

بررسی تأثیر پارامترهای ارتعاشی روی دمای نوک ابزار در تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک

بابک غلامزاده^۱ گروه ساخت و تولید، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز
محمدجواد ناطق^۲ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
حمید سلیمانی مهر^۳ گروه سامانه‌های هوشمند، دانشگاه اصفهان
مرتضی شنکایی^۴ دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۸۹/۰۱/۲۹؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۲۶)

چکیده

در سال‌های اخیر برای افزایش کیفیت سطح ماشینکاری و کاهش نیروهای ماشینکاری، از ابزارهای ارتعاشی با فرکانس آلتراسونیک استفاده شده تا توانایی ماشینکاری را به ویژه برای مواد آلیاژی در سرعت‌های برشی پایین حفظ نماید. در این میان میزان سایش ابزار به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای اقتصادی، که رابطه مستقیم با نوسانات دمای نوک ابزار دارد، نمود پیدا می‌کند. تحلیل دمایی نوک ابزار در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک (UAT) به علت ارتعاش ابزار با فرکانس بالا بسیار پیچیده است. بدین منظور در مقاله حاضر با تحلیل دمایی تراشکاری متعامد آلیاژ Al7075-T6 با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، به بررسی تأثیر پارامترهای ماشینکاری (سرعت برشی و نرخ پیشروی) و پارامترهای ارتعاشی (دامنه و فرکانس ارتعاشات) روی میزان دمای ابزار در UAT و مقایسه آن با دمای تراشکاری سنتی (CT) پرداخته شده است. نتایج شبیه‌سازی المان محدود حاکی از این است که در تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک به هنگام نفوذ ابزار به قطعه کار، میزان افزایش دما نسبت به حالت CT، بیشتر از کاهش آن در هنگام جدایی ابزار از قطعه کار است. همچنین با افزایش دامنه و فرکانس ارتعاش، دمای بیشینه ابزار نیز افزایش یافته و در سرعت ارتعاشی ثابت، به منظور کاهش دما می‌بایست از دامنه ارتعاشی پایین و فرکانس بالا استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: آنالیز حرارتی، تحلیل المان محدود، تراشکاری، ارتعاشات التراسونیک

An Investigation on the Effect of Vibrational Parameters on Tool Temperature in Ultrasonic Assisted Turning

B. Gholamzadeh Mech. Eng. Group Islamic Azad Univ. Tabriz Branch
M.J. Nategh Faculty of Eng. and Tech. Tarbiat Modares Univ.
H. Soleimanimehr Intelligent Sys. Group Univ. of Isfahan.
M. Shankayi Faculty of Eng. and Tech. Tarbiat Modares Univ.

(Received: 18 April, 2010; Accepted: 16 March, 2013)

ABSTRACT

In recent years, demand for increasing quality and tool life and for decreasing machining force has led to the use of vibratory tool instead of fixed one in the conventional cutting. Tool wear as one of the most important economical parameters, must be considered. As will be shown in the present paper, heat as the most important parameter can decrease tool life significantly. Thermal analysis of tool tip temperature in ultrasonic assisted turning (UAT) is very complex because of the high frequency fluctuations in the nature of this process. In this paper, ABAQUS finite element software has been used for the thermal analysis of orthogonal turning of Al7075-T6 to study the effect of machining parameters (cutting speed and feed rate) and vibration parameters (amplitude and frequency) on the tool tip temperature in UAT. A comparison has also been made with the conventional turning (CT) temperature. It has been shown that, when the tool engages with the work piece, the cutting tool temperature increases. This increase in UAT is more obvious than the temperature decrease occurring when the cutting tool separates from the work piece. Moreover, with increasing vibration amplitude, the maximum tool temperature also increases. In constant vibration speed, low amplitude and high frequency should be used to achieve minimum temperature.

Keywords: Ultrasonic Assisted Turning, FEA, Thermal Analysis, Ultrasonic Vibration

۱- مری: babak.gholamzadeh@gmail.com
۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): nategh@modares.ac.ir
۳- استادیار: soleimanimehr@gmail.com
۴- دانشجوی دکتری: shankayi@gmail.com

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با افزایش کاربرد مواد سخت و آلیاژی، به کارگیری ابزار ارتعاشی با فرکانس بالا در ماشینکاری، این نوع مواد رو به فزونی گذاشته است. تأثیراتی که این ارتعاشات در فلزتراشی می‌گذارد توسط افراد زیادی بررسی و برای آن نیز، مدل‌های تحلیلی ارائه شده است [۱]. در این میان کومابه^۱ و همکارانش نشان دادند که برش‌های منقطع پالسی باعث کاهش نیروهای برشی می‌شود [۲ و ۳]. بابیتسکی^۲ و همکارانش نشان دادند که صافی سطح و گردی، در فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک^۳ نسبت به تراشکاری سنتی^۴ بهبود می‌یابد [۴ و ۵] و بعدها نشان دادند که تنش‌های پسماند فشاری در UAT افزایش می‌یابد [۶]. نات^۵ و همکارانش نشان دادند که با اعمال ارتعاشات بر ابزار در سرعت‌های برشی پایین، میزان نرخ سایش ابزار کمتر از تراشکاری سنتی است [۷ و ۸]. ماشینکاری فلزات و رخداد برش، فرآیند پیچیده‌ای از نظر تحلیلی است. با اینکه زمان زیادی از استفاده از فرآیندهای برش در تولید قطعات می‌گذرد ولی هنوز به درستی رخدادهای اتفاق افتاده در منطقه برش مشخص نیستند. روش المان محدود در بررسی فرآیند ماشینکاری کاربرد قابل توجهی یافته است [۹-۱۵]. پیچیدگی تحلیل فرآیند تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک، فراتر از تراشکاری سنتی است زیرا در این حالت، علاوه بر حرکت‌های اصلی ماشینکاری، ارتعاشات ابزار با فرکانس بالا و دامنه بسیار کوچک نیز وجود دارد. بابیتسکی و همکارانش با استفاده از نرم‌افزار MARC تحلیل‌هایی را برای تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک انجام دادند تا تنش‌های پسماند را در قطعه کار به دست آورند [۶]. آنها مانند محققان دیگر که بر روی شبیه‌سازی تراشکاری سنتی فلزات کار کردند، ابزار را صلب فرض نمودند. همچنین نتایج تحلیل با استفاده از نرم‌افزار Marc نشان می‌دهد که بیشینه نیرو در فرآیند UAT، بیشتر از تراشکاری سنتی^۶ بوده ولی میانگین نیروها ۳۰٪ تا ۴۰٪ حالت CT است [۱۶]. برای تعیین میزان افزایش دمای ابزار ماشینکاری که تأثیر عمده‌ای در میزان سایش ابزار دارد، بررسی‌هایی انجام شده است. بابیتسکی و همکارانش با تحلیل‌های شبه استاتیکی نشان دادند که دمای ماشینکاری در UAT تابع شرایط زیادی بوده و تنها به این نکته

