



Numerical Analysis of Direct Aged 718 Inconel Alloy Turning Using Power Law Equation



ARTICLE INFO

Authors

Rahmani.AS¹,
Hadad.MJ^{1*},
Ebrahimi.SM¹

¹ School of Mechanical Engineering,
College of Engineering, University of
Tehran, Tehran, Iran

* Correspondence

Address:
mjhadad@ut.ac.ir

How to cite this article

Author A, Author B. Numerical Analysis of Direct Aged 718 Inconel Alloy Turning Using Power Law Equation. Modares Mechanical Engineering. Proceedings of 2nd Iranian National Conference on Advanced Machining and Machine Tools.2022;22(10):19-24.

ABSTRACT

Nowadays, Inconel superalloys are often used in various industries due to their extraordinary properties. Some unique properties of Inconel, such as maintaining its yield strength at elevated temperatures, very low thermal conductivity, and high abrasion resistance, provide very difficult to cut conditions for machining this superalloy. This paper presents a method for simulating the direct aged Inconel 718 superalloy turning by using the power law equation based on the finite element method. One of the main objectives of this research is the correct determination of material properties based on power law equation such as strain hardening coefficients, strain rate sensitivity coefficient, thermal softening coefficients, and other coefficients required to simulate direct aged Inconel 718. The simulation results, such as shear plane angle, machining forces, chip temperature, and tool and chip shape, have been validated by reference [1]. This study, similar to [1], has been studied at three different undeformed chip thicknesses to examine the deformed chip thicknesses and other machining outputs such as machining forces using the power law equation. Third wave Systems-AdvantEdge software has been used for the current study. The output of this study has been investigated with the results of experimental research [1] and shows the high efficiency and accuracy of the present analysis.

Keywords Turning, Finite Elements Method, Power Law, Inconel 718

ماهانامه علمی مهندسی مکانیک مدرس، ویژه نامه مجموعه مقالات دومین کنفرانس ملی ماشین‌کاری و ماشین‌های ابزار پیشرفته.
مهر ۱۴۰۱، دوره ۲۲، شماره ۱۰، صفحه ۱۹-۲۴.



تحلیل عددی تراشکاری اینکونل ۷۱۸ مستقیماً پیرسازی شده با استفاده از معادله ساختاری توانی



چکیده

امروزه سوپر آلیاژهای اینکونل به دلیل خواص خارق‌العاده آن‌ها در صنایع مختلفی استفاده می‌شوند. برخی از خصوصیات ویژه اینکونل نظیر حفظ استحکام تسلیم در دماهای بالا، ضریب رسانش حرارتی بسیار پایین و مقاومت سایشی بالا، شرایط سختی را برای ماشین‌کاری این سوپر آلیاژ فراهم می‌کند. این مقاله، بر اساس روش اجزاء محدود، روشی را برای شبیه‌سازی تراشکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ مستقیماً پیرسازی شده به کمک معادله ساختاری توانی ارائه می‌کند. تعیین درست خواص مواد بر اساس معادله ساختاری توانی نظیر تعیین ضرایب سخت‌شوندگی کرنشی، ضریب نرخ حساسیت به کرنش و ضرایب نرم‌شوندگی حرارتی در کنار دیگر ضرایب مورد نیاز برای شبیه‌سازی تراشکاری سوپر آلیاژ اینکونل ۷۱۸ مستقیماً پیرسازی شده از اهداف اصلی این پژوهش است. نتایج خروجی شبیه‌سازی نظیر زاویه صفحه برشی، نیروهای ماشین‌کاری، دمای براده و ابزار و شکل براده با خروجی نتایج مرجع [1] صحت‌سنجی شده است. این پژوهش، به صورت مشابه با مقاله [1] در سه ضخامت براده تغییر شکل نیافته متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است تا ضخامت شکل براده تغییر شکل یافته و دیگر خروجی‌های ماشین‌کاری نظیر نیروهای ماشین‌کاری با بهره از معادله ساختاری توانی مورد بررسی قرار بگیرد. برای شبیه‌سازی از نرم‌افزار Third wave Systems- AdvantEdge بهره برده شده است. خروجی این مطالعه، با نتایج تحقیق تجربی [1] بررسی شده است و نشان دهنده کارایی و دقت بالای تحلیل حاضر می‌باشد.

مشخصات مقاله

نویسنده‌ها

امیرسجاد رحمانی^۱
محمدجعفر حداد^{۱*}
سید محمد ابراهیمی^۱

^۱ دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه
تهران، تهران، ایران

* نویسنده مسئول

آدرس:
mjhadad@ut.ac.ir

۱- مقدمه

خانواده آلیاژهای اینکونل، کاربرد بسیار زیادی در صنعت هوا و فضا دارند. از ویژگی‌های منحصربه‌فرد آن‌ها می‌توان به مقاومت خزشی بسیار بالا، رسانش حرارتی بسیار پایین، مقاومت خوردگی بالا و مقاومت سایشی بالا اشاره کرد که مجموع این ویژگی‌ها شرایط بسیار سختی را برای ماشین‌کاری خانواده این سوپر آلیاژ فراهم می‌کند^[2]. این آلیاژ جزء مواد بسیار سخت تراش دسته‌بندی می‌شود و در ماشین‌کاری این آلیاژ به دلیل رسانش حرارتی بسیار کم، به صورت موضعی دمای ابزار در سطح براده بالا می‌رود و سایش ابزار سرعت می‌گیرد^[2].

