



مطالعه تجربی و تحلیلی پارامترهای مؤثر بر زبری سطح در فرایند سوراخ کاری فولاد به کمک ارتعاشات فراصوتی

مهدی ظهور^{۱*}، اسعد شاه‌ویسی^۲، بهمن قربانی^۲، توحید سلطان‌زاده^۲

۱- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۹۹۹-۱۹۳۹۵، MZohoor@kntu.ac.ir

چکیده

دقت و کیفیت سطح نهایی از عوامل قابل توجه در محصولات، به ویژه در فرایندهای سوراخ کاری است. یکی از راه‌های کاهش یا حذف پلیسه و بهبود زبری سطح در سوراخ کاری به کار بردن ارتعاشات فراصوتی در فرایند سوراخ کاری می‌باشد. سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی یکی از روش‌های نوین ماشین کاری است که برای سوراخ کاری مواد سخت و غالباً غیر هادی الکتریکی به کار می‌رود. لذا در این پژوهش تاثیر برخی پارامترهایی مؤثر از قبیل، سرعت دورانی (۵۰۰-۷۱۰ دور بر دقیقه)، نرخ پیشروی (۰/۰۸-۰/۱۶ میلی‌متر بر دور)، دامنه ارتعاشات مته (۵-۱۰ میکرومتر) بر روی زبری سطح دیواره سوراخ در فرایند سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی بر روی دو نوع فولاد St37 (فولاد نرم) و VCN-150 (فولاد سردکار) به صورت تجربی بررسی شده است. سپس، نتایج به دست آمده با استفاده از روش طراحی آزمایش‌ها آنالیز گردید و اثر هر یک از پارامترها مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصله نشان داد که در سوراخ کاری فولاد سخت‌تر (VCN-150) با افزایش دامنه ارتعاشات مته و افزایش سرعت دورانی سطح صاف‌تری به دست می‌آید اما در سوراخ کاری فولاد نرم‌تر (St37) با افزایش دامنه ارتعاشات و سرعت دورانی، سطح سوراخ زبرتر می‌شود. در نهایت می‌توان بیان کرد که رفتار برخی پارامترها بر روی دو نوع فولاد مشابه ولی رفتار بعضی پارامترها بر روی دو نوع فولاد متفاوت و متضاد می‌باشد.

کلید واژگان: سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی، زبری سطح، سرعت دورانی، دامنه ارتعاشات، نرخ پیشروی

Experimental and Analytical Study on Effective Parameters on Surface Roughness of Steel in Ultrasonic Assisted Drilling

Mehdi Zohoor^{1*}, Asaad Shahveisi¹, Bahman Ghorbani¹, Tohid Soltan zadeh²

1- Faculty of Mechanical Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

* P.O.B. 19395-1999, Tehran, Iran, MZohoor@kntu.ac.ir

ABSTRACT

The accuracy and quality of the final products are of desired properties especially in the drilling processes. One way to reduce or eliminate the burr and surface roughness improvement is the utilization of ultrasonic vibrations in the drilling process. Ultrasonic Assisted Drilling is one of the advanced machining processes that is being used for hard and non-conductive materials. In this study, the effect of the spindle speed (500-710 RPM), feed rate (0.08-0.16 mm/rev), vibration amplitude (5-10 μ m) (ultrasonic power) have been studied on surface roughness of the machined steels ST37 (soft steel) and VCN-150 (cold worked) in ultrasonic assisted drilling, experimentally. Then, the results were analyzed by using design of experiment and the effects of each parameter were studied. Results showed that the surface quality can be improved with increasing the vibration amplitude and spindle speed in hard metal (VCN-150). On the other hand, the surface quality decreased with increasing the vibration amplitude and spindle speed in mild steel (St37). Finally, it can be stated that the behavior of some of the parameters is similar on two steels but the behavior of others may be different on the same workpieces.

