



بررسی تجربی و شبیه‌سازی سه بعدی فرآیند برقوزنسی روی فولاد ابزار سخت شده AISI

D2

حجت‌الله رنجبر^۱، محمدحسین صادقی^{۲*}، امیر راستی^۳، میلاد محمدی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

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

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت

* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵

sadeghim@modares.ac.ir

چکیده

در این پژوهش شبیه‌سازی المان محدود سه بعدی فرآیند برقوکاری فولاد سخت صورت گرفت. پارامترهای برش در شبیه‌سازی فرآیند برقوزنسی بر اساس نتایج تجربی بهینه که منجر به نیروهای برش کوچکتر، لرزش کمتر ابزار برقو و کیفیت سطح بهتر می‌شوند، انتخاب گردیدند. این شبیه‌سازی برای پیش‌بینی نیروهای برش به عنوان یکی از مهمترین متغیرهای فرآیند برقوزنسی استفاده شد. شبیه‌سازی فرآیند برادری با استفاده از نرم‌افزار المان محدود تجاری SFTC DEFORM-3D و با استفاده از یک کد لاگرنزین صریح صورت گرفت. به منظور یافتن شرایط بهینه برقوکاری و اعتبارسنجی مدل المان محدود نیز آزمایش‌های روی قطعه کار از جنس فولاد ابزار D2 سخت کاری شده انجام گردید. پارامترهای برش شامل نرخ پیشروی و سرعت برش تغییر داده شده و نیروی برش در آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی اندازه‌گیری شد. نتایج عددی انتشارستحی بسیار خوبی با نتایج تجربی دارد و خطای حدود ۱۰ درصد مشاهده گردید. در آخر تأثیر پارامترهای ورودی در آزمایش‌های شبیه‌سازی و تجربی روی نیروی برش مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که با افزایش نرخ پیشروی خطاً حاصل از شبیه‌سازی کمتر می‌شود و این نشان می‌دهد که هر چقدر حجم برادری باشد بایستی از مشی با چگالی بیشتر و کیفیت بالاتر استفاده کرد.

کلیدواژگان: برقوکاری، شبیه‌سازی المان محدود، نیرو

Experimental investigation and 3D simulation of reaming process on AISI D2 hardened tool steel

Hojjatollah Ranjbar¹, Mohammad Hosein Sadeghi^{1*}, Amir Rasti¹, Milad Mohammady²

1-Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Faculty of Mechanical Engineering, Tabriz University, Tabriz, Iran

* P.O.B. 14115 - 143 Tehran, Iran, sadeghim@modares.ac.ir

ABSTRACT

In this study, 3D finite element simulation of reaming process has been carried out on the hard steel. The cutting parameters in the simulation process were selected based on the optimum experimental results which lead to the smaller cutting forces, lower vibration of the reaming tool and better surface quality. This simulation was used to predict cutting forces as one of the most important reaming output variables. Simulation of material removal process was performed by commercial finite element software SFTC DEFORM-3D and using the explicit Lagrangian code. In addition, some empirical experiments were done on the hardened D2 tool steel workpieces to find the optimum reaming condition and validation of finite element model. Cutting parameters including feed rate and cutting speed were changed and cutting forces were measured, experimentally. The results showed that the numerical results have a good consistency with the experimental one and average difference of 10% was seen. Finally, the effect of input parameters on the cutting force at the simulation and experimental test were investigated. It was seen that the cutting forces error is reduced between two analyses by increasing the feed rate. This indicates that the meshes with higher quality and density are required in lower removal rate.

Keywords: Finite Element Simulation, Force, Reaming

سخت، مانند فولادهای ابزار انجام داده‌اند. برقوزنسی در حالت خشک و با برقوی چند لبه می‌تواند جایگزین فرآیند سنگزنانی در خودروسازی و صنعت قالب-سازی با توجه به کاهش زمان پرداخت ماشین‌کاری، کاهش هزینه ساخت، از بین بردن نگرانی‌های زیست محیطی با برقوزنسی خشک و بهبود کیفیت سطح قطعات باشد.