خانواده آلیاژهای اینکونل، به دلیل اینکه جزء مواد سخت ماشین‌کاری شونده قرار می‌گیرند و هزینه بالایی را به دلیل سایش و شکست در هنگام ماشین‌کاری تحمیل می‌کنند، با کمک شبیه‌سازی عددی می‌توان نیروهای ماشین‌کاری، شکل براده و پارامترهای دیگر ماشین‌کاری را بدون هزینه‌های اضافی تعیین کرد^[2].

اخیراً محققین زیادی، معادلات ساختاری جدیدی را جهت بهبود کارایی مدل ساختاری جانسون کوک^[3] ارائه کرده‌اند و نتایج شبیه‌سازی قابل قبول‌تری نسبت به مدل جانسون کوک به دست آورده‌اند. به طور مثال، کالاماز و همکاران^[4] با مطالعه روی ماشین‌کاری دوبعدی Ti6Al4V، معادله ساختاری جدیدی بنام تانژانت هایپربولیک ارائه کردند. مجدداً اوزل و همکاران^[5] با مطالعه عمیق‌تر بر کار کالاماز و همکاران، با تغییرات بیشتر معادله جانسون کوک، معادله ساختاری جدیدی به نام معادله جانسون کوک اصلاح شده ارائه کردند.

پاواده و همکاران^[6] یک رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه به منظور بهینه‌سازی هم‌زمان زبری سطح و نیروهای برش در تراشکاری اینکونل ۷۱۸ با سرعت بالا را پیشنهاد نمودند. آنها در این تحلیل از استراتژی تاگوچی استفاده کرده و رابطه خاکستری تاگوچی را به کار بردند. مطالعات آنها نشان می‌دهد که عمق برش تأثیر چشمگیری در این عملکرد دارد.

ملک‌زادی و همکاران^[7] مشابه پژوهش دای^[8] و نیز لورنزون^[9]، با بررسی تأثیر سرعت برشی بر عمق ضخامت براده دندان اهرای اینکونل ۷۱۸ نتیجه گرفتند که یک سرعت بحرانی‌ای برای ایجاد براده دندان اهرای مواد سخت تراش نظیر اینکونل ۷۱۸ و نیز Ti6Al4V وجود دارد. آن‌ها همچنین نتیجه گرفتند که افزایش سرعت برشی منجر به افزایش عمق دندان‌های براده تغییر شکل یافته حین ماشین‌کاری می‌شود.

پریدا و همکاران^[10] طی پژوهش خود بیان کردند که پیش گرم اینکونل ۷۱۸ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد، باعث کاهش انرژی مخصوص ماشین‌کاری می‌شود.

ونگ و همکاران^[11] با بررسی تأثیر سرعت برشی بر مورفولوژی براده، عنوان کردند وقتی سرعت برشی از یک حدی بیشتر شود، آن قدر عمق براده دندان اهرای زیاد می‌شود که براده‌ها به صورت منقطع شده درمی‌آیند.

ابراهیمی و همکاران^[12] با بیان اینکه مدل توانی، قسمت نرم شوندگی حرارتی را بهتر از معادله جانسون کوک پیش‌بینی می‌کند، با معادله توانی به جواب دقیقی از شکل براده رسیده‌اند. به عبارت دیگر، از اشکالات اساسی معادله ساختاری جانسون کوک می‌توان به عدم پیش‌بینی درست نرم شوندگی حرارتی اشاره کرد؛ معادله جانسون کوک این ناحیه را به صورت خطی پیش‌بینی می‌کند که باعث ایجاد مقداری خطا در پیش‌بینی نتایج نظیر شکل براده شود. در مطالعه^[1] درواقع با در نظر گرفتن شکل، نوع براده و نیروها به عنوان قید مسئله بهینه‌سازی و در نظر گرفتن پارامترهای ورودی ماشین‌کاری نظیر ضریب اصطکاک، ضرایب ساختاری معادله جانسون کوک به عنوان متغیر مسئله، یک بهینه‌سازی چند متغیره را انجام دادند و به بهینه‌ترین حالت پارامترهای مسئله برای پیش‌بینی خروجی‌های شبیه‌سازی به کمک معادله جانسون کوک دست یافتند.

یکی از مزیت‌های مهم معادله ساختاری توانی، پیش‌بینی درست ناحیه نرم‌شوندگی حرارتی است^[12]. بدین جهت، در این مطالعه از معادله توانی برای شبیه‌سازی روش اجزاء محدود بهره برده شده است.