Keywords: Ultrasonic vibration assisted drilling, surface roughness, spindle speed, vibration amplitude, feed rate

ارتعاشات فراصوتی می‌باشد که در آن علاوه بر حرکت چرخشی متداول خود با فرکانس در حدود ۱۶ تا ۴۰ کیلوهرتز و دامنه ۲ تا ۳۰ میکرومتر در جهت طولی در راستای محور دوران ارتعاش می‌کند [۱-۴].

ارتعاشات فراصوتی سبب صلبیت ابزار، کاهش سرخوردن ابزار در ابتدای سوراخ کاری، افزایش عمر مته می‌گردد [۲]. مزیت‌های مستند فراوانی برای سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی وجود دارد. این مزیت‌ها شامل این موارد می‌شوند [۳-۶]: کاهش نیرو و گشتاور (که این مزیت علاوه بر ذخیره انرژی، احتمال تغییر شکل قطعات نازک در حین سوراخ کاری را کاهش می-

۱- مقدمه

تقریباً بیش از ۲۰٪ از فرایندهای ماشین کاری مربوط به عملیات سوراخ کاری می‌باشد. دقت و کیفیت سطح نهایی از عوامل قابل توجه در محصولات، به ویژه در فرایندهای سوراخ کاری است. پلیسه معمولاً به عنوان یک خروجی منفی در مراحل مونتاژ در نظر گرفته می‌شود. یکی از راه‌های کاهش یا حذف پلیسه و بهبود زبری سطح در سوراخ کاری به کار بردن ارتعاشات فراصوتی در فرایند سوراخ کاری می‌باشد. سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی یکی از روش‌های نوین ماشین کاری است که برای سوراخ کاری مواد سخت و غالباً غیر هادی الکتریکی به کار می‌رود. این روش ترکیبی از ماشین کاری سنتی و

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:
M. Zohoor, A. Shahveisi, B. Ghorbani, T. Soltan zadeh, Experimental and Analytical Study on Effective Parameters on Surface Roughness of Steel in Ultrasonic Assisted Drilling, Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference, Vol. 15, No. 13, pp. 291-295, 2015 (in Persian فارسی)

۲- روش انجام آزمایش

در این پژوهش برای سوراخ کاری علاوه بر حرکت متداول ابزار، از ارتعاشات التراسونیک استفاده شد. ترانسیدوسر بکار رفته در مجموعه التراسونیک از نوع پیزوالکتریک بود که امواج الکتریکی تولید شده ژنراتور را به ارتعاشات مکانیکی تبدیل می‌کند. جنس هرن از آلومینیم ۷۰۷۵ بوده و برای ایجاد حرکت دورانی از دستگاه تراش مدل TN40A ساخت کارخانه ماشین سازی تبریز استفاده شد.

برخی تجهیزات دیگر به شرح زیر است:

۱- ژنراتور^۶ برای تبدیل برق ۵۰ هرتز شهری به فرکانس بیشتر از ۱۷۵۰۰ هرتز. ژنراتور مورد استفاده دارای فرکانس متغیر و محدوده آن از ۱۷/۵ تا ۲۸/۵ کیلوهرتز و رزولوشن ۱ هرتز می‌باشد.

۲- کامپیوتر برای کنترل توان و فرکانس که از نرم افزار لب‌ویو^۷ توسعه داده شده توسط شرکت مسترسونیک^۸ بهره می‌گیرد.

۳- مته از جنس فولاد تندبر به قطر ۵ میلی‌متر

۴- زبری سنج دستی

فرکانس تشدید برای ابزارگیر در آزمایش‌ها ۳۳۴۶۰ هرتز بود.

در شکل ۱ کله‌گی التراسونیک و فیکسچر مشاهده می‌شود.

در جدول ۱ پارامترها و سطح‌های مورد بررسی در آن درج شده است. لازم به ذکر است که مته در سرعت دورانی کمتر از ۵۰۰ دور بر دقیقه شکسته شده و همچنین دامنه ارتعاشات نوک مته در توان ۲۵٪ حدود ۵ میکرون و در توان ۵۰٪ در حدود ۱۰ میکرون می‌باشد.

