

بررسی تجربی و المان محدود نیروهای شکل دهی و وضعیت فلنچ در فرآیند شکل دهی چرخشی قطعات مخروطی

علی اکبر ولایتی^۱ و بهنام معتکف ایمانی^۲

دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه فردوسی مشهد

(تاریخ دریافت: ۹۰/۱۲/۲۱؛ تاریخ پذیرش: ۹۱/۱۲/۱۹)

چکیده

شکل دهی چرخشی یک فرآیند شکل دهی پلاستیک پیچیده است که متغیرهای متعددی در شکل دهی و کیفیت محصول نهایی مؤثر می باشند. این پارامترها باید به گونه ای انتخاب شوند که با حداقل تغییرات در ابزار و تجهیزات سخت افزاری بتوان به کیفیت محصول مورد نظر دست یافت. در این راستا سه متغیر سرعت پیشروی غلطک، سرعت دورانی قالب و فاصله لقی غلطک و قالب به عنوان متغیرهای ورودی در نظر گرفته شده اند. جهت انجام آزمایشات، بستر آزمایشی متشکل از غلطک، قالب، ماشین تراش ارتقاء یافته، سنسورهای موقعیت و نیرو، استفاده شده است. علاوه بر بررسی تجربی شکل دهی چرخشی، شبیه سازی فرآیند در نرم افزار اجزاء محدود ABAQUS/Explicit پیاده سازی شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش سرعت پیشروی غلطک، مقدار نیروهای شکل دهی و میزان چروکیدگی لبه ورق افزایش یافته و با افزایش سرعت دورانی، مقادیر نیروی شکل دهی و چروکیدگی کاهش می یابد. در نتیجه تغییرات، نرخ پیشروی و سرعت دورانی می تواند روش مناسبی برای کنترل چروکیدگی قطعه کار باشد. پارامتر فاصله غلطک و قالب بیشترین تأثیر را بر نیروهای شکل دهی و وضعیت فلنچ می گذارد، در حالی که کمترین اثر مربوط به سرعت دورانی قالب است. ورق های استفاده شده در آزمایشات، آلومینیوم سری ۱۰۵۰ آنیل شده به ضخامت ۱ میلی متر و قطر ۱۵۰ میلی متر می باشند. با توجه به صحت گذاری این روش شبیه سازی، می توان از آن برای افزایش کیفیت و بهینه سازی شکل دهی چرخشی قطعات پیچیده تر بهره جست و همچنین قطعاتی با ضخامت متغیر با تغییر فاصله غلطک و قالب ایجاد کرد.

واژه های کلیدی: شکل دهی چرخشی برشی، تحلیل المان محدود، نیروهای شکل دهی، وضعیت فلنچ

3D FEM and Experimental Analysis of Influence of Process Parameters on Forming Force and Flange State of Cone Spinning

A.A. Velayati and B. Moetakef-Imani

Mech. Eng. Dep't.

Ferdowsi Univ. of Mashhad

(Received: 12 March, 2012; Accepted: 9 March, 2013)

ABSTRACT

Cone spinning, is a complicated plastic forming process under multi-factor effects. Processes variable in this research are: mandrel angular speed, roller feed rate and clearance. Influence of these parameters are analyzed on forming forces and flange state. In order to perform process experimental, a test rig is used which is composed of a manual lathe, a geared stepper motor, a linear encoder, a 3-axis KISTLER dynamometer, a high speed motion control card and a high resolution data acquisition card. The software used for simulation is ABAQUS 6.9 which its advantage is using explicit dynamics FE formulation method. The results from the FE model are compared with experimental results obtained from NC spinning machine. The used material is commercially aluminum (1050 series). The results show the following: (1) with the growing of the roller feed rate, all components force of spinning force and Wrinkling increase. (2) With the growing of the mandrel angular speed, all components force of spinning force and Wrinkling decreases. (3) Maximum affect on response variables is by clearance and minimum influence is by mandrel angular speed.

Keywords: Shear Spinning, 3D FEM, Forming Quality, Spinning Force, Flange State

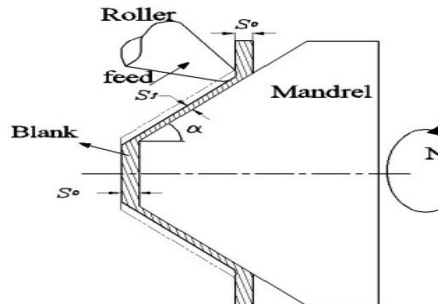
۱- کارشناسی ارشد

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): imani@ferdowsi.um.ac.ir

۱- مقدمه

شکل‌دهی چرخشی فلزات از جمله قدیمی‌ترین روش‌های شکل‌دهی بدون براده برداری ورق‌های فلزی است که در تیراژهای کم تا متوسط تولید می‌شود. امروزه با پیشرفت روزافزون صنایعی مانند هوافضا، نظامی، غذایی، نفت، گاز و پتروشیمی، نیاز به قطعاتی با صافی سطح بالا، شکل‌های دقیق و پیچیده با هزینه ابزار و تجهیزات کمتر سبب شده تا روش شکل‌دهی چرخشی طی سالیان اخیر به عنوان فرآیندی انعطاف‌پذیر، برای تولید قطعات توسعه قابل توجهی داشته باشد.

فرآیندهای شکل‌دهی چرخشی معمولاً به دو روش کلی شکل‌دهی چرخشی معمولی^۱ و شکل‌دهی چرخشی قدرتی تقسیم‌بندی شده‌اند [۱]. وجه تمایز این دو روش، در توان و نیروی مورد نیاز برای فرم‌دهی است. به طوری که در روش‌های قدرتی، تغییر قابل توجه در ضخامت صورت می‌گیرد. شکل‌دهی چرخشی برشی، یکی از روش‌های قدرتی است که معمولاً برای فرم‌دهی قطعات مخروطی استفاده می‌شود. شکل ۱ شماتیکی از فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شماتیکی از فرآیند شکل‌دهی چرخشی [۲].

فرآیندهای شکل‌دهی چرخشی قدرتی، کاربرد وسیعی در صنایع حساسی مانند هوا فضا، نفت و گاز برای تولید کلاهک‌های راکت، انواع ونتوری‌ها و عدسی‌های مخازن دارد. بنابراین شناخت دقیق پارامترهای فرآیندی به طوری که بتوان با تنظیم و کنترل آنها به مشخصه‌های مورد نظر از قطعه کار دست یافت، از جمله عوامل مهم و تعیین کننده است.