طبق بررسی پژوهش‌های گذشته، یک خلأ تحقیقاتی در زمینه شبیه‌سازی تراشکاری متعامد اینکونل ۷۱۸ مستقیماً پیرسازی شده به کمک معادله ساختاری توانی مشاهده شد؛ بنابراین می‌توان گفت بررسی تراشکاری متعامد اینکونل ۷۱۸ مستقیماً پیرسازی شده به کمک معادله ساختاری توانی، به عنوان مدل ساختاری جدیدی که می‌تواند بهتر از معادله ساختاری جانسون کوک عمل کند، ضروری است.

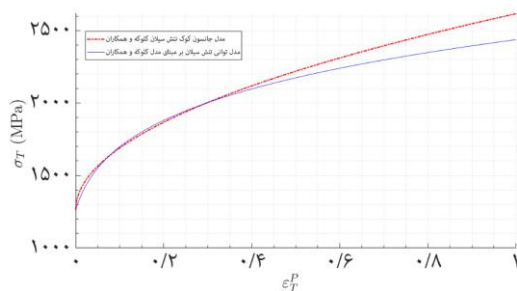
در این تحقیق، شبیه‌سازی تراشکاری متعامد حالت خشک، در دمای اتاق، بر روی اینکونل ۷۱۸ مستقیماً پیرسازی شده انجام شده است و در انتها شکل براده، دمای براده، نیروی برشی، زاویه صفحه برشی با مقاله^[1] صحت‌سنجی شده است.

۲- مدل‌سازی برش و پارامترهای ماشین‌کاری

مطابق با مقاله^[1]، از ابزار برش کاربیدی H13A با زاویه براده ۸ درجه و نیز زاویه آزاد ۷ درجه استفاده شده است. شعاع لبه برشی برابر با ۴/۸ میکرومتر در نظر گرفته شده است. دیگر پارامترهای ماشین‌کاری نظیر سرعت برشی که در این مطالعه بکار برده شده‌اند را در جدول ۱ می‌توان مشاهده کرد.

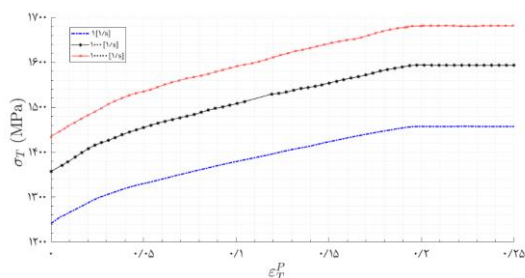
جدول ۱) پارامترهای ماشین‌کاری

V_c (m/min)	f (mm/rev)	a_p (mm)	μ
۴۰	۰/۰۲	۰/۰۵	۰/۱
		۳	۰/۳۶

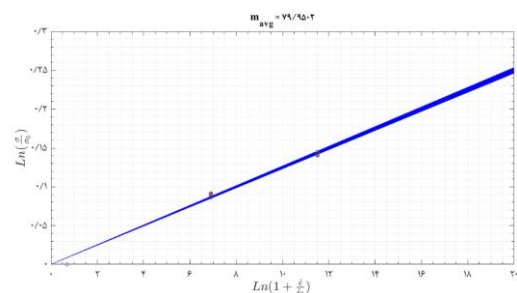


شکل (۱) برازش منحنی سخت‌شوندگی کرنشی توانی بر منحنی بر سخت‌شوندگی کرنشی جانسون کوک مقاله [1]

برای محاسبه میزان حساسیت به نرخ کرنش یا قسمت دوم از رابطه توانی $(\Gamma(\dot{\epsilon}))$ ، از نتایج پژوهش احمد و همکاران [14] استفاده شد (شکل ۲). این تنش‌های سیلان اینکونل ۷۱۸ در نرخ‌های کرنش مختلف، نزدیک‌ترین مراجع موجود فعلی از لحاظ استحکام تسلیم به مقاله [1] بودند. برای افزایش دقت محاسبه، کد متلبی نوشته شد که ابتدا با درون‌یابی نقاط نمودار شکل ۲، برای تمام کرنش‌ها، رابطه $(\Gamma(\dot{\epsilon}))$ را حساب می‌کند. برای ۱۰۰ کرنش مختلف از ابتدا تا انتهای شکل ۲، مقدار حساسیت به کرنش برابر ۷۵/۹۵۰ به دست آمد (شکل ۳).



شکل (۲) نمودار تنش حقیقی و کرنش پلاستیک حقیقی در نرخ کرنش‌های مختلف [14]



شکل (۳) میزان حساسیت به کرنش اینکونل ۷۱۸

برای محاسبه ضرایب چندجمله‌ای نرم‌شوندگی حرارتی معادله توانی (رابطه ۴)، از مرجع [15] استفاده شد. مطابق مرجع [16] که نمودار نرم‌شوندگی حرارتی آن نیز مطابقت کامل با مرجع [15] شده داشت، حد نهایی برای نرم‌شوندگی حرارتی اینکونل برابر با ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در نظر گرفته شد.