با استفاده از طرح عاملی کامل [۱۵] تعداد $2^4 = 16$ آزمایش ممکن برای طرح مورد بررسی وجود دارد. با توجه به طراحی آزمایش صورت گرفته از هر نوع فولاد ۸ نمونه آماده گردید. نحوه آماده سازی نمونه‌ها بدین صورت بود که از شفت‌هایی به قطر ۳۰ mm میلی‌متر، نمونه‌هایی به طول ۲۰ mm بریده شد.



شکل ۱ مجموعه ابزارگیر و فیکسچر و قطعه کار

جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی به همراه سطوح آن‌ها			
	پارامتر	سطح ۱	سطح ۲
A	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	۵۰۰	۷۱۰
B	نرخ پیشروی (میلی‌متر بر دور)	۰/۰۸	۰/۱۶
C	توان فراصوتی (درصد)	۲۵	۵۰
D	جنس قطعه کار	St37	VCN-150

دهد، افزایش دقت مکانی^۱ (به ویژه در مواردی که سوراخ روی سطح شیب دار ایجاد می‌شود)، کاهش یا حذف پلیسه، بهبود قابل ملاحظه در خروج براده از سوراخ (که این مزیت به ایجاد سوراخ‌های عمیق‌تر کمک می‌کند)، بهبود گردی^۲ و اندازه سوراخ، افزایش عمر مته، افزایش نرخ براده برداری. مزیت‌های ذکر شده باعث کاهش مراحل ایجاد سوراخ می‌شود، برای مثال کیفیت بالای سطح سوراخ و عدم ایجاد پلیسه، قطعه کار را از فرایندهای برق‌زنی و پلیسه‌گیری بی‌نیاز می‌کند. این روش برای ماشین کاری مواد خاص نیز مفید است که می‌توان به مواد چند لایه اشاره کرد که با استفاده از این روش در هنگام سوراخ کاری لایه‌لایه^۳ نمی‌شود و مواد الیافی که در هنگام ماشین کاری کمتر الیاف آن جدا می‌شود و همچنین مواد سخت و ترد با استفاده از این تکنیک کمتر دچار ترک خوردگی می‌شود [۶].

اولین کارهای تجربی در زمینه سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی به اوایل سال‌های ۱۹۵۰ برمی‌گردد [۷]. مزایای این روش باعث شده است تا امروزه تحقیقات متعددی در این زمینه صورت پذیرد که برخی از آن‌ها به شرح ذیل است:

خادمی و همکارانش [۸] در سال ۲۰۰۸ از این روش برای سوراخ کاری استخوان که کاربرد فراوان در جراحی ارتوپدی دارد استفاده نمودند و اثر نرخ پیشروی و سرعت دورانی را بر روی نیروی سوراخ کاری و دما بررسی کردند. پوجانا و همکارانش [۹] در سال ۲۰۰۹ پارامترهای نیروی پیشروی، تغییر فرم براده و دما را بررسی کردند.

فادنیس و همکارانش [۱۰] در سال ۲۰۱۲ اثر سرعت برشی را در سوراخ کاری سنتی و سوراخ کاری التراسونیک بر روی نیروی براده برداری بررسی نمودند.

مخدوم و همکارانش [۱۱] در سال ۲۰۱۲ اثر نرخ پیشروی را در نیروی سوراخ کاری بررسی نمودند.

مهبودی و همکارانش [۱۲] در سال ۲۰۱۳ اثر نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و دامنه ارتعاش را بر روی نیروی سوراخ کاری توسط روش تاگوچی بررسی کردند.

ماندگاری و بهبهانی [۱۳] در سال ۲۰۱۳ اثر نرخ پیشروی، سرعت اسپیندل و دامنه ارتعاش را بر روی دایروی و استوانه‌ای بودن و صافی سطح سوراخ بررسی کردند.

شکوری و همکارانش [۱۴] در سال ۲۰۱۴ از این روش برای سوراخ کاری استخوان ران گاو جهت بررسی نیروی محوری استفاده نمودند.