اشاره کردند که دما در ابتدای ماشینکاری بیشتر از CT و بعد از مدتی به طور پایداری پایین‌تر از CT است [۱۷]. افرادی چون پوجانا^۷ و همکارانش با بررسی تجربی تأثیرات دامنه ارتعاشی در افزایش دمای نوک مته در فرآیند سوراخ‌کاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک^۸ نشان دادند که علی‌رغم کاهش نیروهای برشی، دمای سوراخکاری تا ۳۰۰ درجه نسبت به سوراخکاری سنتی افزایش می‌یابد [۱۸]. موارد بالا، بررسی دقیق‌تر ایجاد و انتقال حرارت در فرآیند ماشینکاری ارتعاشی را الزامی می‌کند. در UAT علاوه بر سرعت برشی، نرخ پیشروی، هندسه ابزار، جنس قطعه کار، خواص انتقال حرارتی ابزار و قطعه کار، پارامترهای ارتعاشی دامنه و فرکانس، روی میزان افزایش دمای ابزار تأثیرگذارند که می‌بایست تأثیر هر یک مشخص شود. برای نیل به این مقصود، در این مقاله هر دو فرآیند CT و UAT به کمک نرم‌افزار شبیه‌ساز المان محدود ABAQUS با بهره‌گیری از ضریب اصطکاک حاصل از روابط تجربی، آنالیز دمایی شده است. بر خلاف اکثر شبیه‌سازی‌ها، با وجود افزایش پیچیدگی‌های تحلیل، ابزار از لحاظ دمایی، غیرصلب و قادر به انتقال حرارت فرض شده است.

۲- شبیه‌سازی المان محدود

در این مقاله، برای شبیه‌سازی عددی از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit به علت قدرت انعطاف بالا، اعمال شرایط مرزی غیر یکنواخت، ایجاد حرکت ارتعاشی و بهره‌گیری از مدل ابزار غیر صلب برای انتقال حرارت استفاده شده است.

۲-۱- مدل‌سازی

با توجه به متعادل بودن تراشکاری و یکنواخت بودن انتقال حرارت در راستای عمود بر صفحه برش، از تحلیل دوبعدی استفاده شده است. مشخصات هندسی مقطع ابزار، توسط میکروسکوپ نوری مطابق شکل ۱ اندازه‌گیری شده و با شعاع لبه برش ۰/۰۳mm، زاویه سطح براده $\alpha = 4^\circ$ و زاویه سطح آزاد $\beta = 5^\circ$ مدل شده است.

قسمتی از قطعه کار مطابق شکل ۲ مدل شده که طول آن در راستای سرعت برشی Y نباید کمتر از مقدار لازم برای شکل‌گیری و شکست یک براده باشد و عرض آن نیز در راستای Z (همراستای محور قطعه کار استوانه‌ای) می‌بایست بزرگتر از مقداری باشد که تغییرات دمایی و تنش‌های پسماند در مرز پایین ایجاد نشود. همچنین ابعاد بزرگ قطعه کار، زمان تحلیل را بسیار زیاد می‌کند. بنابراین، برای کاهش زمان تحلیل، بعد از

- 1- Kumabe
- 2- Babitsky
- 3- UAT (Ultrasonic Assisted Turning)
- 4- CT (Conventional Turning)
- 5- Nath
- 6- CT (Conventional Turning)

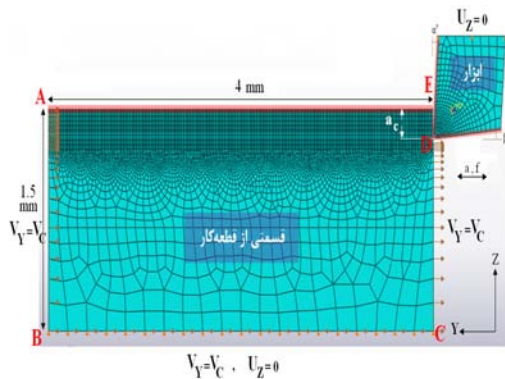
7- Pujana

8- UAD (Ultrasonic Assisted Drilling)

تغییر شکل‌های بزرگ، از تکنیک ALE^2 که تلفیقی از حالات اویلری و لاگرانژی است استفاده شده است.

۲-۲- شرایط مرزی و اولیه

برای اعمال شرایط مرزی، مطابق شکل ۲ قسمت پایین قطعه کار (B-C)، در راستای محور عمود بر سرعت برشی Z مقید شده ($U_z=0$) مقدار جابه‌جایی در راستای Z و سرعت برشی در راستای محور افقی Y ($V_Y=V_C$) در قسمت‌های (A-B)، (B-C) و (C-E) به قطعه کار اعمال شده است (سرعت برشی $V_C=0$). در حالت CT، ابزار به طور کامل ثابت نگه داشته شده ولی در UAT چون ابزار ثابت نیست، قسمت بالای ابزار که در اصل متصل به ابزارگیر است، تنها در راستای Z مقید شده است تا در راستای Y با اعمال سرعت ارتعاشی قابلیت جابه‌جایی رفت و برگشتی را داشته باشد. برای سطح بالای قطعه کار در هر دو حالت CT و UAT و برای سطوح آزاد و براده ابزار در حالت UAT به سبب حرکت ابزار نیز فیلم همرفت^۳ تعریف شده و دمای اولیه ابزار و قطعه کار نیز برای تمام گره‌ها ۲۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است.



شکل (۲): شرایط مرزی و نوع مش‌بندی ابزار و قطعه کار در فرآیند.