اگرچه برقوزنسی سخت در صنعت کنونی آنقدر معروفی نشده است ولی می‌تواند بیشتر مورد توجه باشد. این فرآیند ممکن است بیشتر با پدیده‌های فیزیکی مانند تغییر شکل پلاستیک، تماس اصطکاکی، اتصال مکانیکی-

۱- مقدمه فرآیند برقوزنسی به طور کلی برای افزایش قطر یک سوراخ ایجاد شده استفاده می‌شود. سوراخ اولیه با فرآیند سوراخ کاری یا ممکن است با ریخته‌گری ایجاد شده باشد. هدف از برقوزنسی ایجاد دقت قطری صحیح با تلارانس‌های تنگ‌تر برای دستیابی به کیفیت سطح مورد نیاز، راست کردن سوراخ اولیه ایجاد شده و هم مرکز کردن سوراخ با قطر خارجی می‌باشد.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران تحقیقات گسترده‌ای به منظور توسعه ابزارهای برش جدید و تواناً ساختن آن‌ها برای ماشین‌کاری مواد خیلی

Please cite this article using:

H. Ranjbar, M.H. sadeghi, A. Rasti, M. Mohammady, Experimental Investigation and 3D Simulation Reaming Process on AISI D2 Tool Steel Hardened, *Modares Mechanical Engineering, Proceedings of the Advanced Machining and Machine Tools Conference*, Vol. 15, No. 13, pp. 29-33, 2015 (in Persian) (فارسی)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

محدود سه بعدی بررسی کردند و دریافتند که برقوزونی می‌تواند مکانیزم تشکیل تنش پسماند را کاهش دهد و نتایج حاصل از تجربی صحت نتایج را نشان داد. آرازو لا و همکاران [۵] از مدل المان محدود برای به دست آوردن اصطکاک در طی ماشین کاری استفاده کردند. آن‌ها با به کار بردن ضرایب اصطکاک مختلف در فصل مشترک ابزار- براد، نتایج مطلوبی با در نظر گرفتن نیروی پیشروی به دست آورند. اوزل و همکاران [۶]، یک مدل محاسبه‌ای از فرآیند ماشین کاری سه بعدی با درنظر گرفتن تاثیر هندسه‌ی لبه‌ی برش بر نیروهای، تنش، اصطکاک و سایش ابزار را مورد مطالعه قرار دادند. آنها همچنین دما، توزیع تنش و کانتور سایش ابزار و مزیت متغیرهای طراحی میکروهندسه‌ی لبه برش ابزار را تعیین کردند. اکبر و همکاران [۷]، یک مدل پیشگویانه از متوسط حد فاصل حرارتی در ماشین کاری فولاد آلیاژی ۴۱۰ پررسی کردند. نتایج نشان داد که کاهش حد فاصل حرارتی برای پوشش را بررسی کردند. در این پژوهش، مدل المان محدود سه بعدی به منظور بررسی تاثیر سرعت دورانی و نرخ پیشروی بر روی نیروهای فرآیند و اعتبارسنجی مدل شبیه‌سازی با مدل تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- مدل ماده

از آن جایی که در بیشتر فرآیندهای ماشین کاری، تغییر شکل زیاد همراه با دما و کرنش بالا رخ می‌دهد، مدل ماده بایستی به صورت رضایت‌بخشی رفتار پلاستیک و ترمومکانیک تغییرشکل ماده، که در حین فرآیند براهه برداری رخ می‌دهد را بیان کند. چندین مدل ماده مانند معادله ترکیبی جانسون کوک (معادله ۱) برای بیان رفتار ماده بیان شده است که در آن اثرات کرنش، نرخ کرنش و دما در نظر گرفته شده است [۸]. در این پژوهش از این مدل برای تعریف رفتار ماده در حین براهه برداری استفاده گردید.

$$\sigma = (A + B\epsilon^n) \cdot \left[1 + C \cdot \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}}{T_m - T_r}\right)^m \right] \quad (1)$$

در معادله (۱)، ϵ کرنش پلاستیک، $\dot{\epsilon}$ نرخ کرنش، T_m نرخ کرنش پلاستیک مرتع، T_r دمای قطعه‌کار، A دمای جوش ماده قطعه‌کار و T_{room} دمای اتاق می‌باشد. در مدل جانسون کوک ثابت C در حقیقت استحکام تسلیم ماده در دمای اتاق، B مدول سختی، m ضریب حساسیت نرخ کرنش، n ضریب سختی و $\dot{\epsilon}$ ضریب نرمی حرارتی می‌باشد. این ثابت‌ها با استفاده از پژوهش‌های قبلی انجام شده برای فولاد ابزار AISI D2 به دست آمده و در جدول ۱ بیان شده است [۹].