لذا در این نوشتار با توجه به تحقیقات پیشین اثر برخی پارامترهای مهم فرایند مانند سرعت دورانی، نرخ پیشروی، توان فراصوتی (که باعث تغییر دامنه ارتعاشات می‌شود) و جنس قطعه کار بر روی زبری سطح مورد بررسی قرار گرفته است.

عامل زبری سطح به عنوان متغیر خروجی و عوامل (سرعت دورانی، نرخ پیشروی، توان فراصوتی و جنس قطعه کار) به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده‌اند. پس از طراحی آزمایش‌ها، آزمایش‌های تجربی مطابق این طراحی انجام شده و متغیر خروجی اندازه‌گیری و سپس با استفاده از روش آماری آنالیز واریانس^۴، تاثیر متغیرهای ورودی بر خروجی بررسی می‌گردد. به دلیل حجم نسبتاً بالا در تحلیل داده‌ها، از نرم افزار مینیتی‌تب^۵ استفاده شد.

1. Positional Accuracy
2. Roundness
3. Delamination
4. ANOVA
5. Minitab

6. Generator MSG.1200.IX
7. Labview
8. Mastersonic

در این آزمایش از ۸ مته از جنس فولاد تندبر با روکش کبالت استفاده شد، یعنی هر مته برای سوراخ کاری دو نمونه استفاده گردید. همچنین از مایع خنک کننده نیز استفاده نشده است.

زبری سطح دیواره سوراخ توسط دستگاه زبری سنج دستی مدل TR200 که قابلیت اندازه گیری زبری سطح با دقت یک هزارم میکرون را دارا می باشد.

۳- نتایج و بحث

بعد از انجام آزمایش ها، زبری سطح دیواره سوراخ از طرف ورود مته سه مرتبه و از طرف خروج مته نیز سه مرتبه اندازه گیری و میانگین نتایج آن ها برحسب میکرومتر در جدول ۲ ثبت گردید.

با توجه به این که آزمایش ها فقط یکبار انجام شدند، اگر همه اثرهای اصلی و اثر تعامل در نظر گرفته شوند، به دلیل صفر شدن خطای میانگین مربع^۱ نمی توان تحلیل را انجام داد. بنابراین، با توجه به این که اثر تعامل هر چهار عامل به احتمال قوی ناچیز خواهد بود لذا از این اثر صرف نظر گردید و سپس تحلیل انجام شد.

با انجام تحلیل توسط نرم افزار، و با فرض خطای نوع اول به اندازه $\alpha = 0.05$ و با توجه به مقادیر P به دست آمده فاکتور C (توان) و تعامل- اثرهای AC (تعامل اثر سرعت دورانی اسپیندل و توان)، AD (تعامل اثر سرعت دورانی اسپیندل و جنس قطعه کار) و CD (تعامل اثر توان و جنس قطعه کار) مؤثرند و مقدار P برای BD (تعامل اثر نرخ پیشروی و جنس قطعه کار)، 0.068 می باشد.

۳-۱- اثر توان فراصوتی

در حین دوران مته، ارتعاشات محوری در جهت پیشروی مته اعمال می شود. تاثیر ارتعاش بر عملکرد مته بدین صورت است که حرکت نوسانی آن به دو مرحله رفت و برگشت قابل تقسیم است.