۳-۲- خواص فیزیکی و مکانیکی

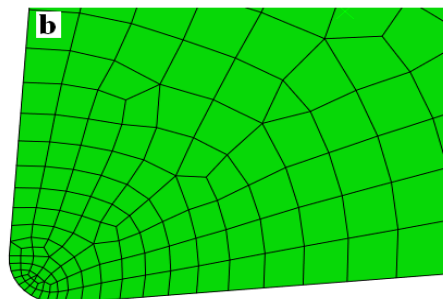
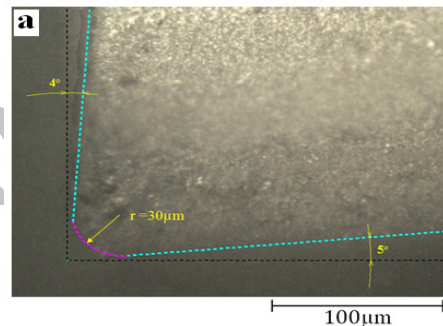
جهت بیان ویژگی ماده، تحت تغییر شکل‌های بزرگ، در این تحقیق از معادله پلاستیسیته Johnson-cook که ترکیبی از حالات Thermo-Elasto-Visco-Plastic است، استفاده شده که عبارت است از:

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\epsilon}_{pl})^n] [1 + C \ln(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_{pl}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0})] [1 - (\theta')^m] \quad (1)$$

$$\left(\theta' = \frac{\theta - \theta_{room}}{\theta_m - \theta_{room}} \right) \quad (2)$$

چندین شبیه‌سازی اولیه، کوچک‌ترین اندازه ممکن قطعه کار برای حصول محدودیت‌های بالا، به طول ۴ و عرض ۱/۵ میلی‌متر انتخاب شده است.

نوع تحلیل به کار رفته Dynamic/Explicit است که برای انتگرال‌گیری، از عملگر تفاضل مرکزی استفاده می‌نماید و برای حل مسائل درگیر با ضربه، تماس و تغییر شکل‌های بزرگ مناسب است. همچنین به علت اینکه تحلیل از نوع مکانیکی توأم با ایجاد حرارت است، المان از نوع ۴ گره‌ای کوپل دما-جابه‌جایی با آنالیز صفحه کرنش و انتگرال کاهش‌یافته^۱ CPE4RT انتخاب شده است. برای مش‌بندی، چون تغییرشکل (تشکیل براده) در قسمت بالای مدل قطعه کار رخ می‌دهد، برای افزایش دقت نتایج، میزان چگالی مش در آن ناحیه افزایش داده شده است به طوری که اندازه هر المان مربعی در آن ناحیه ۱۰ میکرون است.



شکل (۱): هندسه ابزار، (a) عکس میکروسکوپی از لبه ابزار تراشکاری و (b) مدل اجزای محدود ابزار.

در مش‌بندی ابزار نیز، چگالی مش در نوک ابزار به علت تنش‌های تماسی بالا و انتقال حرارت از قطعه کار، می‌بایست بیشتر باشد، در نتیجه اندازه المان‌ها در آن نواحی ریزتر شده است. به طور کلی قطعه کار از ۱۶۰۴۴ المان و ابزار از ۵۱۰ المان تشکیل شده است. برای گریز از اعوجاج المان‌ها در اثر

2- Arbitrary Lagrangian Eulerian
3- Convection Film

1- 4-Node Plane Strain Thermally Coupled Quadrilateral, Bilinear Displacement and Temperature, Reduced Integration

که در آن، N سرعت دورانی بر اساس d rev/min قطر قطعه کار بر حسب mm است.

بنابراین با انتخاب کوچکترین فرکانس ارتعاش و دامنه ارتعاشی یعنی 20 kHz و $6 \mu\text{m}$ ، طبق معادله ۶ بیشینه سرعت دورانی برای قطعه کاری با قطر متوسط 130 mm ، برابر 110 rev/min به دست می‌آید. در این تحقیق، برای مشاهده تأثیر مشخص ارتعاشات، از حداقل سرعت دورانی مجاز یعنی 50 ، 65 و 80 rev/min و نرخ پیشروی 0.1 و 0.2 mm/rev و همچنین دامنه ارتعاشی 6 ، 8 و $10 \mu\text{m}$ استفاده شده و فرکانس ارتعاش با همان نسبت دامنه‌ها به یکدیگر و براساس فرکانس پایین 20 kHz برابر مقادیر 20 ، 25 و $33/333$ به دست آمده است. تغییر فرکانس برای بررسی بهتر تأثیر هر یک از دامنه‌ها و فرکانس‌ها روی افزایش دما ایجاد شده است.

۲-۴- ایجاد و انتقال حرارت

با توجه به اینکه تحلیل ماشینکاری از نوع کوپل دما و تنش است، بنابراین می‌بایست عوامل ایجاد، انتقال و اتلاف حرارت به طور دقیق در نظر گرفته شوند. موارد زیر برای ورودی نرم‌افزار ABAQUS لازم است بدین خاطر میزان انرژی حاصل از اصطکاک لغزشی از معادله زیر حاصل می‌شود:

$$P_{fr} = \tau_f \cdot \dot{\gamma}, \quad (7)$$

که $\dot{\gamma}$ نرخ لغزش^۱ در هر لحظه بوده و توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود و τ_f تنش اصطکاکی برای ناحیه چسبیده از معادله ۸ و برای ناحیه لغزنده از معادله ۹ حاصل می‌شود [۲۰]:

$$\tau_f = \tau_{\max} \quad \mu\sigma_n \geq \tau_{\max}, \quad (8)$$

$$\tau_f = \mu\sigma_n \quad \mu\sigma_n < \tau_{\max}, \quad (9)$$

که در آن، σ_n تنش نرمال وارد بر سطح ابزار و مقدار تنش برشی حداکثر قطعه کار از معیار فون میز

در ناحیه تغییرشکل ثانویه وابسته به کسری از انرژی اصطکاکی تبدیل شده به حرارت است که در این مقاله برابر با $\eta = 0.9$