۳- مدل المان محدود سه بعدی

قطعه‌کار به صورت ماده‌ی ویسکو الاستیک^۱ و ابزار با یک بدنی صلب در مدل المان محدود سه بعدی تعریف شد. هندسه ابزار برقو مطابق با کاتالوگ ابزار مورد استفاده در آزمایش تجربی با استفاده از نرم‌افزار طراحی سه بعدی کشیده و به محیط شبیه‌سازی انتقال داده شد. در شکل ۱ مدل طراحی شده ابزار با تصویر فیزیکی ابزار برقو نشان داده شده و همچنین مشخصات هندسی ابزار برقو در جدول ۱ بیان شده است. مشبندی ابزار شامل ۱۶۴۱۷۳

جدول ۱ ثابت‌های جانسون کوک برای فولاد ابزار AISI D2 سخت شده [۹]

A (MPa)	B (MPa)	C	m	n	θ_{melt} K
۱۷۶۶	۹۰۴	۰/۰۱۲	۳/۳۸	.۳۱۲	۱۷۳۳

حرارتی و مکانیزم تشکیل براهه روپرو باشد. در برقوزونی سخت فولادهای ابزار انرژی به صورت تغییر شکل ماده، اصطکاک چسبنده و لغزنده و حتی ممکن است موجب انحراف ابزار شود که در نهایت تمامی این‌ها تبدیل به انرژی گرمایی می‌شود. بخشی از حرارت تولیدی به ابزار برش و قطعه‌کار انتقال می‌یابد، در حالی که اکثریت حرارت تولیدی در براهه تلف می‌شود. ناحیه‌ی برش در معرض اکثریت حرارت می‌باشد، بنابراین تماس طولی بین براهه و ابزار تاثیرهای قابل توجهی روی نیروهای برش، عمر ابزار برش، پرداخت سطح، تلارس‌های ابعادی و هندسی، اعوجاج قطعه‌کار، تنش پسماند و شکل براهه دارد. از طرفی دیگر به علت باربرداری بسیار پایین فرآیند برقوزونی^۲، کوچکترین تغییر در پارامترهای برش، کیفیت سطح نهایی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

برای فراهم کردن ترکیب مطلوبی از پارامترهای برش از نرم‌افزار^۳ المان محدود^۴ برای مدل کردن فرآیند برقوزونی استفاده شد. روش المان محدود یک ابزار قدرتمند در شبیه‌سازی^۴ فرآیندهای برش می‌باشد. می‌توان از عملکرد فرم براهه ماده‌ی برش، پارامترهای بسیار سخت ابزار^۵ برای آزمایش‌های تجربی پیش‌بینی کرد. از این رو نیروهای برقوزونی جدید از روش توسعه یافته-^۶ کمک آزمایش‌های تجربی پیش‌بینی می‌شود.