در مرحله رفت، ارتعاش مثبت است و مطابق رابطه (۱)، به حرکت

جدول ۲ ماتریس آزمایش به همراه نتایج زبری سطح دیواره سوراخ

شماره آزمایش	سرعت دورانی (RPM)	نرخ پیشروی (mm/r)	توان فراصوتی (%)	جنس قطعه کار	زبری سطح (μm)
۱	۵۰۰	۰/۰۸	۲۵	St37	۱/۶۷۲
۲	۷۱۰	۰/۰۸	۲۵	St37	۱/۳۸۸
۳	۵۰۰	۰/۱۶	۲۵	St37	۱/۵۲۳
۴	۷۱۰	۰/۱۶	۲۵	St37	۱/۶۱۴
۵	۵۰۰	۰/۰۸	۵۰	St37	۱/۹۰۸
۶	۷۱۰	۰/۰۸	۵۰	St37	۲/۷۸۵
۷	۵۰۰	۰/۱۶	۵۰	St37	۲/۳۹۵
۸	۷۱۰	۰/۱۶	۵۰	St37	۳/۶۲۱
۹	۵۰۰	۰/۰۸	۲۵	VCN	۲/۹۶۶
۱۰	۷۱۰	۰/۰۸	۲۵	VCN	۱/۸۶۳
۱۱	۵۰۰	۰/۱۶	۲۵	VCN	۳/۰۴۸
۱۲	۷۱۰	۰/۱۶	۲۵	VCN	۱/۵۸۳
۱۳	۵۰۰	۰/۰۸	۵۰	VCN	۲/۰۸۲
۱۴	۷۱۰	۰/۰۸	۵۰	VCN	۲/۰۵۰
۱۵	۵۰۰	۰/۱۶	۵۰	VCN	۲/۰۶۲
۱۶	۷۱۰	۰/۱۶	۵۰	VCN	۱/۸۸۵

پیشروی افزوده شده و آن منجر به افزایش زاویه براده در حین کار به میزان μ و در مقایسه زاویه آزاد مته کوچکتر می شود (روابط ۲-۴). افزایش زاویه براده سبب کاهش اندازه براده، کاهش نیروی شکل گیری براده و کاهش نیرو-های ماشین کاری می شود.

$$Z(t) = A \sin(2\pi ft) + Fnt \quad (1)$$

$$\alpha_w = \alpha - \mu \quad (2)$$

$$\gamma_w = \gamma + \mu \quad (3)$$

$$\tan \mu = \frac{a_f}{\pi \cdot D} \quad (4)$$

در مرحله برگشت، ارتعاش منفی است و از حرکت پیشروی کسر می شود و زاویه براده در حین کار نسبت به زاویه براده مته کاهش می یابد. در نتیجه میزان چسبندگی براده به مته و اصطکاک روی ابزار کاهش می یابد.

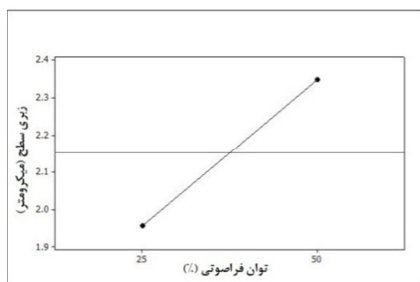
در هر سیکل ارتعاش ابزار، پیشروی کوچک بوده و کمک می کند که تولید براده ضخیم تر، کوچک تر و ناپیوسته شکل بگیرد و همچنین حرکت نوسانی ابزار عمل ضربه فراصوتی^۲ را منجر می شود. به علاوه، هنگامی که براده ها کوچک هستند، بخاطر پدیده ضربه فراصوتی، براده ها در شیارهای مته براحتی حرکت می کنند و ضربه های بین براده ها و سطح سوراخ کاهش می یابد. بنابراین، این ممکن است منجر به چسبندگی کمتر براده ها بر روی سطوح سوراخ شود.

شکل ۲ تاثیر توان فراصوتی بر زبری سطح را نشان می دهد. همان گونه که از شکل مشخص است، توان (دامنه ارتعاشات) پایین تر موجب تغییر کمتر بر روی زوایای آزاد و براده موثر و در نتیجه زبری سطح کمتر دیواره را نتیجه می دهد.