انتخاب شده و در آن به سبب جاری شدن براده بر روی ابزار، دمای بین سطوح اصطکاکی برخوردی T افزایش یافته که میزان شارش گرما در اثر اصطکاک لغزشی روی سطح ابزار و براده، وابسته به سطوح تماس دوگانه بوده و از معادله (۱۰) حاصل می‌شود:

$$q_c = f_w \cdot \eta \cdot P_{fr}, \quad q_t = (1 - f_w) \cdot \eta \cdot P_{fr}, \quad (10)$$

مقدار این پارامترها و معنای آنها برای آلومینیم T6-Al7075 عبارتند از: $A = 546 \text{ Mpa}$ تنش سیلان اولیه قطعه کار در دمای اتاق، $B = 674 \text{ Mpa}$ مدول سخت شوندگی، $n = 0.72$ ضریب سخت‌شوندگی کرنشی، $C = 0.59$ ضریب حساسیت نرخ کرنش، $m = 1/56$ ضریب نرم‌شوندگی گرمایی، $\dot{\epsilon} = 1$ نرخ کرنش پلاستیک [۱۹] و دمای ذوب $\theta_m = 580^\circ\text{C}$ است. دمای محیط نیز $\theta_{\text{room}} = 20^\circ\text{C}$ در نظر گرفته می‌شود. همچنین مقادیر زیر در هر لحظه برای هر گره توسط نرم‌افزار محاسبه و اعمال می‌شود. لازم به ذکر است که θ دمای گره، $\bar{\epsilon}_{pl}$ کرنش پلاستیک معادل و $\dot{\epsilon}_{pl}$ نرخ کرنش پلاستیک معادل است.

برای شکل‌گیری براده از معیار کرنش پلاستیک معادل بحرانی استفاده شده است به نحوی که با بهره‌گیری از مدل شکست مواد نرم، المان شکسته شده (گسیختن از گره‌ها) و در نتیجه براده شکل می‌گیرد. زمانی که معیار گسیختگی W رابطه (۳) به عدد یک برسد، شکست شروع می‌شود. در واقع شروع شکست زمانی است که نمو کرنش پلاستیک $\Delta \bar{\epsilon}$ ، به حد کرنش پلاستیک معادل شروع شکست $\bar{\epsilon}_D^{pl}$ که از معادله (۴) حاصل شده برسد. وقتی معیار گسیختگی در یک گره به حد مذکور رسید، تمامی مؤلفه‌های تنش در آن گره صفر شده و وقتی تمام گره‌های یک المان به آن حالت رسیدند، المان از مش جدا می‌شود [۲۰].

$$W = \sum \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_D^{pl}}, \quad (3)$$

$$\left[\bar{\epsilon}_D^{pl} = [d_1 + d_2 \exp(d_3 \frac{\sigma_p}{\sigma_e})] [1 + d_4 \ln(\frac{\dot{\epsilon}_{pl}}{\dot{\epsilon}_0})] [1 + d_5 (\theta)] \right], \quad (4)$$

که در آن، σ_p تنش فشاری، σ_e تنش فون مایسز، $d_1 = 0.451$ ، $d_2 = 0.952$ ، $d_3 = 0.068$ ، $d_4 = 0.36$ ، $d_5 = 0.697$ پارامترهای شکست اندازه‌گیری شده از تست هاپکینسون هستند [۱۹].

با توجه به اینکه در فرآیند UAT حرکت ارتعاشی ابزار پرئودیک است، سرعت ارتعاشی ابزار v_t در راستای سرعت برشی ($V_T = V_C$) از معادله زیر حاصل می‌شود:

$$v_t = \tilde{v} \cdot \cos\left(\omega \frac{180}{\pi} t\right) \rightarrow v_t = 2\pi a f \cos(360 f \cdot t), \quad (5)$$

که در آن، \tilde{v} سرعت بحرانی ارتعاش بر حسب mm/s ، f فرکانس بر حسب Hz و a دامنه ارتعاش بر حسب μm (صفر تا پیک) است. از طرف دیگر می‌بایست مؤلفه ثابت سرعت ارتعاشی ابزار که تابعی از فرکانس و دامنه است، بزرگ‌تر از سرعت برشی قطعه کار باشد تا امکان ایجاد برش انقطاعی پدید آید. بنابراین در انتخاب دامنه و فرکانس ارتعاشی باید معادله زیر نیز حاکم باشد:

$$\tilde{v} > v_c \rightarrow 2\pi a \cdot f > \frac{\pi \cdot d \cdot N}{60}, \quad (6)$$

$$h = \frac{Nuk_{co}}{L}, \quad (14)$$

که در آن، $k_{co} = 0.2585 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$ هدایت گرمایی هوای خشک و L طول سطوح همرفتی (سطح بالای قطعه کار و سطح آزاد و براده ابزار) و Nu برابر عدد ناسلت (Nusselt) که برای ماشینکاری خشک از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$Nu = 0.664 \text{ Pr}^{\frac{1}{3}} \text{ Re}^{\frac{1}{2}}, \quad (15)$$

که $\text{Pr} = 0.709$ عدد پرانتل^۱ برای هوای خشک بوده و Re عدد رینولدز است و از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\text{Re} = \frac{\rho_{air} V \infty L}{\mu_{air}}, \quad (16)$$

که در آن، $V \infty$ سرعت جریان آزاد هوا نسبت به ابزار و براده است، این مقدار برای سطح براده در CT و UAT برابر سرعت برشی (V_c) و برای سطح آزاد و براده ابزار در حالت CT برابر صفر و در حالت UAT برابر با سرعت متوسط ارتعاشی آن است. $\rho_{air} = 1.197 \text{ kg/m}^3$ چگالی هوا و $\mu_{air} = 1.812 \times 10^{-4} \text{ s/mm}^2$ ویسکوزیته دینامیکی هوا در دمای 20°C درجه سانتی‌گراد است [۲۳]. مقدار متوسط ضریب همرفت حرارتی هوا (h) حاصل از معادلات بالا، در دمای 20°C درجه سانتیگراد برای سطح آزاد براده قطعه کار و سطوح ابزار (تنها برای حالت UAT) در سرعت دورانی و دامنه و فرکانس ارتعاشی مختلف و با جایگذاری روابط بالا در جدول‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

جدول (۲): ضریب همرفت حرارتی سطح آزاد قطعه کار.