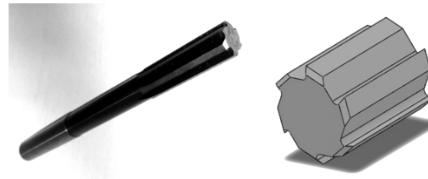
پژوهشگران بسیاری در زمینه شبیه‌سازی فرآیندهای ماشین کاری کار کرده‌اند اما تحقیقات اندکی در زمینه برقوزونی انجام شده است. AISI D2 دیویم و همکاران [۱]، شبیه‌سازی المان محدود ماشین کاری فولاد AISI D2 را با تجربی مقایسه کردند. در رابطه با برخی از پارامترهای خروجی مانند نیرو، دما و تغییر شکل پلاستیک، تفاوت بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی بسیار ناچیز به دست آمد که نشان از پیش‌بینی قابل قبول و دقت بالای مدل شبیه‌سازی دارد. آمبرلو و همکاران [۲] به مطالعه تغییرات میکروساختاری^۷ هنگام ماشین کاری آلیاژ اینکوئنول ۷۱۸ با استفاده از شبیه-^۸ سازی المان محدود پرداختند. هدف آنها ایجاد یک مدل المان محدود قابل اطمینان به منظور بررسی‌های میکروساختاری در ماشین کاری بود. نیروهای برش، هندسه‌ی براهه و ماتریسیم دما با در نظر گرفتن یک مدل ماده مناسب در نرم‌افزار المان محدود به دست آورده شد. سپس مدل عددی المان محدود با نتایج تجربی مقایسه و کالیبره گردید. از نتایج حاصله دریافت شد که مدل ماشه‌ی مناسب و انتخاب دقیق پارامترهای آن، تاثیر بسزایی روی دقت شبیه-^۹ سازی فرآیند برش دارد. بهمودی دقت مدل المان محدود به پارامترهای شبیه‌سازی شامل مقدار آسیب، ضریب انتقال حرارت کل و ثابت‌های اصطکاک بستگی دارد و این پارامترها با انجام ۱۰ تست تجربی تکراری کالیبره گردید. در آخر میزان خطای حاصل از تصدیق فرآیند به کمتر از ۱۶٪ دریافت شد.

ونیک و همکاران [۳]، تاثیر خطاهای فرآیند و عدم هم‌محوری را روی نیروهای برش و کیفیت سوراخ تولیدی را در فرآیند برقوزونی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از مدل نیروی برش و ضخامت براهه به منظور پیش‌گویی جابجایی ابزار، نیروی محوری، گشتاور و متوسط شعاع برقو شده استفاده کردند و مدل آن‌ها به خوبی انحراف‌های ابزار را نشان داد. هورست و همکاران [۴] عمق تنش پسماند و حرارت تولیدی را در فرآیند برقوزونی با استفاده از روش المان

1. Reaming
2. Software
3. Finite Element
4. Simulation
5. Microstructure

جدول ۳ مشخصات مکانیکی، حرارتی و تماسی فولاد ابزار D2 [۱۰] AISI D2

مشخصات حرارتی	
۲۱	رسانایی گرمایی (W/mK)
۴۶۰	ظرفیت گرمایی و بیزه ($J/kg^{\circ}C$)
۷/۶۴	مشخصات مکانیکی و فیزیکی چگالی (kg/mm^3)
۵۵	سختی (HRC)
۱۸۰	مدول الاستیسیته (GPa)
≥ ۳۲۰	استحکام تسلیم (MPa)
۷۲۰-۱۲۶۰	استحکام کششی (MPa)
۰/۳	ضریب پواسون
۰/۶	پارامترهای تماسی
۴۰	ضریب اصطکاک
	ضریب انتقال گرما



شکل ۱ برقوی مورد استفاده در انجام آزمایش‌های تجربی و عددی

المان با اندازه‌های بین ۸۵ تا ۳۰۰ میکرون تعريف شد. لبه‌های برش فعال ابزار با چگالی مش نسبتاً بیشتری با توجه به ویژگی‌های خاص ابزار بیان شده است.