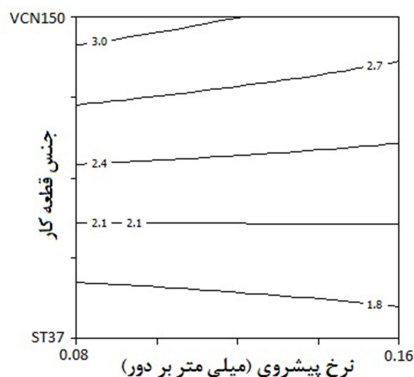
در سوراخ کاری قطعه کار از جنس فولاد VCN-150، با افزایش توان فراصوتی از ۲۵٪ به ۵۰٪ (که باعث افزایش دو برابری دامنه ارتعاشات می شود)، میانگین زبری سطح از ۲/۳۷ به ۲/۰۲ میکرومتر کاهش یافت. علت این بهبود ۱۵ درصدی صافی سطح آنست که با افزایش دامنه ارتعاشات، براده ها ریزتر و نازک تر شده و به آسانی از سوراخ خارج می شوند. در نتیجه نیروهای برشی کاهش یافته، تغییر شکل پلاستیک کمتری رخ داده و صافی سطح بهبود می یابد.

در سوراخ کاری قطعه کار از جنس فولاد St37، با افزایش توان فراصوتی از ۲۵٪ به ۵۰٪، میانگین زبری سطح از ۱/۵۵ به ۲/۶۸ میکرومتر افزایش یافت. این نشان دهنده اینست که افزایش دامنه ارتعاشات باعث کاهش کیفیت سطح در فولاد نرم می شود. در نتیجه در سوراخ کاری فولاد نرم بهتر است از توان فراصوتی پایین (در نتیجه دامنه ارتعاشات پایین) استفاده شود.

در سوراخ کاری سنتی بنا به دو دلیل توانایی براده برداری توسط لبه برشی فرعی بسیار ضعیف است؛ یکی زاویه براده منفی این لبه و دوم سرعت



شکل ۲ اثر توان فراصوتی بر روی میزان زبری سطح



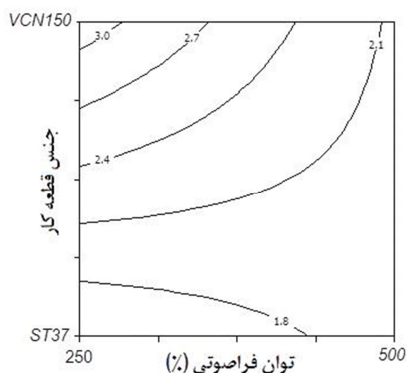
شکل ۴ تعامل اثر نرخ پیشروی و جنس قطعه کار بر روی زبری سطح

۳-۴-۴ اثر جنس قطعه کار

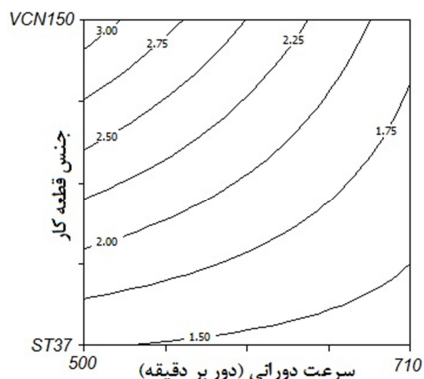
حرکت رفت و برگشتی ارتعاشی مته یک مکانیزم ضربه ارتعاش تولید می کند یک میکرو ترک در قطعه کار و تغییر شکل پلاستیک مورد نیاز برای فرایند سوراخ کاری کاهش می یابد.

تعامل اثر توان و جنس قطعه کار نشان می دهد که در سوراخ کاری قطعه کار از جنس St37 با افزایش توان دیواره سوراخ زبرتر می شود ولی در VCN-150 با افزایش توان صافی سطح بهبود می یابد. اختلاف زبری سطح در توان های بالا و پایین برای VCN-150 کم است اما این اختلاف برای St37 زیاد می باشد (شکل ۵).

تعامل اثر سرعت دورانی اسپیندل و جنس قطعه کار، دیواره صاف تر را در سرعت دورانی پایین برای St37 و سرعت دورانی بالا برای VCN-150 نشان می دهد (شکل ۶).



