافیت باعث افزایش ناچیز نسبت نیروها می شوند اما نانوذرات اکسید آلومینیوم، نسبت

- [11] D.X. Peng, Y. Kang, R.M. Hwang, S.S. Shyr, Y.P. Chang, Tribological properties of diamond and SiO₂ nanoparticles added in paraffin, *Tribology International*, Vol. 42, No. 6, pp. 911-917, 2009.
- [12] M.M. Molaie, A study of nanoparticles usage in minimum quantity lubricated ultrasonic-assisted grinding, M.S. Thesis, Mechanical Engineering Department, Sharif University of Technology, 2015. (In Persian)
- [13] J. Lee, S. Cho, Y. Hwang, H.J. Cho, C. Lee, Y. Choi, B.C. Ku, H. Lee, B. Lee, D. Kim, S.H. Kim, Application of fullerene-added nano-oil for lubrication enhancement in friction surfaces, *Tribology International*, Vol. 42, No. 3, pp. 440-447, 2009.
- [14] P. Kalita, A.P. Malshe, S. A. Kumar, V.G. Yoganath, T. Gurumurthy, Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 14, No. 2, pp. 160-166, 2012.
- [15] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, A combined model for the effective thermal conductivity of nanofluids, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 11-12, pp. 2477-2483, 2009.
- [16] T. Tawakoli, B. Azarhoushang, Influence of ultrasonic vibrations on dry grinding of soft steel, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 48, No. 14, pp. 1585-1591, 2008.
- [17] P. Lee, J.S. Nam, C. Li, S.W. Lee, An experimental study on micro-grinding process with nanofluid minimum quantity lubrication (MQL), *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 3, pp. 331-338, 2012.
- [18] S.U.S. choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thompson, Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles, *Applied Physics Letters*, Vol. 78, No. 6, pp. 718-720, 2001
- [19] H. Xie, J. Wang, T. Xi, Y. Liu, F. Ai, Q. Wu, Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles, *Journal of Applied Physics*, Vol. 91, pp. 4568-4572, 2002.
- [20] M.J. Assael, C.F. Chen, I. Metaxa, W.A. Wakeham, Thermal conductivity of suspensions of carbon nanotubes in water, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 25, No. 4, pp. 971-985, 2004.
- [21] B. Shen, A.P. Malshe, P. Kalita, A.J. Shih, Performance and behavior of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding, *Transactions of NAMRI/SME*, Vol. 36, pp. 357-364, 2008.

نیروها را کاهش می دهند.

در مجموع، استفاده از نانوذرات گرافیت در مقایسه با نانوذرات اکسید آلومینیوم تأثیر بهتری بر افزایش کارایی فرآیند سنگ زنی دارد.

۶- خلاصه‌ی نتایج

در روان کاری کمینه‌ی فرآیند سنگ زنی سنتی و نیز سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت با استفاده از نانوسیال، افزایش مقدار نانوذرات معلق در سیال برشی سبب کاهش هرچه بیش تر نیروهای سنگ زنی و نسبت نیروی مماسی به نیروی عمودی.

در سنگ زنی سنتی، نانوذرات بزرگ تر به دلیل آن که قابلیت کمتری برای نفوذ به ناحیه‌ی سنگ زنی دارند، توانایی کمتری در بهبود خاصیت روان کاری دارند. اما در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، نانوذرات بزرگ تر اکسید آلومینیوم که هم جنس ساینده‌ی چرخ سنگ زنی هستند، توانایی بهتری در کاهش نیروهای سنگ زنی نسبت به نانوذرات کوچک تر می شود را دارند.

با انتخاب آب به عنوان سیال برشی، استفاده از نانولوله‌های کربنی چندجداره برای بهبود شرایط روان کاری (کاهش نیروهای سنگ زنی)، به هیچ وجه گزینه‌ی مناسبی نیست، در حالی که نانوذرات اکسید آلومینیوم شرایط روان کاری را بسیار بهبود می دهند و نانوذرات گرافیت نیز حتی نسبت به نانوذرات اکسید آلومینیوم عمل کرد بهتری دارند.

بدین ترتیب در سنگ زنی به کمک ارتعاشات فراصوت، با انتخاب ترکیبی مناسب از پارامترهای سوسپانسیون سیال- نانوذرات شامل نوع سیال، نوع نانوذرات، ابعاد نانوذرات و درصد حجمی نانوذرات، با توجه به جنس قطعه کار و چرخ سنگ زنی، می توان نیروهای سنگ زنی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد که اولاً با کاهش حرارت تولیدی، به بهبود کیفیت سطح سنگ خورده کمک می کند و ثانیاً به افزایش عمر ابزار و در نتیجه کاهش قابل ملاحظه‌ی هزینه‌های تولید می انجامد.

۷- مراجع

- [1] T. Tawakoli, M.J. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckert, A. Rasifard, An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 49, No. 12, pp. 924-932, 2009.
- [2] M.P. Grover, *Fundamentals of modern manufacturing materials, processes, and systems*, Fourth Edition, pp. 604-621, New York: John Wiley, 2010.
- [3] T.B. Thoe, D.K. Aspinwall, M.L.H. Wise, Review on ultrasonic machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 38, No. 4, pp. 239-255, 1998.
- [4] D. Bhaduri, S.L. Soo, D.K. Aspinwall, D. Novovic, P. Harden, S. Bohr, D. Martin, A study on Ultrasonic Assisted Creep Grinding of Nickel Based Superalloys, *Procedia CIRP*, Vol. 1, pp. 376-381, 2012.
- [5] J. Akbari, H. Borzui, M.H. Mamduhi, Using Ultrasonic Vibration for Increasing the Performance of Grinding Process of Fine Ceramics, *The XVIIth Processing and Fabrication of Advanced Materials International Symposium (PFAM17)*, Delhi, India, 2008.
- [6] S.A. Lawal, I.A. Choudhury, Y. Nukman, A critical assessment of lubrication techniques in machining processes: a case for minimum quantity lubrication using vegetable oil-based lubricant, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 41, pp. 210-221, 2013.
- [7] M. Hadad, B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 54, pp. 332-343, 2013.
- [8] D. Fratila, C. Caizar, Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg₃, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, No. 6-7, pp. 640-645, 2011.
- [9] T. Tawakoli, M. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, No. 17-18, pp. 2088-2099, 2011.
- [10] M. Sarikaya, A. Güllü, Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 65, pp. 604-616, 2014.