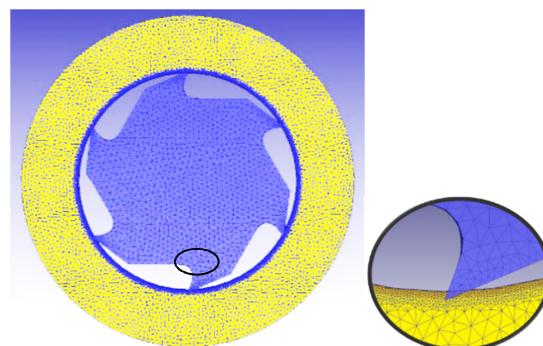
در این مطالعه سه پارامتر اصلی فرآیند برقوزونی در نظر گرفته شد؛ سرعت اسپیندل (N)، پیشروی (f_z) و عمق برش محوری (a_p). قطعه‌کار به صورت یک قطعه‌ی استوانه‌ی شکل با ارتفاع ۲ میلی‌متر، قطر خارجی ۱۵ میلی‌متر و قطر داخلی ۹/۸ و ۹/۹ میلی‌متر توسط نرم‌افزار طراحی سه‌بعدی کشیده شد. مش‌بندی قطعه‌کار با ۲۱۸۰۸۰ المان انجام گردید. حداقل و حداکثر اندازه‌ی المان‌ها برای قطعه‌کار بین ۴۰ تا ۲۰۰ میکرومتر در نظر گرفته شد. در ناحیه برش از مش موضعی با تعداد المان‌های بیشتر استفاده گردید. شکل ۲ نمایی از مدل هندسی ابزار و قطعه‌کار و نوع مش‌بندی آن را در قسمت‌های مختلف، نشان می‌دهد. برای هر دو مدل ابزار و قطعه‌کار مش ۴ وجهی هرمی تعريف شد. به طور کلی یکارچگی عددی برای محاسبه‌ی معادله‌های المان ۴ وجهی خطی نیاز نیست، به طوری که که یکارچگی تحلیلی می‌تواند به آسانی با اعمال مختصات ۴ وجهی به دست آید [۴].

خواص فیزیکی حرارتی قطعه‌کار و ثابت‌های تماسی در جدول ۳ بیان شده است. تا آن‌جا که به مدل اصطکاک ماده مربوط می‌شود، یک مدل ساده مبتنی بر فرضیه‌های برشی با فاکتور برشی $0/6$ در نظر گرفته شد.

از دیگر ملاحظات مربوط به سطح تماس ابزار و قطعه‌کار ضریب انتقال حرارت h می‌باشد، که در شبیه‌سازی عددی ترمومکانیکی مقدماتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. معمولاً بیشترین مقدار h پذیرفته می‌شود و فرض بر این است که شرایط انتقال حرارت در فصل مشترک ابزار و قطعه‌کار به طور کامل باشد [۱۱].

جدول ۲ مشخصات هندسی ابزار برقو

هنده‌ی ابزار	اندازه‌ی ابزار	اندازه‌ها	اندازه‌ها
قطر (mm)	۱۰	زاویه مارپیچ (درجه)	.
طول ابزار (mm)	۱۱۰	زاویه آزاد (درجه)	۱۲
تعداد شیارها	۶	زاویه چمفر (درجه)	۴۵
طول چمفر (mm)	۱۵	زاویه براذه (درجه)	۱



شکل ۲ مدل مش ابزار و قطعه‌کار و نمایی از چگالی مش در ناحیه برش

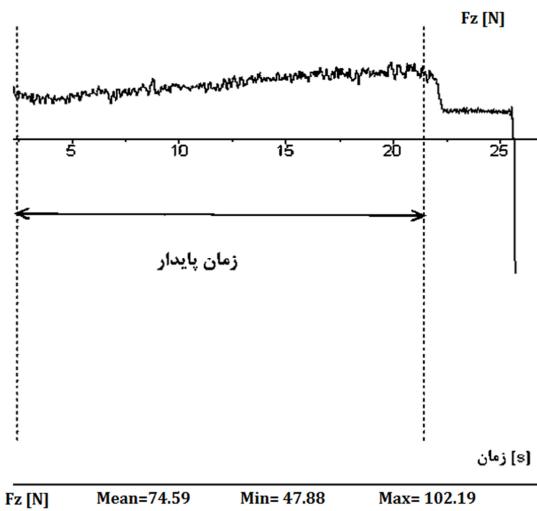
با توجه به مشکلات شناخته شده از معیارهای جداسازی براده^۱ در حال تشکیل، برای شبیه‌سازی جداسازی ماده در قالب یک تراشه از بقیه قطعه‌کار از یک تکنیک مش‌زنی مجدد استفاده شد [۱۲]. در طول ماشین‌کاری فولاد ابزار AISI D2، تنش‌های کششی نقش مهمی را ایفا می‌کنند، بنابراین اثر آن باید در پاسخ به مواد از قبیل معیار شکست در نظر گرفته شود. در این پژوهش از عیار کاکرافت و لاتاپز [۱۳] برای پیشگویی اثرات تنش کششی روی براده تشکیل شده در طی برش سه‌بعدی استفاده شد. این عیار به صورت معادله (۲) بیان می‌شود؛