با توجه به اینکه فرآیندهای شکل‌دهی چرخشی قدمت تاریخی دارند، تا قبل از سال ۱۹۵۹ میلادی تحقیقات رسمی قابل توجهی در انتشارات علمی وجود نداشت. از جمله تحقیقات اولیه در مورد تحلیل تئوری شکل‌دهی چرخشی

فلزات، به وسیله آویتزور^۲ [۳ و ۴]، کوبایاشی^۳ [۵ و ۶]، کالپکچی اوغلو^۴ [۷] و هایاما^۵ [۸] انجام گرفته است. تحلیل تئوری و تجربی شکل‌دهی چرخشی قدرتی مخروطها توسط آویتزور و یانگ^۶ [۴] گزارش شده است. آزمایش‌های عملی و تحلیل‌های آنها به منظور اندازه‌گیری نیرو و توان مورد نیاز برای شکل‌دهی مخروطها انجام شده است. چن^۷ و همکاران [۹-۱۱]، اثر پارامترهایی نظیر فاصله لقی غلطک^۸ و قالب^۹، سرعت پیشروی، دوران اسپیندل، شعاع نوک غلطک، ضخامت اولیه ورق^{۱۰} را بر صافی سطح داخل و خارج قطعه کار تغییر شکل یافته و نیروهای فرآیندی توسط مجموعه‌ای از آزمایش‌های عملی و همچنین تحلیل آماری رگرسیون و معادلات تحلیلی بررسی کردند. در حالی که به بررسی توزیع پروفیل نیروها در لقی‌های مختلف پرداخته نشده است. کاربرد پروفیل نیرویی می‌تواند در عملیات شکل‌دهی چرخشی با سیستم کنترل نیرو برای تولید قطعات با پروفیل‌های ضخامتی دقیق و متغیر، مورد استفاده قرار گیرد. به این ترتیب که با اعمال پروفیل نیرویی به دست آمده از فرآیند در سیستم کنترل ماشین ابزار، می‌توان ضخامت قطعه کار را به صورت دلخواه در طول قطعه کنترل کرد و یا با کنترل نحوه تغییرات نیرو، از رخ دادن عیوبی نظیر چروکیدگی و یا شکست جلوگیری کرد.

پارامترهای موثر در این روش و روابط بین آنها پیچیده بوده و حل تحلیلی دقیقی برای آنها وجود ندارد. اغلب نتایج موجود درباره شکل‌دهی چرخشی بر اساس آزمایش‌های تجربی بوده و در حالت‌های خاص قابل استفاده است. نرم‌افزار ABAQUS یکی از قوی‌ترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی اجزاء محدود است که دارای محیط‌های مختلف برای مدل‌سازی فرآیندهای گوناگون است. محیط ABAQUS/Explicit با استفاده از حل معادلات دینامیکی صریح، امکان حل مسائل تغییر شکل‌های بزرگ و سرعت‌های بالا و انواع برخورد را فراهم کرده است. این نرم‌افزار به منظور مدل‌سازی فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی که شرایط تماس آن به طور دائم در حال تغییر است مناسب می‌باشد.

2- Avitzur
3- Kobayashi
4- Kalpakcioglu
5- Hayama
6- Yang
7- Chen
8- Roller
9- Mandrel
10- Blank

۴-۱- قانون سینوسی و انحراف از آن

تعیین ضخامت نهایی در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی، به طور عملی توسط کنترل فاصله بین غلطک و قالب یا لقی صورت می‌گیرد. با کنترل فاصله لقی همچنین می‌توان توزیع ضخامت‌های مختلفی را در طول قطعه کار ایجاد کرد. برای محاسبه ضخامت نهایی در فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی از رابطه مشهور به قانون سینوسی (معادله ۱) استفاده می‌شود، این رابطه مدل ایده‌آل کالپاکجی اوغلو [۶] برای توصیف مکانیزم جریان مواد است (شکل ۱).

$$S_f = S_0 \sin \alpha \quad (1)$$

نمادهای معادله (۱) بر اساس شکل ۱ است. با رعایت قانون سینوسی می‌توان حداقل عیوب را در قطعه کار نهایی مشاهده کرد [۱۲].

جدول (۱): متغیرهای فرآیندی آزمایشات.

متغیر فرآیندی	نشانه	واحد	سطوح متغیرها		
			۱	۲	۳
سطح	L				
نرخ پیشروی غلطک	f	mm/rev	۰/۵	۰/۷۵	۱
سرعت دوران قالب	N	rpm	۱۳۸	۳۹۵	۵۶۰
فاصله لقی غلطک و قالب	C	mm	۰/۵	۰/۷	۰/۹

۴-۲- بررسی تجربی و بستر آزمایش‌های عملی

به منظور انجام آزمایشات، بستری متشکل از تجهیزات شکل ۲ استفاده شده است. محورهای ماشین ابزار تراش TN50BR از طریق گیربکس منظومه‌ای با نسبت کاهش ۵ به ۱، به موتورهای پله‌ای مجهز شده‌اند [۱۲]. برای ارسال فیدبک‌های موقعیت ابزار به سیستم کنترل از انکودرهای خطی با دقت‌های ۵ میکرون و ۱ میکرون به ترتیب برای محور شعاعی X و محور طولی Y، استفاده شده است. برای دریافت پالس خروجی از انکودرها و ارسال پالس حرکتی به موتورها از کارت کنترل حرکت سرعت بالای PCI-1240 ساخت شرکت ادونتج^۱ استفاده استفاده شده است. همچنین دینامومتر نوع 9255b ساخت شرکت کایستلر^۲ سوئیس برای اندازه‌گیری نیروهای شکل‌دهی استفاده شده است. آمپلی فایر A5070 برای تقویت سیگنال‌های

در این تحقیق با استفاده از آزمایش‌های عملی و شبیه‌سازی پروفیل نیروهای شکل‌دهی و وضعیت فلنچ بر اثر تغییر سه پارامتر فاصله لقی غلطک و قالب، سرعت پیشروی غلطک و سرعت دورانی قالب بررسی شده است. برای تحقق این امر، ابتدا بستر آزمایشی متشکل از تجهیزات لازم فراهم شده و سپس فرآیند در نرم‌افزار مدل‌سازی شده و در نهایت نتایج تجربی و شبیه‌سازی مقایسه شده است.