شکل ۵ تأثیر تعامل اثر توان در جنس قطعه کار بر زبری سطح



شکل ۶ تأثیر تعامل اثر سرعت دورانی در جنس قطعه کار بر زبری سطح

برشی پایین. اما در سوراخ کاری به کمک ارتعاشات زاویه مؤثر براده لبه برش فرعی و سرعت برشی بیشتر می شود و هر چه دامنه ارتعاشات بیشتر شود، توانایی براده برداری توسط این لبه بیشتر می شود.

۳-۲-۳ اثر سرعت دورانی

سر خوردن مته در حین عملیات سوراخ کاری منجر به حرکت نامنظم براده ها شده و باعث می شود براده ها بر روی سطح داخلی سوراخ کوبیده و همچنین بر روی سطح سوراخ خراشیده شوند.

افزایش سرعت دورانی باعث کاهش ضخامت براده و کاهش نیروی برشی شده و پایداری فرایند سوراخ کاری افزایش می یابد و منجر به کاهش سر خوردن مته می شود. کاهش ضخامت براده باعث بهبود خروج براده از ناحیه ماشین کاری می شود. به دلیل ارتعاشات محوری ابزار، براده های تولید شده کوچکتر می باشد.

همان گونه که در شکل ۳ تعامل اثر سرعت دورانی اسپیندل و توان نشان می دهد، در دامنه ارتعاشات پایین، با افزایش سرعت دورانی به دلیل همپوشانی پستی و بلندی های سطح موجب کاهش زبری سطح می گردد. ولی با افزایش دامنه ارتعاشات تغییرات بر روی زوایای آزاد و براده مؤثر بیشتر شده و زبری سطح کاهش خواهد یافت.

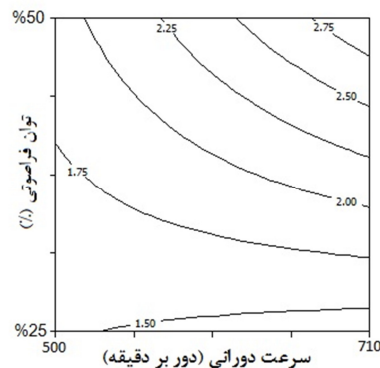
اما در سرعت دورانی پایین، با افزایش در دامنه ارتعاشات، حرکت نوسانی ابزار موجب اصلاح پروفیل سطح ایجاد شده براساس حرکت پیشروی ابزار شده و کیفیت سطح بهبود می یابد.

با افزایش سرعت دورانی از ۵۰۰ به ۷۱۰ دور بر دقیقه در سوراخ کاری فولاد VCN-150، میانگین زبری سطح از ۲/۵۴ به ۱/۸۵ کاهش یافت. این بهبود ۲۷ درصدی به دلیل افزایش زاویه مؤثر براده و کاهش زاویه مؤثر آزاد می باشد. اما در سوراخ کاری قطعه کار از جنس فولاد St37، با افزایش سرعت دورانی از ۵۰۰ به ۷۱۰ دور بر دقیقه، میانگین زبری سطح از ۱/۸۵ به ۲/۳۵ میکرومتر افزایش یافت. کاهش کیفیت سطح با افزایش سرعت دورانی در این نوع فولاد به دلیل افزایش دما در ناحیه براده برداری می باشد.

۳-۳-۳ اثر نرخ پیشروی

با افزایش نرخ پیشروی، سر خوردن مته بیشتر شده و همچنین ناپایداری در فرایند سوراخ کاری افزایش یافته و زبری سطح افزایش می یابد.

مقدار P تعامل اثر نرخ پیشروی و جنس قطعه کار، ۰/۰۶۸ می باشد و با فرض خطای نوع اول به میزان ۷ درصد، این تعامل اثر نیز مؤثر می باشد. شکل ۴ نشان می دهد که در قطعه کار با جنس St37 افزایش نرخ پیشروی، به دلیل ایجاد لبه انباشته بر روی لبه های برنده مته، زبری سطح افزایش می یابد.