۳- معادله ساختاری توانی برای اینکونل ۷۱۸ مستقیماً پیرسازی شده

معادله توانی طبق رابطه ۱ از سه قسمت سخت‌شوندگی کرنشی $(g(\dot{\epsilon}^P))$ ، اثر حساسیت نرخ کرنش بر تنش سیلان $(\Gamma(\dot{\epsilon}))$ و نرم‌شوندگی حرارتی $(\theta(T))$ تشکیل شده است.

$$\sigma(\dot{\epsilon}^P, \dot{\epsilon}, T) = g(\dot{\epsilon}^P) \times \Gamma(\dot{\epsilon}) \times \theta(T) \quad (1)$$

قسمت سخت‌شوندگی کرنشی که تنش سیلان قطعه را برحسب کرنش پلاستیک حقیقی بیان می‌کند، طبق رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$g(\dot{\epsilon}^P) = \sigma_0 \times (1 + \frac{\dot{\epsilon}^P}{\dot{\epsilon}_0^P})^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

که در آن σ_0 ، استحکام تسلیم، $\dot{\epsilon}^P$ کرنش پلاستیک، $\dot{\epsilon}_0^P$ کرنش پلاستیک مرجع و $\frac{1}{n}$ توان کرنش سختی است که از طریق برازش منحنی به دست می‌آیند.

میزان حساسیت ماده به نرخ کرنش از طریق رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$\Gamma(\dot{\epsilon}) = (1 + \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})^{\frac{1}{m_{ave}}} \quad (3)$$

که در آن $\dot{\epsilon}$ ، نرخ کرنش پلاستیک، $\dot{\epsilon}_0$ نرخ کرنش پلاستیکی مرجع و m_{ave} ضریب حساسیت به نرخ کرنش است.

در معادله ساختاری توانی، کاهش استحکام ماده در دماهای مختلف، به‌صورت تابعی از $\theta(T)$ مطابق با رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$\theta(T) = C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + C_4T^4 + C_5T^5; T < T_{cutoff} \quad (4)$$

$$\theta(T) = \theta(T_{cutoff}) \times \left(1 - \frac{T - T_{cutoff}}{T_{melt} - T_{cutoff}}\right); T \geq T_{cutoff}$$

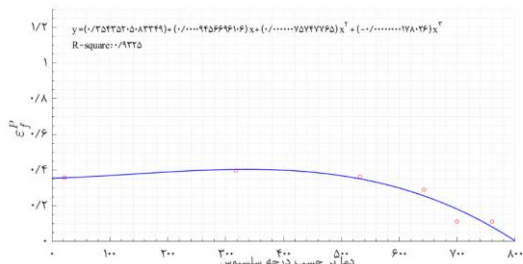
ضرایب C_0 تا C_5 از طریق برازش منحنی از دمای اتاق (T_{rt}) تا دمای T_{cutoff} به دست می‌آیند. بعد از دمای T_{cutoff} تا دمای ذوب (T_{melt})، استحکام ماده به‌صورت خطی کاهش می‌یابد.

مطابق پژوهش یو و همکاران [13]، می‌توان نتیجه گرفت که قسمت سخت‌شوندگی کرنشی در معادله‌ی جانسون کوک اساسی‌ترین قسمت در تعیین نیروهای برشی و دمای براده دارد. به‌طور مشابه می‌توان نتیجه گرفت که قسمت $(g(\dot{\epsilon}^P))$ در رابطه ۱، از تأثیرگذارترین پارامترهای معادله‌ی ساختاری توانی است؛ بدین جهت به دلیل اینکه مقاله [1]، مقادیر جانسون کوک آن توسط بهینه‌سازی به‌دست‌آمده است، می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر انتخاب شده برای پارامترهای جانسون کوک آن در بهینه‌ترین حالت ممکن هستند، برای محاسبه‌ی قسمت اول فرمول معادله ساختاری توانی $(g(\dot{\epsilon}^P))$ ، از منحنی تنش حقیقی و کرنش پلاستیک حقیقی به‌دست‌آمده در مقاله [1] استفاده شد (شکل ۱) و پس از برازش منحنی بر آن ضرایب σ_0 ، $\dot{\epsilon}_0^P$ و n به ترتیب برابر ۱۲۶۲ مگاپاسکال، ۰/۰۲۰۹ و ۵/۹۰۴ به‌دست‌آمده است.

مقطع و کرنش شروع پلاستیک هستند. با انجام برازش منحنی، می‌توان ضرایب چندجمله‌ای رابطه ۶ را استخراج کرد. جهت استخراج خواص آسیب اینکونل ۷۱۸، از مرجع [15] استفاده شده است.