۲- انتخاب متغیرها

در تحقیق حاضر تأثیرگذارترین پارامترها بر کیفیت محصول یعنی نرخ پیشروی ابزار غلطکی f، سرعت دوران قالب N و لقی بین غلطک و قالب C به عنوان متغیرهای فرآیندی انتخاب شده‌اند.

در صنایع همواره تمایل به سویی است که با حداقل تغییرات در ابزار و تجهیزات سخت‌افزاری، فقط با تغییرات متغیرهای فرآیندی با دسترسی آسان (مانند تنظیمات سرعت محورها در فرآیندهای ماشین‌کاری) بتوان به پاسخ مطلوب مورد نظر دست یافت. در این تحقیق، سه متغیر فرآیندی بررسی شده فقط با تنظیمات مقادیر عددی در برنامه کنترل جامع و تنظیم دنده‌های دور اسپیندل ماشین، به راحتی قابل تغییر بوده و به تعویض تجهیزات سخت‌افزاری با صرف هزینه و زمان زیاد نیاز نمی‌باشد.

۳- تعیین سطوح متغیرها

هر چه بازه و تعداد مقادیر انتخاب شده از متغیرها برای انجام آزمایش‌ها بیشتر باشد، بازه وسیع‌تری از تأثیر متغیرها بر خروجی‌های فرآیند با دقت بیشتری قابل بررسی خواهد بود. اما با افزایش تعداد سطح تغییر هر پارامتر، تعداد حالت‌ها زیاد شده و نیازمند انجام تعداد آزمایش بیشتری است (برای کاهش تعداد آزمایش‌ها از روش‌های طراحی آزمایشات DOE در آینده استفاده می‌شود). با توجه به محدودیت‌های ماشین ابزار و منابع و مراجع مختلف [۱] و [۱۱] سطوح متغیرها به صورتی که در جدول ۱ آمده انتخاب شده است. لازم به ذکر است که هر یک از متغیرها دارای ۳ سطح می‌باشند.

۴- روش تحقیق

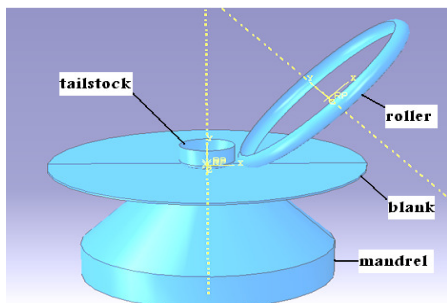
در این بخش ابتدا قانون سینوسی به عنوان اصلی‌ترین پارامتر فرآیند بررسی می‌گردد و در ادامه جزئیات تحلیل تجربی و المان محدود فرآیند مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

1- Advantech

2- Kistler

نگهدارنده^۲ ورق که در نرم افزار مدل شده‌اند در شکل ۳ نمایش نمایش داده شده است.

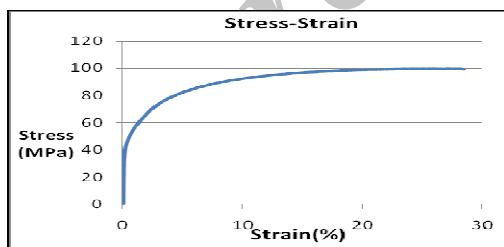
ورق‌های استفاده شده در آزمایش‌ها، آلومینیوم سری ۱۰۵۰ به ضخامت ۱ میلی‌متر و قطر ۱۵۰ میلی‌متر است. به منظور کاهش نیروهای شکل‌دهی ورق‌های آلومینیوم (یک ساعت در دمای ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد و خنک‌سازی در دمای محیط) آنیل شده‌اند. پس از عملیات آنیل، آزمون کشش بر روی نمونه استاندارد انجام شده و منحنی تنش-کرنش آن در شکل ۴ آمده است. جدول ۲ مشخصات و خصوصیات ماده A11050 آنیل شده را مشخص می‌کند.



شکل (۳): نمایش مجموعه تجهیزات مدل شده.

جدول (۲): خصوصیات ماده ۱۰۵۰ Al.

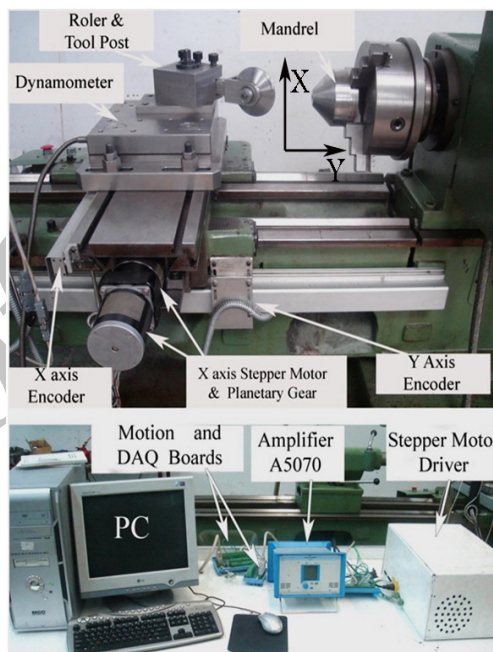
تنش تسلیم (Mpa)	ضریب پواسون	چگالی (kg/m ³)	مدول الاستیسیته (Gpa)
۴۴	۰/۲۹	۲۷۱۰	۷۰



شکل (۴): منحنی تنش-کرنش.

تعیین روش حل: به منظور شبیه‌سازی فرآیند، می‌توان از روش دینامیک ضمنی یا دینامیک صریح استفاده نمود. روش دینامیک ضمنی با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Standard و روش دینامیک صریح با استفاده از نرم‌افزار ABAQUS/Explicit

اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر به کار گرفته شده است. برای تحلیل داده‌های اندازه‌گیری شده توسط دینامومتر در رایانه، سیگنال‌های آنالوگ خروجی دینامومتر و آمپلی‌فایر می‌بایست به سیگنال دیجیتال تبدیل شوند. این مهم توسط کارت دریافت داده‌های چند عملکردی PCI-1710 صورت می‌گیرد. همچنین برای تحلیل، ثبت و ارسال داده‌ها به سیستم و همچنین اعمال سیستم کنترلی از برنامه‌ای که در محیط نرم‌افزار MATLAB طراحی شده، استفاده شده است. در شکل ۲ شماتیکی از بستر آزمایش نشان داده شده است.



شکل (۲): بستر آزمایشات.