$$\int_0^{\varepsilon_f} \sigma_1 d\varepsilon = D \quad (2)$$

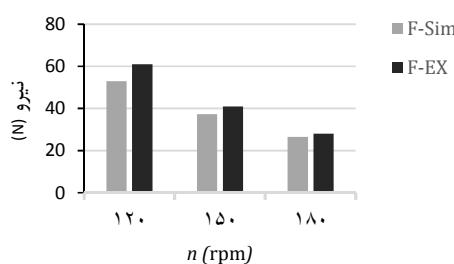
که ε_f تنش موثر، σ_1 تنش اصلی و D ثابت ماده می‌باشد. در این عیار هنگامی که انتگرال بزرگترین جز تنش کششی اصلی در طول مسیر به کرنش پلاستیک در معادله (۲) مرسد، مقدار D معمولاً مقدار آسیب^۲ نایدیده می‌شود و شکست اتفاق می‌افتد یا براده قطعه قطعه شده شروع می‌شود. مقدار D با استفاده از پژوهش‌های قبلی انجام شده در شبیه‌سازی فولاد ابزار AISI D2 اختبار گردید [۹].

۴- بررسی پارامترهای برش و مقایسه بین نتایج تجربی و عددی برای اعتبارسنجی مدل برش سه‌بعدی پیش‌بینی شده، نیروی محوری حاصل از آزمایش‌های تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه و مورد بحث قرار گرفته است. لازم به ذکر است که بعد از اعتبارسنجی مدل عددی به راحتی می‌توان خروجی‌های دیگر نظیر دما، تنش، کرنش و غیره را در حین فرآیند برداشت آورد. نمودار حاصل از شبیه‌سازی نیرو همراه با شماتیک براده برداری سه بعدی فرآیند برقوزونی در سرعت دورانی ۱۲۰ دور بر دقیقه، پیشروی ۰/۰۵ میلی‌متر بر دور و عمق برش ساعی ۰/۰۵ میلی‌متر در شکل ۳ نشان داده شده است. این نمودار نشان دهنده نیروی وارد بر ابزار برقو است. این نیرو حاصل از درگیری ابزار در شروع فرآیند برقوزونی می‌باشد و متوسط این نیرو با متوسط کمترین نیروی حاصل از آزمون تجربی، به این علت که نیرو در شروع فرآیند اندازه‌گیری شده است، مقایسه گردید.

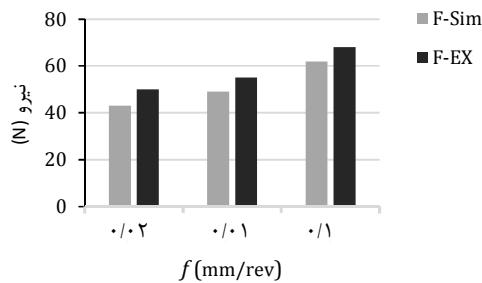
1.Chip Removal
2. Damage



شکل ۴ نمودار نیروی محوری حاصل از شبیه‌سازی فرآیند برقوزونی در سرعت دورانی 120 rpm ، پیشروی 0.05 mm/rev و عمق برش 0.05 mm



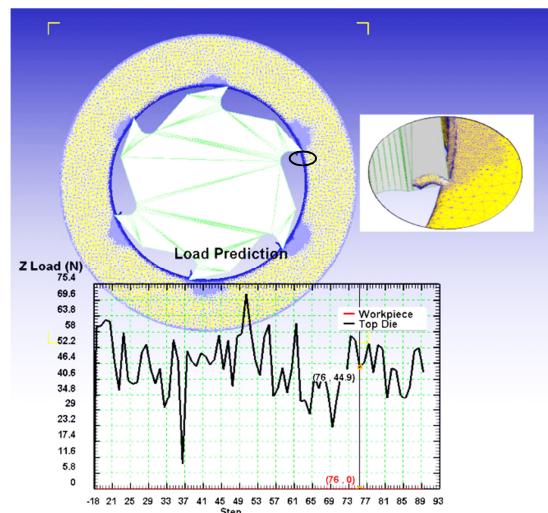
شکل ۵ پیش‌بینی عددی و اندازه‌گیری تجربی نیروی محوری برش در سرعت‌های دورانی متغیر