جدول ۳ ضرایب چندجمله‌ای مدل آسیب اینکونل ۷۱۸

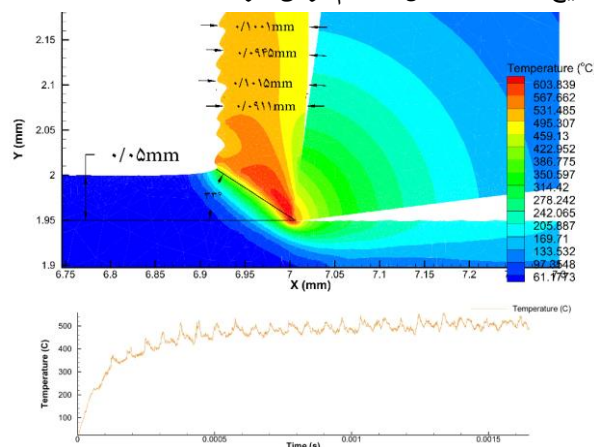
D_0	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5
$3/543 \times 10^{-1}$	$9/456 \times 10^{-5}$	$7/574 \times 10^{-7}$	$-1/78 \times 10^{-9}$	۰	۰



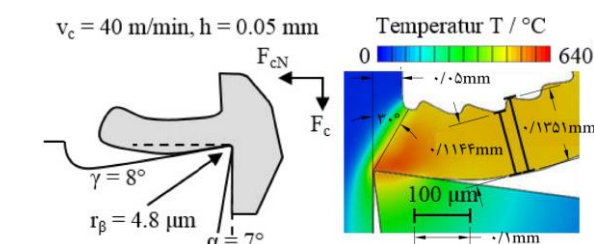
شکل ۵ مدل آسیب المان در اینکونل ۷۱۸

۵- نتایج

مدل توانی ارائه شده در این مطالعه، با دقت خوبی می‌تواند خروجی‌های ماشین‌کاری نظیر زاویه صفحه برشی، دمای براده و ابزار و نیروهای برشی را در فرایند تراشکاری متعامد، پیش‌بینی کند. مطابق با شکل ۶، دما، زاویه برشی و ابعاد براده با خروجی نتایج مقاله [1] (شکل ۷) هم‌خوانی دارد.



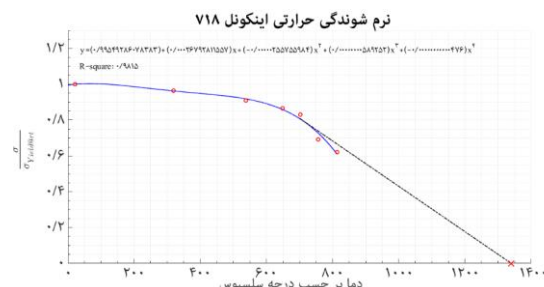
شکل ۶ شکل بالا- دمای براده و ابزار، شکل پایین- نحوه تغییرات دمای بیشینه ابزار با گذر زمان



شکل ۷ خروجی مطالعه [1] در ضخامت براده تغییر شکل نیافته ۰.۵ میلی‌متری

جدول ۲) پارامترهای استخراج شده برای معادله ساختاری توانی این پژوهش

σ_0 (MPa)	ε_0^p	n	$\dot{\varepsilon}_0$	m_{ave}	T_{rt} (°C)
۱۲۶۲	۰.۰۲۰۹	۵/۹۰۴	۱	۷۹/۹۵۰	۲۵
C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
۰/۹۹۵	$2/679 \times 10^{-6}$	$-2/55 \times 10^{-6}$	$5/892 \times 10^{-9}$	$-4/757 \times 10^{-12}$	۰
T_{melt} (°C)	T_{cutoff} (°C)	K ($\frac{W}{m \times ^\circ C}$)	C_p ($\frac{J}{kg \times ^\circ C}$)	ρ ($\frac{kg}{m^3}$)	E (Pa)
۱۳۴۰	۷۰۰	۱۱/۳	۴۴۰	۸۲۲۱	212×10^{11}



شکل ۴ نمودار نرم شوندگی حرارتی اینکونل ۷۱۸

۴- معادله آسیب برای اینکونل ۷۱۸

در حین برش، بخشی از مواد توسط ابزار برداشته می‌شود، بنابراین آسیب موضعی در جلوی نوک ابزار رخ می‌دهد؛ بنابراین، علاوه بر استفاده از یک مدل ساختاری مناسب، بهتر است از یک مدل آسیب مناسب برای آسیب و جداسازی براده استفاده شود. آسیب قطعه‌کار زمانی شروع می‌شود که مقدار آسیب تجمعی بدون بعد آن المان مطابق معادله ۵ به حد مشخصی می‌رسد. برای شبیه‌سازی مدل آسیب، از مدل آسیب موجود در نرم‌افزار ادونتاج استفاده شده است [17].