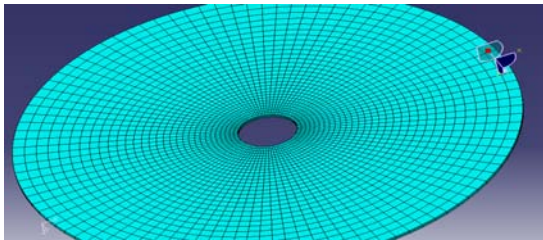
۴-۳- شبیه‌سازی المان محدود

علاوه بر انجام آزمایش‌های تجربی شکل‌دهی چرخشی، شبیه‌سازی فرآیند در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit انجام شده است. یکی از اهداف اصلی این تحقیق، ارائه مدل المان محدود برای پیش‌بینی نتایج بدون انجام آزمایش در آینده است. در ادامه برخی از مراحل شبیه‌سازی تشریح می‌شود.

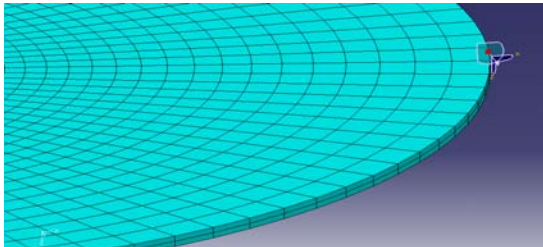
تعریف هندسه و خواص مدل: ابزار غلطک، قالب و نگهدارنده با استفاده از روش دوران مدل جسم صلب تحلیلی^۱ شبیه‌سازی سازی شده است. ورق که نمونه مورد نظر است در نرم‌افزار به صورت جسم تغییر شکل‌پذیر^۲ مدل می‌شود. مجموعه تجهیزات شکل‌دهی چرخشی برشی، ابزار غلطک، قالب، ورق و

1- Analytical Rigid
2- Deformable

3- Tailstock

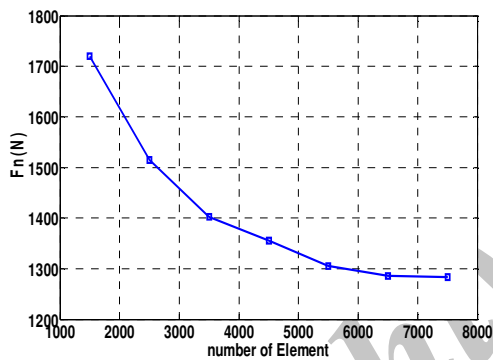


(الف)



(ب)

شکل (۵): شبکه‌بندی ورق، الف) شبکه‌بندی چهار وجهی منظم و ب) دو لایه المان در جهت ضخامت.



شکل (۶): نمودار تغییرات نیرو بر حسب تعداد المان.

۵- بررسی نتایج تجربی و شبیه‌سازی

در این بخش نتایج بدست آمده از آزمایشات و شبیه‌سازی المان محدود مقایسه می‌گردد. ابتدا اثر پارامترهای فرآیندی بر نیروها و در ادامه اثر پارامترها بر وضعیت فلنچ بررسی می‌گردد.

۵-۱- مقایسه روند تغییرات نیروها

دینامومتر در جهت‌های x , y , z نیروها را اندازه‌گیری می‌کند ولی نقش اصلی در شکل‌دهی ورق را مؤلفه نیرو در جهت نرمال (عمود بر سطح قطعه کار) بر عهده دارد. در نتیجه این مؤلفه‌ها را به مؤلفه‌های نرمال و مماسی تبدیل می‌کند. در ادامه مؤلفه‌های نیروی نرمال و مماسی شبیه‌سازی و آزمایش‌های عملی در سه وضعیت برای پارامتر فاصله لقی، بررسی می‌گردد.

انجام می‌شود. از مزایای ABAQUS/Explicit، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۳]: دارای قدرت تحلیل مسائلی بسیار برخطی مانند فرآیند لهیدگی یا پرس، تحلیل مسائل با تغییرات سینماتیکی مانند فرآیند سقوط، تحلیل مسائل دینامیکی و بالستیکی و توانایی آنالیز مسائلی که در آنها المان از دست می‌رود.

این روش برای تحلیل مسایل گذرا و کوتاه دینامیکی مانند برخورد و حل مسائل با درجه غیرخطی بالا و شبه استاتیکی یا مسایل غیرخطی که در آنها شرایط تماس تغییر می‌کند مانند شکل‌دهی^۱، عرضه شده است. جهت شبیه‌سازی فرآیند شکل‌دهی چرخشی برشی از محیط ABAQUS/Explicit استفاده شده است.

شبکه بندی: غلطک، قالب و نگهدارنده جسم صلب تحلیلی در نظر گرفته شده نیازی به شبکه‌بندی ندارند، ولی ورق با المان آجری شش‌وجهی مرتبه اول (C3D8R) شبکه‌بندی می‌شود. سرعت حل با این المان در مقایسه با انواع دیگر المان آجری بیشتر است. جهت شبکه‌بندی ورق می‌توان از شبکه‌بندی چهار وجهی مثلثی استفاده کرد، اما با توجه به زوایای تند و وجود المان‌های نامنظم، زمان حل مسئله بسیار افزایش یافته، بنابراین از شبکه‌بندی شش‌وجهی منظم استفاده می‌شود (شکل ۵-الف). در شبیه‌سازی با استفاده از المان آجری حداقل باید از دو لایه المان جهت بررسی دقیق‌تر وضعیت فلنچ و به دست آوردن خروجی‌های مناسب استفاده کرد (شکل ۵-ب).

اعتبارسنجی مدل المان محدود: به منظور اطمینان از عدم تأثیر تعداد المان و شبکه‌بندی ورق در پارامترهای خروجی، به دلیل اینکه که افزایش تعداد المان‌ها دیگر اثری بر خروجی‌های مسئله نداشته باشد حداقل تعداد المان تعیین می‌شود. شکل ۶ نمودار تغییرات نیروی نرمال بر حسب تعداد المان را نشان می‌دهد. اگر تعداد المان‌ها حداقل برابر با ۶۰۰۰ در نظر گرفته شود، شبکه‌بندی به حالت پایدار رسیده و ریز کردن شبکه‌بندی اثری بر پارامترهای خروجی ندارد. بنابراین کمترین تعداد المان مجاز در نظر گرفته می‌شود تا زمان حل حداقل ممکن باشد.

روش دیگر بررسی صحت مدل‌سازی، مقایسه مقادیر پارامترهای خروجی به دست آمده از شبیه‌سازی با مقادیر به دست آمده از آزمایش‌های عملی است که این امر در بخش نتایج بررسی می‌شود.