شکل ۶ پیش‌بینی عددی و اندازه‌گیری تجربی نیروی محوری برش در پیشروی‌های متغیر

۵ نتایج

در این مطالعه از شبیه‌سازی برای پیش‌بینی نیروی محوری برش در طی برقوزونی فولاد ابزار AISI D2 سخت شده استفاده گردید. نرمافزار المان محدود سه بعدی دیفرم برای مدل کردن فرآیند براده‌برداری در طی برقوزونی مورد استفاده قرار گرفت. اعتبارسنجی مدل تحت شرایط برش مختلف ارزیابی شد. نتایج به صورت خلاصه در ادامه آمده است.



شکل ۳ نمودار نیروی محوری حاصل از شبیه‌سازی فرآیند برقوزونی در سرعت دورانی 120 rpm ، پیشروی 0.05 mm/rev و عمق برش 0.05 mm در طی این پژوهش نیروی تجربی فرآیند با استفاده از دینامومتر پیزوالکترونیک کیستلر¹ اندازه‌گیری شد. شکل ۴ نمودار نیروی محوری حاصل از آزمایش تجربی را در همان ترکیب پارامترهای ذکر شده در شکل ۳ را نشان می‌دهد. در تمام نمودارهای اندازه‌گیری شده در آزمایش‌های تجربی، نیرو در شروع برقوزونی کم و به مراتب در انتهای سوراخ بیشینه است. این افزایش نیرو می‌تواند به دلیل بیشتر شدن سطح تماس ابزار برقو با دیواره سوراخ از ابدا تا انتهای سوراخ باشد. هر دو نمودار شبیه‌سازی و تجربی نوسان زیاد نیرو را در حین براده-برداری نشان می‌دهند. نوسان نیروی محوری حاصل از شبیه‌سازی می‌تواند به دلیل وقفاتی که در بین جدایی یک المان از قطعه کار و شروع براده‌برداری از المان بعدی رخ می‌دهد، باشد و غیرینکواختی نوسان‌ها به علت هم اندازه نبودن برخی از المان‌ها است.

شکل ۵ مقایسه‌ای بین نیروهای تجربی و شبیه‌سازی در سرعت‌های دورانی متغیر را نشان می‌دهد. در هر دو روش دیده می‌شود که نیروهای برش در سرعت‌های برش بالاتر کاهش می‌یابد. این کاهش نیرو به علت نرم شدن حرارتی بیش از حد لایه‌های نزدیک به سطح برش با توجه به نرخ کرنش بالاتر می‌باشد و جدایش براده به راحتی صورت می‌گیرد. در شکل ۶ نیروهای برش از لحظه نرخ پیشروی در هر دو روش شبیه‌سازی و تجربی برسی و مقایسه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش پیشروی، نیرو به علت افزایش ضخامت براده جدا نشده و حجم براده‌برداری بیشتر افزایش می‌یابد.

با مقایسه بین نتایج پیش‌بینی شده و تجربی که در آزمایش ترکیبی، همان‌طور که در شکل ۵ و ۶ مشاهده می‌شود، تقریباً برای پارامترهای مورد بررسی، موافق خوبی بین نتایج پیش‌بینی و شبیه‌سازی برای نیروی محوری در برقوزونی دیده می‌شود. بازه خطای مشاهده شده در این آزمایش بین 15% تا 16% می‌باشد. این مقدار خطای نشان می‌دهد که مدل پیش‌بینی اعتبارسنجی² مطلوبی با مدل تجربی دارد و این مدل با دقت مناسبی می‌تواند در بهدست آوردن سایر متغیرهای موضعی مانند تنفس، کرنش، دما و غیره استفاده شود.