شکل ۳ تعامل اثر سرعت دورانی در توان فراصوتی بر روی زبری سطح

assisted drilling of bone, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 194-200, 2014. (In Persian)
 [15] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 5th Edition, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله تاثیر هر یک از پارامترهای سرعت دورانی، نرخ پیشروی و توان فراصوتی بر روی زبری سطح دو نوع فولاد VCN-150 و St37 در فرایند سوراخ کاری به کمک ارتعاشات فراصوتی مورد بررسی قرار گرفت و ملاحظه گردید، افزایش نرخ پیشروی و سرعت دورانی در فولاد VCN-150 موجب کاهش زبری سطح شده، بنابراین می توان برای فولادهای سخت، نرخ پیشروی و سرعت دورانی را بالاتر انتخاب نمود که این به معنی افزایش سرعت ماشین کاری و کاهش هزینه های تولید می باشد.

۵- فهرست علائم

a_f میزان پیشروی

f فرکانس

n تعداد دوران

t زمان

علائم یونانی

α زاویه آزاد

μ زاویه مارپیچ پیشروی

γ زاویه براده

زیر نویس ها

W در حال کار

۶- تشکر و قدردانی

بدین وسیله نگارندگان این مقاله از امکاناتی که توسط دانشگاه صنعتی شریف جهت کارهای آزمایشگاهی در اختیار آنان قرار داده شده، تشکر می نمایند.

۷- مراجع

- [1] B. Azarhoushang, J. Akbari, Ultrasonic-assisted drilling of Inconel 738-LC, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1027-1033, 2007.
- [2] D. Y. Zhang, Study on the drill skidding motion in ultrasonic vibration microdrilling, *International journal of machine tools and manufacture*, Vol. 34, pp. 847-857, 1994.
- [3] S.S. Chang, G.M. Bone, Burr height model for vibration assisted drilling of aluminum 6061-T6, *Precision Engineering*, Vol. 34, pp. 369-375, 2010.
- [4] Y. Liao, Y. Chen, H. Lin, Feasibility study of the ultrasonic vibration assisted drilling of Inconel superalloy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 47, pp. 1988-1996, 2007.
- [5] S.S. Chang, G.M. Bone, Burr size reduction in drilling by ultrasonic assistance, *Robotics and computer-integrated manufacturing*, Vol. 21, pp. 442-450, 2005.
- [6] P. Thomas, V. Babitsky, Experiments and simulations on ultrasonically assisted drilling, *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 308, pp. 815-830, 2007.
- [7] J. Kumabe, *Fundamentals and Applications of Vibration Cutting*, Jikkyo publishing, Tokyo, 1979.
- [8] V. Khademi, J. Akbari, F. Frahmmand, ultrasonic assisted drilling of bone, *Journal of Majlesi Mechanical Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 69-74, 2009 (In Persian)
- [9] J. Pujana, A. Rivero, A. Celaya, L.N. Lopez de Lacalle, Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2009.
- [10] V.A. Phadnis, F. Makhdum, A. Roy, V.V. Silberschmidt, Ultrasonically Assisted Drilling In Cfrp Composites, *ECCM15-15th European Conference On Composite Materials*, Venice, Italy, 2012.
- [11] F. Makhdum, L.T. Jennings, A. Roy, V.V. Silberschmidt, Cutting forces in ultrasonically assisted drilling of carbon fibre-reinforced plastics, *Journal of Physics*, Vol. 382, pp. 12-19, 2012.
- [12] P. Mehbudi, V. Baghlani, J. Akbari, A.R. Bushroa, N.A. Mardi, Applying ultrasonic vibration to decrease drilling-induced delamination in GFRP laminates, *Procedia CIRP*, Vol. 6, pp. 577- 582, 2013.
- [13] M. Mandegari, S. Behbahani, Experimental Analysis of a Novel Rotary Ultrasonic Assisted Drilling (RUAD) Machine, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.28, pp. 481-487, 2013.
- [14] E. Shakouri, M.H. Sadeghi, M. Maerefat, M.R. Karafi, M. Memarpour, Experimental and analytical investigation of thrust force in ultrasonic