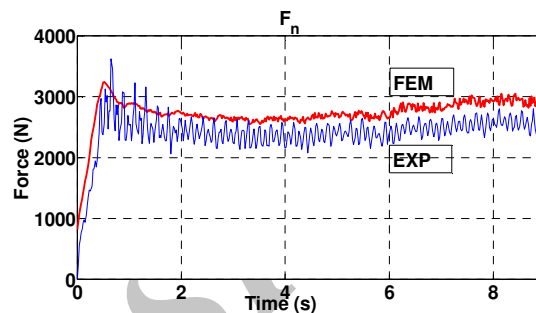
- هماهنگی بین پروفیل و مقادیر نیروهای به دست آمده از شبیه‌سازی و تجربی برقرار است.

- یک جهش در مقادیر نیروی نرمال در اوایل فرآیند رخ داده است. بر اساس گزارش هایاما [۱۴]، علت این جهش، شکل‌دهی ناحیه غیرخطی قسمت شعاعی نوک قالب است. این نوع پروفیل، نیرویی برای شکل‌دهی چرخشی مخروطی‌ها مطابق با قانون سینوسی، در تحقیقات آرای [۱۵] و هایاما [۱۴] نیز مشهود است (شکل ۷).

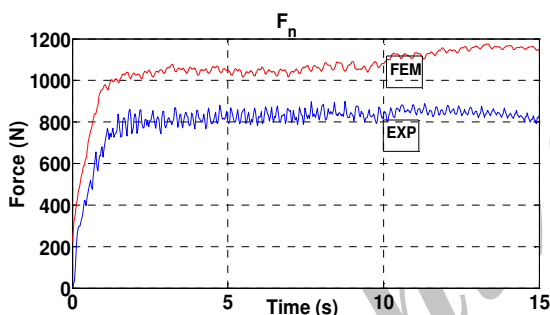
- نیروی مماسی با پیشرفت فرآیند به انتهای کار به صورت تدریجی رو به افزایش است. علت این افزایش تدریجی، تجمع مواد در جلوی غلطک با پیشروی فرآیند می‌باشد (شکل ۸).

فاصله لقی بیشتر از قانون سینوسی: مقایسه پروفیل مؤلفه نرمال شبیه‌سازی و تجربی برای حالتی که فاصله لقی بیشتر از قانون سینوسی تنظیم می‌شود، در شکل ۹ آمده است. همچنین در جدول ۴ مقادیر نیروهای شبیه‌سازی و تجربی به صورت عددی مقایسه می‌شود.

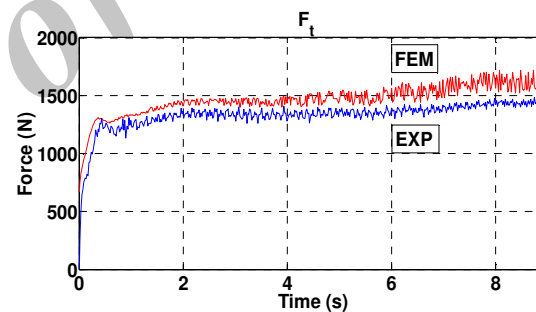
فاصله لقی برابر با قانون سینوسی: در این حالت فاصله بین غلطک و قالب که تعیین کننده ضخامت نهایی قطعه کار است به طور دقیق برابر با مدل ایده‌آل کالپاکچی اوغلو (قانون سینوسی) تنظیم شده است. (شکل‌های ۷ و ۸) پروفیل مؤلفه‌های نیرو در جهت نرمال و مماسی مربوط به شبیه‌سازی و تجربی را مقایسه می‌کنند. در جدول ۳ مقادیر نیروهای شبیه‌سازی و تجربی به صورت عددی مقایسه می‌شود.



شکل (۷): مقایسه نیروی نرمال شبیه‌سازی و تجربی
($C=0.7 \text{ mm}$, $N=560 \text{ rpm}$, $f=1 \text{ mm/rev}$)



شکل (۹): مقایسه نیروی نرمال شبیه‌سازی و تجربی
($C=0.9 \text{ mm}$, $N=560 \text{ rpm}$, $f=0.5 \text{ mm/rev}$)



شکل (۸): مقایسه نیروی مماسی شبیه‌سازی و تجربی
($C=0.7 \text{ mm}$, $N=560 \text{ rpm}$, $f=1 \text{ mm/rev}$)

جدول (۴): مقادیر تجربی و شبیه‌سازی نیروها.

شماره آزمایش	مقادیر متغیرهای پاسخ					
	نیروی نرمال شبیه‌سازی	نیروی مماسی شبیه‌سازی	درصد اختلاف	نیروی مماسی تجربی	نیروی نرمال تجربی	درصد اختلاف
$C=0.9 \text{ mm}$ $N=560 \text{ rpm}$ $f=0.5 \text{ mm/rev}$	۸۶۵	۱۰۲۵	۱۸/۴۹	۴۹۵	۶۱۴	۲۴/۰۴

- در این آزمایش اختلاف نیروی نرمال تجربی و شبیه‌سازی ۱۸/۴۹ درصد و اختلاف نیروی مماسی تجربی و شبیه‌سازی ۲۴/۰۴ درصد است.

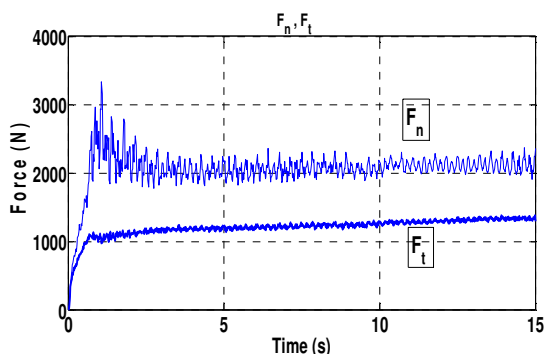
جدول (۳): مقادیر تجربی و شبیه‌سازی نیروها.

شماره آزمایش	مقادیر متغیرهای پاسخ					
	نیروی مماسی شبیه‌سازی	نیروی نرمال شبیه‌سازی	درصد اختلاف	نیروی مماسی تجربی	نیروی نرمال تجربی	درصد اختلاف
$C=0.7 \text{ mm}$ $N=560 \text{ rpm}$ $f=1 \text{ mm/rev}$	۱۵۳۸	۱۳۶۱	۱۵/۴۱	۲۸۲۴	۲۴۴۷	۱۱/۵۱

- مقادیر ذکر شده در جدول ۳ از میانگین‌گیری پروفیل نیروها به دست آمده است. در این آزمایش، اختلاف نیروی نرمال تجربی و شبیه‌سازی ۱۵/۴۱ درصد و اختلاف نیروی مماسی تجربی و شبیه‌سازی ۱۱/۵۱ درصد است.