سرعت دورانی (rpm)	$h \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{C}^\circ))$
۵۰	۳۰/۶۷
۶۵	۳۴/۳۴۹۷
۸۰	۳۸/۸۰

جدول (۳): ضریب همرفت حرارتی سطوح ابزار.

دامنه (μm) و فرکانس (kHz)	$h \text{ (W/(m}^2 \cdot \text{C}^\circ))$
$f=20 \text{ kHz}$ - $a=6 \mu\text{m}$	۱۳۲/۴۶
$f=23/333 \text{ kHz}$ - $a=6 \mu\text{m}$	۱۶۹/۳۶
$f=20 \text{ kHz}$ - $a=8 \mu\text{m}$	۱۵۲/۹۲
$f=25 \text{ kHz}$ - $a=8 \mu\text{m}$	۱۷۰/۳۴
$f=20 \text{ kHz}$ - $a=10 \mu\text{m}$	۱۷۰/۹۷

۲-۵- ضریب اصطکاک

برای استخراج ضریب اصطکاک مورد نیاز در شبیه‌سازی المان محدود می‌بایست نیروهای ماشینکاری اندازه‌گیری شوند. در تحقیق حاضر با توجه به اینکه شبیه‌سازی تراشکاری به صورت

در این رابطه، f_w فاکتور وزن برای توزیع گرما مابین سطوح بر خوردی بوده و q_c و q_t شار گرمایی وارد شده به سطح براده و ابزار است که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود. کسر انرژی گرمایی هدایت شده به براده نیز از رابطه (۱۱) حاصل می‌شود. همچنین مقادیر E_c (انرژی گرمایی هدایت شده به براده) و E_t (انرژی گرمایی هدایت شده به ابزار) از رابطه (۱۲) حاصل می‌شوند [۲۰]:

$$f_w = \frac{E_c}{E_t + E_c}, \quad (11)$$

$$E_t = \sqrt{k_t \rho_t C_{pt}} \quad E_{ch} = \sqrt{k_c \rho_c C_{pc}}. \quad (12)$$

که در آن، k_c هدایت گرمایی براده برحسب $\text{W/(m}^\circ\text{C)}$ ، ρ_c چگالی براده برحسب kg.m^{-3} و C_{pc} ظرفیت گرمایی ویژه براده بر حسب $\text{J/g}^\circ\text{C}$ ، k_t هدایت گرمایی ابزار، ρ_t چگالی ابزار و ظرفیت گرمایی ویژه ابزار مطابق جدول ۱ می‌باشد که با جایگذاری مقادیر مذکور، مقدار $f_w = 0.65$ برای شبیه‌سازی قطعه کار آلومینیمی و ابزار کاربیدی حاضر، حاصل می‌شود.

جدول (۱): خواص مواد ابزار و قطعه کار [۲۱ و ۲۲].

Al7075-T6	Carbide-TiN	علائم	خواص
۲۸۱۰	۵۴۰۰	$\rho \text{ (kg.m}^{-3})$	چگالی
۰/۳۳	۰/۲۵	ν	ضریب پواسون
۷۱/۷	۲۵۰	E (Gpa)	مدول ینگ
۱۳۰	۲۳	$k \text{ (W.m}^{-1} \cdot \text{C}^\circ^{-1})$	هدایت گرمایی
۰/۹۶	۰/۷۷۵	$C \text{ (J.gr}^{-1} \cdot \text{C}^\circ^{-1})$	گرمای ویژه
۲۳/۶	۹/۴	$Ex \text{ (}\mu\text{m.m}^{-1} \cdot \text{C}^\circ^{-1})$	ضریب انبساط
۵۸۰	۲۹۵۰	$\theta_m \text{ (C}^\circ)$	دمای ذوب

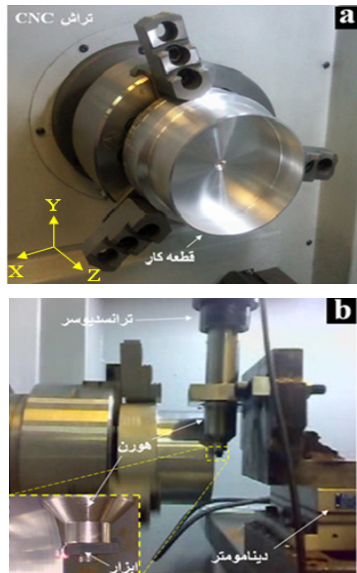
از عوامل خنک‌کاری با توجه به اینکه ماشینکاری از نوع خشک است، می‌توان به انتقال حرارت همرفت سطوح تماسی ابزار و قطعه کار با هوا به علت داشتن سرعت نسبی، نام برد بنابراین شار گرمایی روی سطوح در طی همرفت از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$q = -h (\theta - \theta^\circ), \quad (13)$$

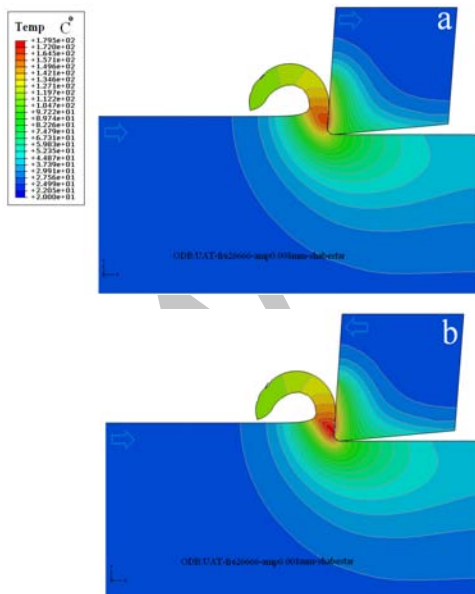
که در آن، h ضریب همرفت (هوا) برحسب $\text{W/(m}^2 \cdot \text{C}^\circ)$ که از رابطه (۱۴) حاصل می‌شود. θ° دمای خنک‌کار (هوا) برابر 20°C و θ دمای هر نقطه در سطح همرفت برحسب $^\circ\text{C}$ که توسط نرم‌افزار محاسبه می‌شود.