1. Kistler
2. Validation

- ۱- با مقایسه بین نتایج پیش‌بینی و تجربی میانگین خطای حدود ۱۰٪ به دست آمد که این نشان می‌دهد که روش عددی اعتبارسنجی مناسبی با نتایج تجربی دارد و می‌توان از روش پیش‌بینی برای بدست آوردن متغیرهای موضعی برش مانند تنش، کرنش، دما و غیره بهره برد.
- ۲- با افزایش پیشروی خطای حاصل از شبیه‌سازی و تجربی کمتر می‌شود و این نشان می‌دهد که هر چقدر حجم براده‌برداری پایین‌تر باشد بایستی از مشی با چگالی بیش‌تر و کیفیت بالاتر استفاده کرد.
- ۳- به علت براده‌برداری بسیار پایین در برقوزونی یکی از حساس‌ترین عامل‌ها نیرو است که هر چقدر پایین‌تر باشد لرزش ابزار کمتر و کیفیت سطح بهتر را منجر می‌شود که بررسی و مقایسه پارامترهای ورودی دقت بالای پیش‌بینی نیرو در شبیه‌سازی فرآیند برقوزونی را نشان می‌دهد.
- ۴- با مقایسه پارامترهای ورودی دریافت شد که افزایش پیشروی باعث افزایش نیروی برشی می‌شود و افزایش سرعت دورانی کاهش نیرو را نشان می‌دهد.

۶- مراجع

- [1] J. P. Davim, C. Maranhão, P. Faria, A. Abrão, J. Rubio, L. R. Silva, Precision radial turning of AISI D2 steel, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 42, No. 9-10, pp. 842-849, 2009.
- [2] F. Jafarian, H. Amirkabadi, J. Sadri, Integration of finite element simulation and intelligent methods for evaluation of thermo-mechanical loads during hard turning process, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 227, No. 2, pp. 235-248, 2013.
- [3] O. Bhattacharyya, M. B. Jun, S. G. Kapoor, R. E. DeVor, The effects of process faults and misalignments on the cutting force system and hole quality in reaming, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 46, No. 12, pp. 1281-1290, 2006.
- [4] H. Brünnet, N. Lyubenova, M. Müller, J. E. Hoffmann, D. Bähre, Verification and Application of a New 3D Finite Element Approach to Model the Residual Stress Depth Profile after Autofrettage and Consecutive Reaming, *Procedia CIRP*, Vol. 13, pp. 72-77, 2014.
- [5] P. Arrazola, D. Ugarté, X. Domínguez, A new approach for the friction identification during machining through the use of finite element modeling, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 48, No. 2, pp. 173-183, 2008.
- [6] T. Özal, Computational modelling of 3D turning: Influence of edge micro-geometry on forces, stresses, friction and tool wear in PCBN tooling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, No. 11, pp. 5167-5177, 2009.
- [7] F. Akbar, P. Mativenga, M. Sheikh, Predictive modelling of average heat partition in high speed machining of AISI/SAE 4140 steel, *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, Vol. 5, No. 2-3, pp. 135-154, 2009.
- [8] G. R. Johnson, W. H. Cook, A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures, in Proceeding of, The Hague, The Netherlands, pp. 541-547.
- [9] E. C. Becze, A thermo-mechanical force model for machining hardened steel, 2002.
- [10] F. Jiang, L. Yan, Y. Rong, Orthogonal cutting of hardened AISI D2 steel with TiAlN-coated inserts—simulations and experiments, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 64, No. 9-12, pp. 1555-1563, 2013.
- [11] Y.-C. Yen, J. Söhner, B. Lilly, T. Altan, Estimation of tool wear in orthogonal cutting using the finite element analysis, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 146, No. 1, pp. 82-91, 2004.
- [12] K. Ee, O. Dillon, I. Jawahir, Finite element modeling of residual stresses in machining induced by cutting using a tool with finite edge radius, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, No. 10, pp. 1611-1628, 2005.
- [13] C. MG, D. LATHAM, Ductility and workability of metals, *Journal of the Institute of Metals*, Vol. 96, pp. 33-&, 1968.