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{fi}^p}{\varepsilon_{fi}^p} \quad (5)$$

در رابطه ۵، عبارت $\Delta \varepsilon_{fi}^p$ افزایش لحظه‌ای کرنش در آن المان است و ε_{fi}^p حد نهایی کرنش قابل تحمل برای آن المان است؛ بنابراین زمانی که مقدار کسر رابطه ۵ برابر با واحد شود، حذف آن المان رخ می‌دهد. در این مطالعه، از مدل آسیب تجمعی وابسته به دما، مطابق با رابطه ۶، استفاده شده است.

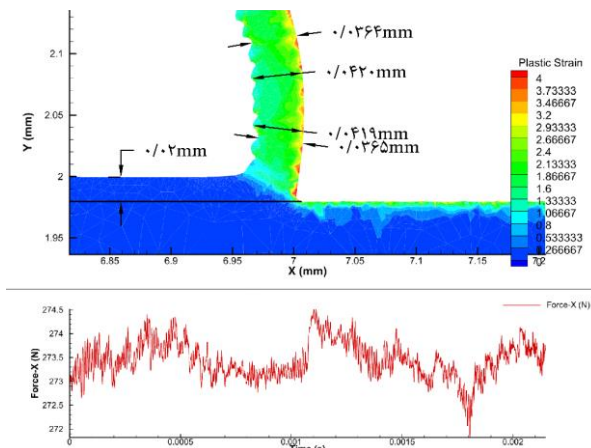
$$\varepsilon_f^p(T) = D_0 + D_1 T + D_2 T^2 + D_3 T^3 + D_4 T^4 + D_5 T^5 \quad (6)$$

ضرایب D_0 تا D_5 باید با استفاده از آزمون کشش گرم تعیین شوند. بدین صورت که در دماهای مختلف، تست کشش بر روی قطعه صورت پذیرد و با اندازه‌گیری سطح مقطع اولیه و سطح مقطع شکست قطعه در دماهای بالا، طبق رابطه ۷، کرنش شروع شکست پلاستیک را به دست آورد:

$$RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \quad (7)$$

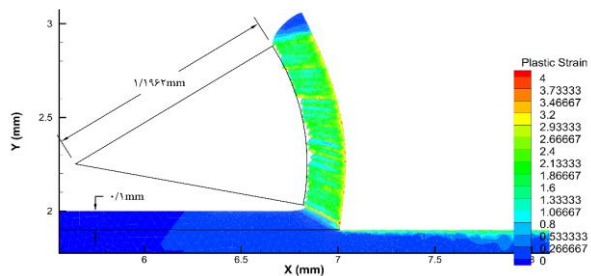
$$\varepsilon_f^p = \ln \left(\frac{1}{1 - RA} \right)$$

در رابطه ۷، A_0 ، A_f ، RA و ε_f^p به ترتیب سطح مقطع اولیه نمونه تست کشش، سطح مقطع پس از شکست، درصد کاهش سطح

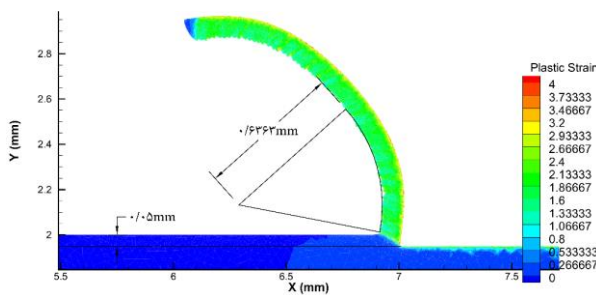


شکل ۹) شکل براده و نیروی برشی در ضخامت براده تغییر شکل نیافته ۰/۰۲ میلی‌متری

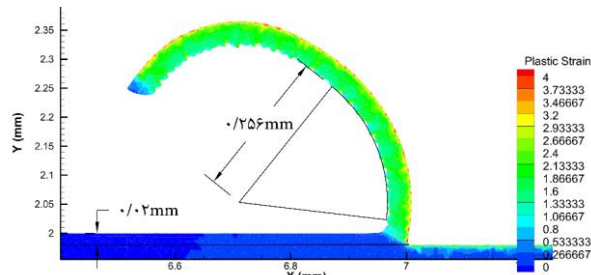
نتایج حاصل از این پژوهش نشان می‌دهد که با کاهش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، پیش‌براده زیاد می‌شود، به عبارت دیگر با کاهش براده تغییر شکل نیافته شعاع انحنای براده تغییر شکل یافته، کاهش می‌یابد (شکل ۱۰، ۱۱ و ۱۲). همچنین در این سه شکل باندهای برشی ایجاد شده به دلیل دندان‌های اره‌ای شدن براده، به وضوح قابل مشاهده است.