1- Prandtl Number

بیشینه دمای نوک ابزار در حالت CT تقریباً ثابت می‌ماند و این در صورتی است که در UAT هنگام نفوذ ابزار به قطعه‌کار به علت وارد شدن انرژی جنبشی ابزار و افزایش تنش‌های تماسی، بیشینه دمای ابزار افزایش (C ۱۷۹ شکل ۴- b) و در هنگام جدایش (C ۱۶۱ شکل ۴- a) کاهش می‌یابد.



شکل (۳): (a) قطعه کار تیوب تراشی و (b) چیدمان مجموعه UAT.



شکل (۴): کانتورهای دمایی شبیه‌سازی FE در $0.3/0$ ثانیه پس از شروع ماشینکاری، ابزار کاربیدی و قطعه‌کار Al7075-T6 در سرعت دورانی ثابت $N=50$ rpm، عمق برش $a_p=3$ mm با نرخ پیشروی $a_f=0.1$ mm/rev، فرکانس $f=25000$ Hz و دامنه $a=10$ μ m (a) لحظه جدایش ابزار با قطعه کار و (b) لحظه درگیری ابزار با قطعه کار.

متعامد دو بعدی است در نتیجه برای حذف نیرو در راستای شعاعی، از تیوب تراشی مطابق شکل ۳ استفاده شده تا مؤلفه نیرو در راستای سوم نزدیک به صفر باشد. قطعه‌کار از جنس Al7075-T6 به قطر خارجی ۱۳۳mm و ضخامت ۳mm و ابزار اینسرتی VBMT 160404 از جنس کاربید-تیتانیوم نیتراید، به هورن و مجموعه ترانسدیوسر متصل شده است. این همان ابزاری است که در شبیه‌سازی به کار برده شد. همچنین از دینامومتر KISTLER- 9257BA برای اندازه‌گیری نیروهای ماشینکاری استفاده شده است. مقدار ضریب اصطکاک از رابطه زیر حاصل می‌شود [۲۴]:

$$\mu = \frac{F_z + F_y \tan \alpha}{F_z - F_y \tan \alpha}, \quad (17)$$

که در آن، F_z نیروی محوری، F_y نیروی مماسی وارد بر سطح براده ابزار و α زاویه براده ابزار است. نیروهای ماشینکاری و ضرایب اصطکاک در سرعت‌های دورانی و نرخ پیشروی مختلف مطابق جدول ۴ استخراج شده است.

جدول (۴): نیروهای تیوب تراشی حاصل از دینامومتر جهت استخراج ضریب اصطکاک.

نرخ پیشروی f(mm/rev) سرعت دورانی N(rpm)	F_y (N)	F_z (N)	μ
N=50 - f=0.1	۲۳۰۰	۳۹۵	۰/۲۴۴
N=65 - f=0.1	۲۴۵۰	۴۱۵	۰/۲۴۲
N=80 - f=0.1	۲۷۰۰	۴۴۵	۰/۲۳۷
N=50 - f=0.2	۴۰۰۰	۶۴۰	۰/۲۳۲
N=65 - f=0.2	۴۲۵۰	۶۷۵	۰/۲۳۱
N=80 - f=0.2	۴۵۳۰	۷۱۰	۰/۲۳۰

با فرض اینکه ضریب اصطکاک تنها به طبیعت و خواص تماسی دو سطح ابزار و قطعه‌کار وابسته است و صرف‌نظر کردن از سرعت نسبی بین ابزار و قطعه‌کار، مقدار متوسط $\mu=0.24$ برای ورودی شبیه‌سازی حاصل شده است.

۳- نتایج و بحث

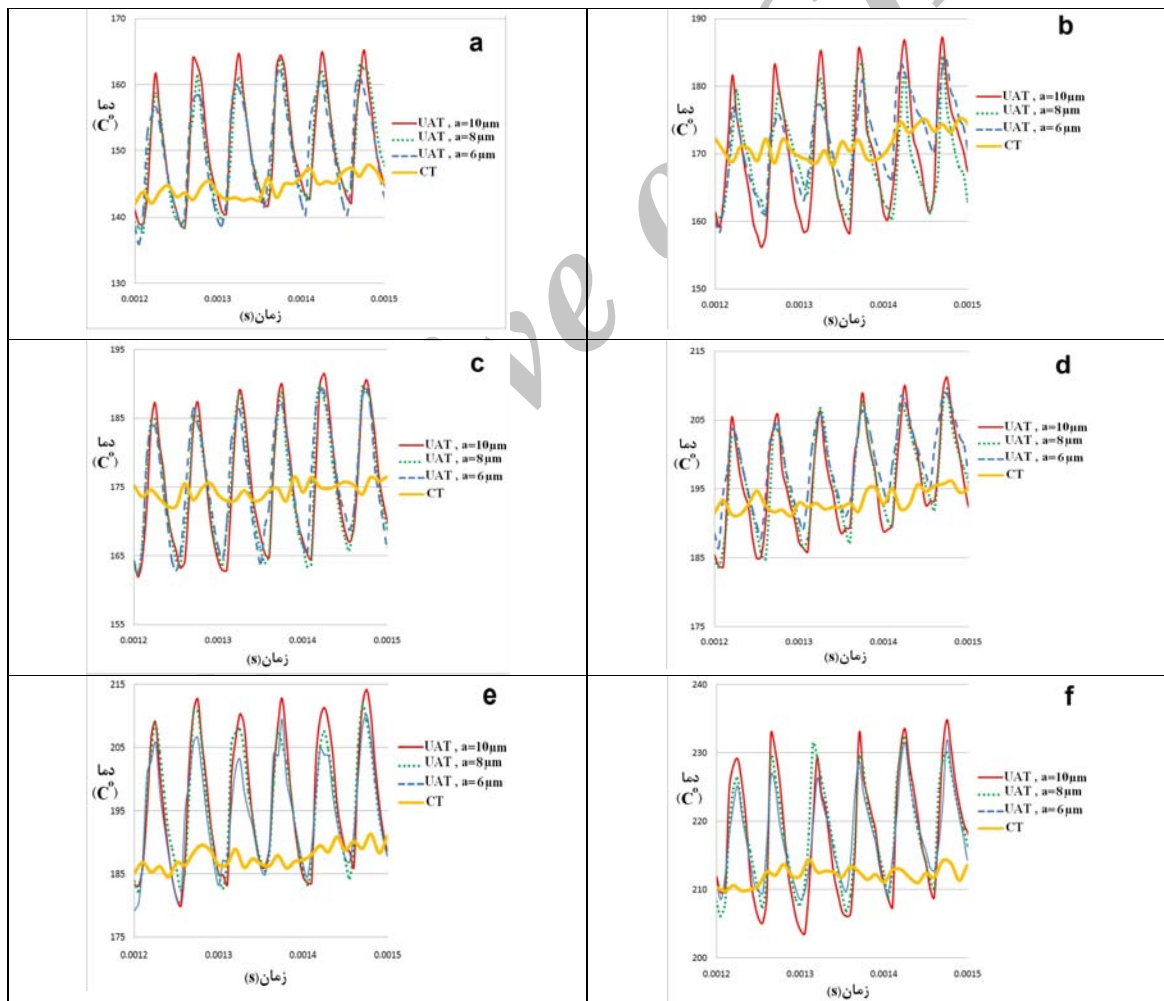
شکل ۴ یک نمونه از کانتورهای دمایی تحلیل المان محدود تراشکاری ارتعاشی را نشان می‌دهد، بیشینه دمای ابزار، کمی بالاتر از نوک آن روی سطح براده رخ می‌دهد و دما در نوک ابزار با گرادین دمای بالا به حالت پایدار خود رسیده است (در 0.012 ثانیه). این در حالی است که پای ابزار به علت اتلاف گرما و خنک‌کاری هوا، افزایش دمای بسیار کمتری دارد.