می‌شود. در این آزمایش فاصله لقی کمتر از مقدار قانون سینوسی است.

مؤلفه‌های نیروی نرمال همواره بزرگ‌تر از مؤلفه‌های نیروی مماسی است زیرا مؤلفه‌های نیروی نرمال وظیفه اصلی فرم‌دهی قطعه کار یا به عبارتی خم کردن ورق روی قالب را دارند. این امر در تحقیقات قبلی [۱۴ و ۱۵] نیز به چشم می‌خورد (شکل ۱۱).



شکل (۱۱): مؤلفه نرمال و مماسی نیرویی
($C=0/5$ mm, $N=138$ rpm, $f=0/5$ mm/rev)

نمودارهای تکمیلی: اثر پارامترهای فاصله لقی، سرعت پیشروی و سرعت دورانی بر اساس نتایج تجربی در شکل ۱۲ و ۱۳ مشاهده می‌شود.

- با افزایش فاصله لقی، نیروهای شکل‌دهی کاهش می‌یابد به طوری در حالت لقی کمتر از قانون سینوسی، مقدار نیرو حداکثر است (شکل ۱۲).

- با افزایش سرعت پیشروی غلطک نیروهای شکل‌دهی افزایش می‌یابد (شکل ۱۳).

- با افزایش سرعت دورانی، نیروهای شکل‌دهی کاهش می‌یابد (شکل ۱۳).

- بیشترین تأثیرگذاری را بر نیروهای شکل‌دهی پارامتر فاصله لقی دارد و پارامتر سرعت دورانی قالب، کمترین اثر را دارا است (شکل ۱۳).

۵-۲- وضعیت فلنچ

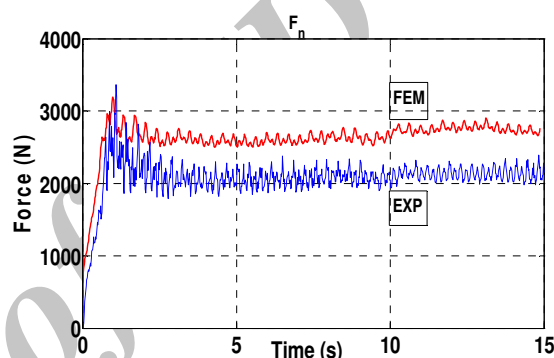
در این بخش، اثر سه پارامتر فرآیندی سرعت پیشروی غلطک، فاصله لقی و سرعت دوران قالب بر وضعیت فلنچ بررسی می‌شود.

اثر فاصله لقی بر وضعیت فلنچ: اثر فاصله لقی بر وضعیت فلنچ در شکل ۱۴ بررسی می‌شود. در این شکل مشاهده می‌شود که وضعیت فلنچ به دست آمده از آزمایشات و شبیه‌سازی کاملاً یکسان است. به طوری که در فاصله لقی

- در این شرایط بر خلاف حالت لقی برابر با قانون سینوسی، در ابتدای فرآیند جهشی برای نیروی نرمال مشاهده نمی‌شود که علت این امر، افزایش فاصله لقی غلطک و قالب و در نتیجه کاهش سطح تماس غلطک با قسمت شعاعی نوک قالب است (شکل ۹).

فاصله لقی کمتر از قانون سینوسی: پروفیل مؤلفه نرمال نیروی تجربی و شبیه‌سازی در حالت لقی کمتر از قانون سینوسی در شکل ۱۰ بررسی می‌شود.

در جدول ۵ مقادیر نیروهای شبیه‌سازی و تجربی به صورت عددی مقایسه می‌شود.



شکل (۱۰): مقایسه نیروی نرمال شبیه‌سازی و تجربی
($C=0/5$ mm, $N=138$ rpm, $f=0/5$ mm/rev)

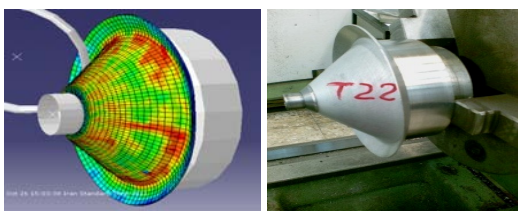
جدول (۵): مقادیر تجربی و شبیه‌سازی نیروها.

شماره آزمایش	مقادیر متغیرهای پاسخ					
	نیروی مماسی درصد اختلاف	نیروی مماسی شبیه سازی	درصد اختلاف تجربی	نیروی نرمال شبیه سازی	نیروی نرمال تجربی	درصد اختلاف
C=0/5 mm N=138 rpm f=0/5 mm/rev	۱۳/۷۴	۱۴۲۶	۱۲۳۰	۱۵/۹۶	۲۵۷۲	۲۲۱۸
						۱۹

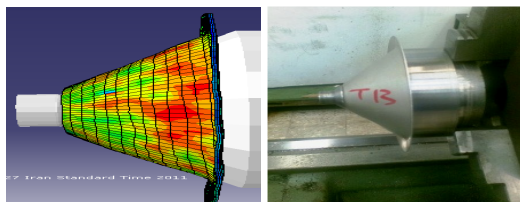
- در این آزمایش، اختلاف نیروی نرمال تجربی و شبیه‌سازی ۱۵/۹۶ درصد و اختلاف نیروی مماسی تجربی و شبیه‌سازی ۱۳/۷۴ درصد است.

- در این بخش از آزمایش‌ها، مقدار جهش اولیه نیروی نرمال با شدت بیشتری مشاهده می‌شود که علت این امر، کاهش فاصله لقی غلطک و قالب و در نتیجه افزایش سطح تماس غلطک با قسمت شعاعی نوک قالب است (شکل ۱۰).