شکل ۱۰) شعاع انحنای براده تغییر شکل نیافته ۰/۱ میلی‌متر



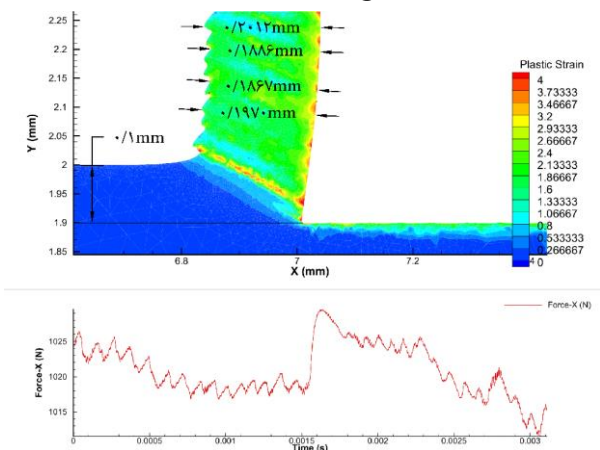
شکل ۱۱) شعاع انحنای براده تغییر شکل نیافته ۰/۰۵ میلی‌متری



شکل ۱۲) شعاع انحنای براده تغییر شکل نیافته ۰/۰۲ میلی‌متری

مطابق با شکل ۸ و ۹، با کاهش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، نیروی برشی و دمای تولیدی کاهش می‌یابد. این مطالعه، نیروهای برشی اندازه‌گیری شده توسط مقاله [۱] را توانست به خوبی پیش‌بینی کند. نیروی برشی در این مطالعه در ضخامت براده تغییر شکل نیافته ۰/۰۲ میلی‌متر، بین ۲۷۰ تا ۲۸۰ نیوتون تغییر می‌کند. همچنین در ضخامت براده تغییر شکل نیافته ۰/۱ میلی‌متر، نیروی برشی بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۳۰ نیوتون تغییر می‌کند. دلیل تغییرات بیشتر نیرویی را می‌توان به عمق بیشتر دندان‌های اره‌ای شدن براده در ضخامت براده تغییر شکل نیافته ۰/۱ میلی‌متری نسبت داد. همچنین در شکل ۸ و ۹، مدل ناحیه ضخیم تغییر شکل (حجمی) مطابق با پژوهش اکسلی و پالمر قابل مشاهده است.

در این مطالعه مشاهده شد که هرچقدر عمق دندان‌های اره‌ای شدن بیشتر باشد، نوسانات نیرویی و دمایی بیشتر خواهد بود. درواقع هنگام تشکیل براده دندان‌های اره‌ای، زاویه صفحه برشی حول یک میانگین مشخص نوسان می‌کند. با کاهش زاویه صفحه برشی، شرایط ماشین‌کاری بدتر می‌شود و نیروی برشی افزایش می‌یابد و به تبع آن حرارت تولیدی نیز افزایش می‌یابد و دما نیز در نهایت افزایش می‌یابد. این افزایش دما تا جایی صورت می‌گیرد که ماده در ناحیه تغییر شکل به صورت موضعی نرم شود تا جایی که به صورت ناگهانی برش بخورد. پس از برش ماده به صورت آنی، زاویه صفحه برشی بیشتر می‌شود و دما و نیروهای ماشین‌کاری نیز کاهش می‌یابند. به دلیل اینکه ضریب رسانش حرارتی اینکونل ۷۱۸ بسیار پایین است، حرارت تولیدی در یک ناحیه متمرکز باقی می‌ماند و گرادیان حرارتی بالایی را ایجاد می‌کند و این عامل را یکی از اصلی‌ترین فاکتورهای دندان‌های اره‌ای شدن می‌توان دانست. معمولاً دندان‌های اره‌ای شدن در براده‌ها در آلیاژهای سخت ماشین‌کاری شونده به علت ضریب رسانش حرارتی پایین و استحکام بالا رخ می‌دهد و در بیشتر مواد با استحکام بالا نیز اگر سرعت برشی افزایش یابد، فرصت انتقال حرارت بین قسمت‌های مختلف براده پیش نمی‌آید و ایجاد باند برشی و به تبع آن دندان‌های اره‌ای شدن براده، بیشتر رخ خواهد داد.



شکل ۱۳) شکل براده و نیروی برشی در ضخامت براده تغییر شکل نیافته ۰/۱ میلی‌متری

[Internet]. 2018;77(Hpc):54-7..

2- Ozel T, Llanos I, Soriano J, Arrazola PJ. 3d finite element modelling of chip formation process for machining inconel 718: Comparison of FE software predictions. Mach Sci Technol. 2011;15(1):21-46.

3- Johnson GR, Cook WH. A Computational Constitutive Model and Data for Metals Subjected to Large Strain, High Strain Rates and High Pressures. Seventh Int Symp Ballist. 1983;541-7.

4- Calamaz M, Coupard D, Girof F. A new material model for 2D numerical simulation of serrated chip formation when machining titanium alloy Ti-6Al-4V. Int J Mach Tools Manuf. 2008;48(3-4):275-88.

5- Sima M, Özel T. Modified material constitutive models for serrated chip formation simulations and experimental validation in machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. Int J Mach Tools Manuf. 2010;50(11):943-60.