لحظه درگیری و جدایی ابزار از قطعه کار افزایش می‌یابد. لازم به ذکر است که میانگین افزایش دما در UAT بیشتر از CT است. برای مقایسه میزان تأثیر دامنه و فرکانس ارتعاشی روی افزایش دما، با انتخاب مقدار ثابتی برای سرعت بحرانی ارتعاشی $(\tilde{v} = 1256 \text{ mm/s})$ که وابسته خطی به هر دو پارامتر ارتعاشی دارد، ۳ حالت زیر با دامنه و فرکانس‌های متفاوت برای شبیه‌سازی انتخاب شده است.

حالت اول (دامنه ۱۰ m با فرکانس ارتعاشی ۲۰ kHz)، حالت دوم (دامنه ۸ m با فرکانس ارتعاشی ۲۵۰۰ Hz) و حالت سوم (دامنه ۶ m با فرکانس ارتعاشی ۳۳۳۳ Hz) که مطابق شکل ۶ در سرعت ارتعاشی یکسان برای گریز از افزایش حرارت می‌بایست از دامنه ارتعاشی پایین و فرکانس ارتعاشی بالا بهره برد.

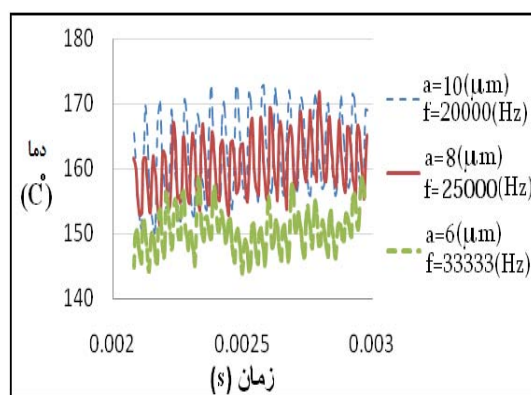
نکته قابل توجه این است که در ماشینکاری خشک، به علت نبود مایع خنک‌کار و عدم نفوذ آن بین ابزار و براده، دمای ابزار در نقطه انتهایی برگشت کمی کمتر از حالت CT است، این در حالی است که بیشینه نفوذ ابزار به قطعه کار، اختلاف دمایی بالاتری با حالت CT دارد. این اختلاف حرارت قابل توجه در حالت رفت و برگشتی ابزار با وجود اینکه در ناحیه کوچک تماسی ابزار با قطعه کار رخ می‌دهد، ولی باعث افزایش سرعت سایش ابزار و تغییرات کریستالی در آن می‌شود.

برای مشاهده تأثیر تغییرات دامنه ارتعاشی روی بیشینه دمای ابزار با ثابت نگه داشتن سایر پارامترهای ماشینکاری و فرکانس ارتعاشی در دامنه‌های مختلف، تحلیل صورت گرفته است. بر طبق شکل ۵ نتایج حاکی از این است که با افزایش دامنه ارتعاشی، بیشینه دمای نوک ابزار و اختلاف دمای ابزار در



شکل ۵: بیشینه دمای ابزار در عمق برش ۳ mm و فرکانس ارتعاشی ۲۰ kHz و در دامنه‌های ارتعاشی $(a, a=10 \mu\text{m}, a=8 \mu\text{m}, a=6 \mu\text{m})$ سرعت برشی ۳۴۰/۳ mm/s و نرخ پیشروی ۰/۱ mm/rev (b) سرعت برشی ۳۴۰/۳ mm/s و نرخ پیشروی ۰/۱ mm/rev (c) سرعت برشی ۴۴۲/۴ mm/s و نرخ پیشروی ۰/۲ mm/rev (d) سرعت برشی ۴۴۲/۴ mm/s و نرخ پیشروی ۰/۱ mm/rev (e) سرعت برشی ۵۴۴/۵ mm/s و نرخ پیشروی ۰/۱ mm/rev (f) سرعت برشی ۵۴۴/۵ mm/s و نرخ پیشروی ۰/۲ mm/rev