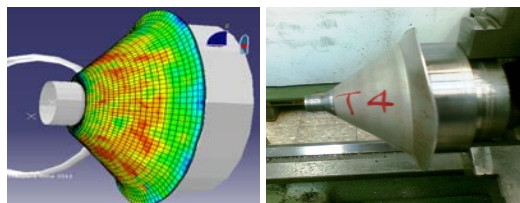
مقایسه مؤلفه مماسی و نرمال: مؤلفه‌های نرمال و مماسی نیروهای شکل‌دهی در شکل ۱۱ با یکدیگر مقایسه



(الف)



(ب)



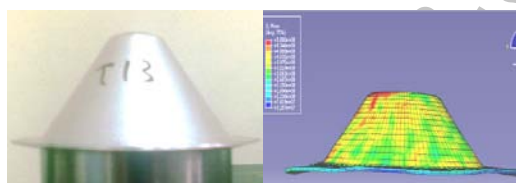
(ج)

شکل (۱۴): تاثیر فاصله لقی بر وضعیت فلنچ،

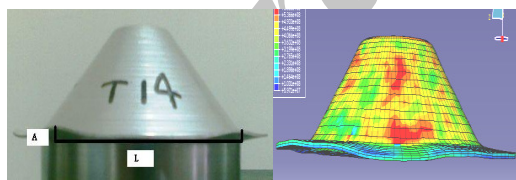
(الف): $(C=0.5 \text{ mm}, N=395 \text{ rpm}, f=0.5 \text{ mm/rev})$

(ب): $(C=0.7 \text{ mm}, N=395 \text{ rpm}, f=0.5 \text{ mm/rev})$

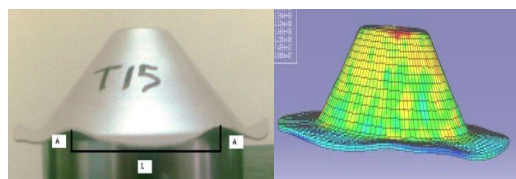
(ج): $(C=0.9 \text{ mm}, N=395 \text{ rpm}, f=0.5 \text{ mm/rev})$



(الف)



(ب)



(ج)

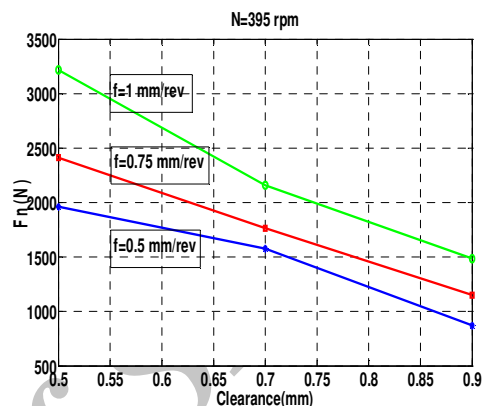
شکل (۱۵): اثر سرعت پیشروی

(الف): $(C=0.7 \text{ mm}, N=395 \text{ rpm}, f=0.5 \text{ mm/rev})$

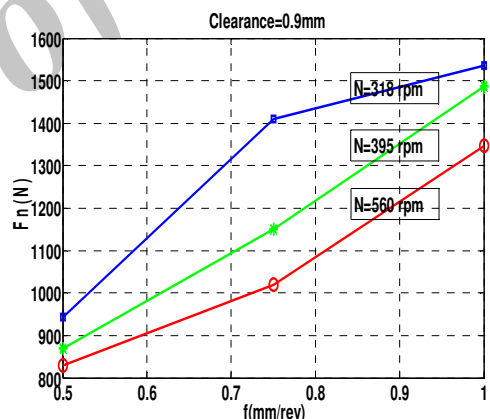
(ب): $(C=0.7 \text{ mm}, N=395 \text{ rpm}, f=0.75 \text{ mm/rev})$

(ج): $(C=0.7 \text{ mm}, N=395 \text{ rpm}, f=1 \text{ mm/rev})$

بیشتر از مقدار سینوسی (آزمایش شماره ۴) فلنچ به سمت جلو می‌شود، اما در حالتی که فاصله لقی کمتر از قانون سینوسی تنظیم شود (آزمایش ۲۲) فلنچ به سمت عقب خم شده و در نهایت، برای حالتی که فاصله لقی برابر با قانون سینوسی باشد وضعیت فلنچ مستقیم باقی می‌ماند که حالت مطلوب و مورد نظر محصول می‌باشد (آزمایش شماره ۱۳).



شکل (۱۲): اثر پارامتر فاصله لقی بر نیروها.



شکل (۱۳): اثر سرعت پیشروی و سرعت دورانی.

اثر سرعت پیشروی بر وضعیت فلنچ: اثر سرعت پیشروی غلطک بر وضعیت فلنچ در شکل ۱۵ مشاهده می‌شود. با بررسی وضعیت فلنچ مشاهده می‌شود که در نتایج تجربی و شبیه‌سازی با افزایش سرعت پیشروی دامنه نواسانات فلنچ بیشتر و طول موج آن نیز بزرگ‌تر می‌شود، در نتیجه چروکیدگی لبه فلنچ افزایش می‌یابد. بنابراین به منظور حداقل شدن چروکیدگی، سرعت پیشروی باید تا حد امکان تنظیم شود. علت افزایش چروکیدگی لبه افزایش نیروها بر اثر افزایش پیشروی است (شکل ۱۵).

- 1- Lean Forward
- 2- Lean Backward

ارائه شده در این تحقیق، وضعیت فلنچ و روند تغییرات نیروها در حین فرآیند را مشابه آزمایشات نشان می‌دهد. از بررسی تجربی و المان محدود نیروهای شکل‌دهی و وضعیت فلنچ نتایج کلی زیر حاصل شده است:

۱- مؤلفه‌های نیروی نرمال همواره بزرگ‌تر از مؤلفه‌های نیروی مماسی می‌باشند. زیرا مؤلفه‌های نیروی نرمال، وظیفه اصلی شکل‌دهی قطعه کار یا به عبارتی خم ورق روی قالب را بر عهده دارند.

۲- در فرآیندهای شکل‌دهی چرخشی برشی، نیروی مماسی با پیشرفت فرآیند به انتهای کار، به صورت تدریجی رو به افزایش است.

۳- شکل‌دهی قسمت نوک قالب سبب ایجاد جهش اولیه در پروفیل نیروها می‌شود. هر چه فاصله لقی کمتر باشد میزان جهش بیشتر است.

۴- فاصله لقی بیشترین تأثیر را بر پارامترهای خروجی گذاشته و سرعت دوران قالب کمترین اثر را داراست.

۵- تغییرات نرخ پیشروی و سرعت دورانی می‌تواند روش مناسبی برای کنترل چروکیدگی قطعه کار باشد.