6- Pawade RS, Joshi SS. Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA). Int J Adv Manuf Technol. 2011;56(1-4):47-62.

7- Razanica S, Malakizadi A, Larsson R, Cedergren S, Josefson BL. FE modeling and simulation of machining Alloy 718 based on ductile continuum damage. Int J Mech Sci. 2020;171.

8- Ye GG, Chen Y, Xue SF, Dai LH. Critical cutting speed for onset of serrated chip flow in high speed machining. Int J Mach Tools Manuf. 2014;86:18-33.

9- Lorentzon J, Järvestrått N, Josefson BL. Modelling chip formation of alloy 718. J Mater Process Technol. 2009;209(10):4645-53.

10- Parida AK, Maity K. Numerical and experimental analysis of specific cutting energy in hot turning of Inconel 718. Meas J Int Meas Confed [Internet]. 2019;133(October):361-9.

11- Wang B, Liu Z, Hou X, Zhao J. Influences of cutting speed and material mechanical properties on chip deformation and fracture during high-speed cutting of inconel 718. Materials (Basel). 2018;11(4).

12- Ebrahimi SM, Araee A, Hadad M. Investigation of the effects of constitutive law on numerical analysis of turning processes to predict the chip morphology, tool temperature, and cutting force. Int J Adv Manuf Technol. 2019;105(10):4245-64.

13- Qiu X, Cheng X, Dong P, Peng H, Xing Y, Zhou X. Sensitivity analysis of johnson-cook material constants and friction coefficient influence on finite element simulation of turning inconel 718. Materials (Basel). 2019;12(19).

14- Ahmed N, Mitrofanov A V., Babitsky VI, Silberschmidt V V. Analysis of material response to ultrasonic vibration loading in turning Inconel 718. Mater Sci Eng A. 2006;424(1-2):318-25.

15- Brown WF, Mindlin H, Ho CY. Aerospace structural metals handbook. CINDAS/USAF CRDA Handbooks Operations, Perdue University; 1996.

16- Iturbe A, Giraud E, Hormaetxe E, Garay A, Germain G, Ostolaza K, et al. Mechanical characterization and modelling of Inconel 718 material behavior for machining process assessment. Mater Sci Eng A [Internet]. 2017;682:441-53. Available from:

17- ThirdWaveSystems. Third Wave AdvantEdgeTM User's Manual Version 7.0. 2015;378.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش بر مبنای مطالعه^[1] صورت گرفت. نتایج این مطالعه را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱) معادله ساختاری توانی به جهت اینکه ناحیه نرم‌شوندگی حرارتی را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند، می‌تواند جایگزین مناسبی برای معادله جانسون کوک باشد. ۲) زاویه صفحه برشی طبق معادله ساختاری توانی در سه ضخامت براده تغییر شکل نیافته بررسی شده، به خوبی با نتایج تجربی مقاله^[1] تطابق دارد.

۳) مشاهده شد به دلیل اینکه براده ایجاد شده از نوع دندانه اره‌ای است، زاویه برشی، نیروی برشی و دما حول یک میانگین مشخص، به مقدار معینی نوسان می‌کنند.

۴) مشاهده که با کاهش ضخامت براده تغییر شکل نیافته، شعاع انحنا براده تغییر شکل یافته کاهش می‌یابد.

۱- فهرست علائم

T	دما ($^{\circ}C$)
K	رسانش حرارتی ($Wm^{-1} ^{\circ}C^{-1}$)
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه ($Jkg^{-1} ^{\circ}C^{-1}$)
RA	درصد کاهش سطح مقطع
علائم یونانی	
σ_0	استحکام تسلیم (MPa)
μ	ضریب اصطکاک
ν	ضریب پواسن
ϵ_0^p	کرنش پلاستیک مرجع
ϵ_0	نرخ حساسیت به کرنش پلاستیکی مرجع
ρ	چگالی (kgm^{-3})

بالانویس‌ها
 P پلاستیک

زیرنویس‌ها
 $melt$ ذوب
 $Cutoff$ حد نهایی
 rt دمای مرجع
 T حقیقی
 ave متوسط
 f شکست

تأییدیه اخلاقی: نویسندگان در تهیه و تنظیم این مقاله، رعایت کامل اصول اخلاقی را مدنظر گرفته و هنگام استفاده از منابع علمی به آن‌ها به‌عنوان مرجع اشاره کرده‌اند.

تعارض منافع: تمامی مطالب مذکور در این مقاله توسط نویسندگان آن انجام شده و هیچ فرد یا نهادی در تهیه آن نقش نداشته است.

منابع مالی: تمامی منابع مالی این تحقیق توسط نویسندگان مقاله تأمین شده است.

مراجع

1- Klocke F, Döbbeler B, Peng B, Schneider SAM. Tool-based inverse determination of material model of Direct aged Alloy 718 for FEM cutting simulation. Procedia CIRP