2. Kumabe, J. and Masuko, M. "Study on the Ultrasonic Cutting", Trans. JSME, Vol. 24, No. 1, pp. 109-114, 1958.
3. Kumabe, J. and Taniguchi, O. "Dynamical Analysis of Vibration Cutting", Bull. Jpn. Soc. Prec. Eng. Vol. 5, No. 3 pp. 73-74, 1971.
4. Babitsky, V.I., Kalashnikov, A.N., and Meadows, A. "Ultrasonically Assisted Turning of Aviation Materials", J. of Materials Proc. Tech., Vol. 132, No. 1, pp. 157-167, 2003.
5. Babitsky, V.I., Kalashnikov, A.N., and Molodtsov, F.V. "Autoresonant Control of Ultrasonically Assisted Cutting", Mechatronics, Vol. 14, No. 1, pp. 91-114, 2004.
6. Ahmed, N., Mitrofanov, A.V., Babitsky, V.I., and Silberschmidt, V.V. "Analysis of Material Response to Ultrasonic Vibration Loading in Turning Inconel 718", Materials Sci. and Eng: A, Vol. 424, No. 1, pp. 318-325, 2006.
7. Chandra, N. and Rahman, M. "A Study on Ultrasonic Vibration Cutting of Low Alloy Steel", J. of Materials Proc. Tech., Vol. 192-193, No. 7, pp. 159-165, 2007.
8. Chandra, N. and Rahman, M. "Effect of Machining Parameters in Ultrasonic Vibration Cutting", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol.48, No. 9, pp. 965-974, 2008.
9. Mackerle, J. "Finite-Element Analysis and Simulation of Machining: A Bibliography (1976-1996)", J. of Materials Proc. Tech. Vol. 86, No. 1, pp. 17-44, 1999.
10. Mackerle, J. "Finite Element Analysis and Simulation of Machining: an Addendum a Bibliography (1996-2002)", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 43, No. 1, pp. 103-114, 2003.
11. Zhang, L. "On the Separation Criteria in the Simulation of Orthogonal Metal Cutting Using the Finite Element Method", J. of Materials Proc. Tech. Vol. 89-90, No. 1, pp. 273-278, 1999.
12. Monaghan, J. and Macginley, T. "Modelling the Orthogonal Machining Process Using Coated Carbide Cutting Tools", Computational Materials Sci., Vol. 16, No. 1, pp. 275-284, 1999.
13. Lei, S., Shin, Y.C., and Incropera, F.P. "Thermo-Mechanical Modeling of Orthogonal Machining Process by Finite Element Analysis", Int. J. of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, No. 5, pp. 731-750, 1999.
14. Movahhedy, M., Gadala, M.S., and Altintas, Y. "Simulation of the Orthogonal Metal Cutting Process Using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian Finite-Element Method", J. of Materials Proc. Tech., Vol. 103, No. 2, pp. 267-275, 2000.
15. Ceretti, E., Lazzaroni, C., Menegardo, L., and Altan, T. "Turning Simulations Using a Three-Dimensional FEM Code", J. of Materials Proc. Tech., Vol. 98, No. 1, pp. 99-103, 2000.
16. Amini, S., Soleimani-Mehr, H., Nategh, M.J. Abudollah, A., and Sadeghi, M.H. "FEM Analysis of Ultrasonic-Vibration-Assisted Turning and



شکل (۶): بیشینه دمای ابزار در فرآیند UAT با سرعت

دورانی $N=50$ rpm، نرخ پیشروی $a_f = 0.1$ mm/rev در 3

حالت، ۱- دامنه ارتعاشی $a=10\mu\text{m}$ با فرکانس $f=20\text{kHz}$ ،

۲- دامنه $a=8\mu\text{m}$ با فرکانس $f=25000\text{Hz}$

و ۳- دامنه $a=6\mu\text{m}$ با فرکانس $f=33333\text{Hz}$

۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر از روش المان محدود به منظور بررسی فرآیند پیچیده تراشکاری به کمک ارتعاشات آلتراسونیک و پیش بینی و بررسی دمای واقعی سر ابزار استفاده شده است. ابزار از نظر دمایی غیرصلب در نظر گرفته شده و از طرفی مرتعش شده است. همچنین در این تحقیق شان داده شد که در فرآیند UAT با نفوذ ابزار به قطعه کار، دمای ابزار به طور متوسط ۹٪ افزایش و در حالت برگشت از آن ۲٪ کاهش می یابد ولی در کل میانگین بیشینه دما ۷٪ بیشتر از CT است. با افزایش دامنه و فرکانس ارتعاش، سرعت پیشروی و سرعت برشی، اختلاف دمای بین افزایش و کاهش حالت درگیری و جدایش ابزار نیز افزایش می یابد. علت افزایش دما هنگام درگیری ابزار در UAT، وارد شدن انرژی ارتعاشی ابزار به ناحیه برش و افزایش سرعت برشی لحظه ای ابزار است. از طرفی، کاهش دما در پیک برگشت حاصل جدایش لحظه ای ابزار از قطعه کار است و در نهایت هنگامی که سرعت ارتعاشی ابزار ثابت باشد، به کارگیری دامنه ارتعاش پائین و فرکانس بالا حرارت کمتری را ایجاد می کند.

۵- مراجع

1. Nategh, M.J., Amini, S., Soleimanimehr, H., Abdullah, A., and Sadeghi, M.H. "A Machining Force Model Developed for Ultrasonic Vibration-Assisted Turning, through Statistical Analysis of Influential Parameters", Mech. & Aerospace Eng. J., Vol. 4, No. 4, pp. 83-91, 2009.

20. Hibbitt, Karlsson, and Sorenson "Inc. ABAQUS Theory and Users' Manuals", V. 6.9, Providence, RI, 2008.
21. ASM Metals Handbook Vol. 2. "Properties and Selection Nonferrous Alloy and Special Purpose Materials", 1992.
22. ASM Metals Handbook Vol. 16, "Machining", 1992.
23. Incropera, F.P., and Wewitt, D.P. "Introduction to Heat Transfer" Fifth Ed., John Wiley & Sons Inc., U.S.A-2007
24. Razfar, M.R. "Metal Cutting Principles and Cutting Tool Recognition", Published by Amirkabir Univ., 2005 (In Persian).
- Vibratory Tool", J. of Materials Proc. Tech., Vol. 201, No. 1, pp. 43-47, 2008.
17. Mitrofanov, A.V., Babitsky, V.I., and Silberschmidt, V.V. "Thermomechanical Finite Element Simulations of Ultrasonically Assisted Turning", Computational Materials Sci., Vol. 32, No. 3, pp. 463-471, 2005.
18. Pujana, J., Rivero, A., Celaya, A., and Lopez, L.N. "Analysis of Ultrasonic-Assisted Drilling of Ti6Al4V", Int. J. of Machine tools & Manufacture, Vol. 49, No. 6, pp. 500-50, 2009.
19. Brar, N. "Constitutive Model Constants for Al7075-T651 and Al7075-T6", SHOCK 09 Meeting of the American Physical Society, 2009.

Archive of SID