۶- در حالت لقی بیشتر از قانون سینوسی، فلنچ به سمت جلو خم می‌شود، در حالت لقی کمتر از قانون سینوسی، فلنچ به سمت عقب خم شده و در حالت برابر با قانون سینوسی فلنچ مستقیم باقی می‌ماند.

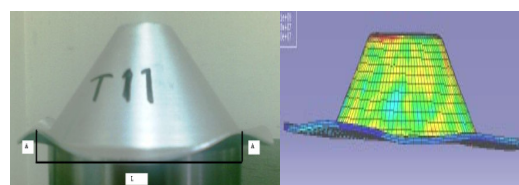
۷- با توجه به صحنه‌گذاری این روش شبیه‌سازی، می‌توان از آن برای افزایش کیفیت و بهینه‌سازی شکل‌دهی چرخشی قطعات پیچیده‌تر بهره جست.

۷- مراجع

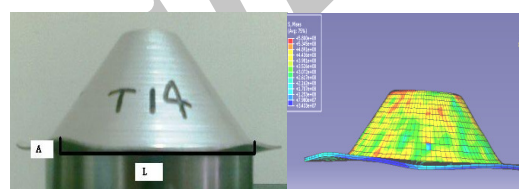
1. Bewlay, B.P. and Furre, D.U. "ASM Handbook of Metalworking", Sheet Forming, Vol. 14B, No. 05120, pp. 367-375, 2006.
2. Sajajid, F. "Design and Manufacturing of Metal Spinning Tools and Modeling of Spring Back Phenomena on Cone Spinning Using Regression Analysis", M.Sc. Thesis, Ferdowsi Univ. of Mashhad, Aug 2009 (In Persian).
3. Avitzur, B. "Handbook of Metal-Forming Processes", John Wiley and Sons, Inc., Canada, 1983.
4. Avitzur, B. and Yang, C.T. "Analysis of Power Spinning of Cones", J. Eng. for Industry, August, Vol. 82, No. 3, pp. 231-245, 1960.
5. Kobayashi, S. "Instability of Conventional Spinning of Cones", J. of Eng. for Industry, Vol. 85, No. 1, pp. 44-48, 1995.
6. Kobayashi, S., Hall, I.K., and Thomsen, E.G. "A Theory of Shear Spinning of Cones", J. Eng. for

اثر سرعت دورانی بر وضعیت فلنچ: شکل ۱۶ اثر

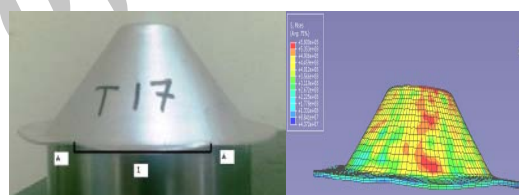
سرعت دورانی قالب بر وضعیت فلنچ را نشان می‌دهد. در شکل‌های مربوط مشاهده می‌شود که در نتایج تجربی و شبیه‌سازی، با افزایش سرعت دورانی قالب، دامنه نوسان لبه ورق کاهش می‌یابد یعنی مقدار چروکیدگی لبه ورق در حال کاهش است. پس در این حالت می‌توان با افزایش سرعت دورانی قالب، فلنچ وضعیت مطلوب‌تری داشته باشد (شکل ۱۶).



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۶): اثر سرعت دورانی

(الف): $(C=0.7 \text{ mm}, N=138 \text{ rpm}, f=0.75 \text{ mm/rev})$

(ب): $(C=0.7 \text{ mm}, N=395 \text{ rpm}, f=0.75 \text{ mm/rev})$

(ج): $(C=0.7 \text{ mm}, N=560 \text{ rpm}, f=0.75 \text{ mm/rev})$

۶- نتیجه‌گیری

محدوده تغییرات متغیرها با توجه محدودیت‌های ماشین ابزار و به کمک منابع و مراجع تعیین شده است. همچنین آزمایش‌های عملی در بستری متشکل از تجهیزات شکل ۲ انجام و سپس فرآیند در نرم‌افزار ABAQUS/Explicit شبیه‌سازی شده است. با ارائه این مدل به عنوان یک مدل معتبر می‌توان بدون نیاز به انجام آزمایش‌ها و فقط با تغییر پارامترهای شبیه‌سازی (سرعت‌های فرآیندی، فاصله غلطک و قالب، جنس ماده ورق و...) خواص و کیفیت محصول، اجرای عملیات بهینه‌سازی و کنترل نیروها در حین فرآیند، ایجاد قطعات با ضخامت متغیر و دلخواه را مورد بررسی قرار داد. مدل

11. Chen, M.D., Hsu, R.Q., and Fuh, K.H. "An Analysis of Force Distribution in Shear Spinning of Cone", *Int. J. Mech. Sci.* Vol. 47, No. 6, pp. 902-921, 2005.
12. Wong, C.C., Dean, T.A., and Lin J. "A Review of Spinning, Shear Forming and Flow Forming Processes", *Int. J. Machine Tools & Manufacture*, Vol. 43, No. 14, pp. 1419-1435, 2003.
13. Khalkhali, A. "Finite Element Analysis by ABAQUS", Dibagaran Art Institute Publications, Tehran r, Second Ed., 2009 (In Persian).
14. Hayama, M., Murota, T., and Kudo, H. "Experimental Study of Shear Spinning", *Bulletin of JSME*, Vol. 8, No. 31, pp. 453-460, 1965.
15. Arai, H. "Robotic Metal Spinning-Shear Spinning Using Force Feedback Control", *Robotics and Automation, Proc. Of IEEE Int. Conf.*, Vol. 3, pp. 3977-3983, 2003.
7. Kalpakcioglu, S. "On the Mechanics of Shear Spinning", *J. of Eng. for Industry, ASME Trans.*, Vol. 83, No.2, pp. 125-130, 1961.
8. Hayama, M. and Murota, T. "On the Study of Metal Spinning", *Bulletin of the Faculty of Eng., Yokohama National Univ.*, Vol. 12, pp. 53-88, 1963.
9. Chen, M.D., Hsu, R.Q., and Fuh, K.H. "Forecast of Shear Spinning Force and Surface Roughness of Spun Cones by Employing Regression Analysis", *Int. J. of Machine Tools & Manufacture* Vol. 41, No. 12, pp.1721-1734, 2001.
10. Chen, M.D., Hsu, R.Q., and Fuh, K.H. "Effects of Over-Roll Thickness on Cone Surface Roughness in Shear Spinning", *J. Materials Proc. Tech.*, Vol. 159, No. 1, pp. 1-8, 2005.

Archive of SID