

## شبیه سازی و بررسی آزمون فشار حلقه به منظور اندازه گیری اصطکاک در فرآیند فورج داغ

مجتبی دهقان<sup>۱\*</sup>، فتح... قدس<sup>۲</sup> و جواد دعایی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<b>واژگان کلیدی:</b> فرآیند فورج داغ، اصطکاک، روان کار، آزمون فشار حلقه، شبیه سازی، نرم افزار ABAQUS، منحنی کالیبراسیون اصطکاکی.	اصطکاک یکی از مهم ترین پدیده های مؤثر بر فرآیند فورج می باشد، که تحلیل آن در این فرآیند ضروری است. علاوه بر رعایت یک سری اصول اساسی، انجام روان کاری صحیح بهترین روش کنترل اصطکاک و سایش در این فرآیند می باشد. به دلیل کم هزینه بودن عملیات روان کاری در مقایسه با کاهش هزینه های آن در فرآیند تولید، ارزیابی روان کارها یک اصل مهم در فرآیند فورج است. یکی از بهترین روش های ارزیابی روان کارها آزمون فشار حلقه می باشد، که در آن با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود ضریب اصطکاک در فرآیند فورج محاسبه می شود. در این تحقیق با انجام آزمون فشار حلقه و شبیه سازی آن، اثر روان کار مخلوط گرافیت در آب در کاهش اصطکاک فرآیند فورج داغ بررسی شده است. اثر روان کار به وضوح در ابعاد قطعه نهایی و در نتیجه کاهش اصطکاک مشاهده شده است؛ به طوری که باعث تبدیل اصطکاک چسبنده به اصطکاک لغزنده شده است. ولی تغییر درصد گرافیت در آب تأثیر چندانی در کاهش ضریب اصطکاک نداشته است. همچنین پس از مشاهده اختلاف زیاد بین مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده توسط نرم افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS و منحنی های کالیبراسیون اصطکاکی این نتیجه به دست آمد که، شبیه سازی شرایط فورج داغ مجموعه ای همگانی از منحنی های کالیبراسیون فراهم نمی آورد.

### ۱- مقدمه

ابزار شکل دهنده و رفتار سطحی مانند اصطکاک نیاز است [۱]. اصطکاک بین سطح ابزار و قطعه کار تأثیر مهمی روی تغییر شکل مواد، نیرو و انرژی مورد نیاز شکل دهی، تنش سیلان، سطح نهایی قطعه، کیفیت محصول، عمر کار ابزار، قابلیت شکل پذیری و سایش قالب دارد [۲-۵]. عوامل مؤثر بر شرایط اصطکاکی عبارتند از: نرخ کرنش، تنش عمودی در سطح تماس قطعه- قالب، شرایط روان کاری، درجه حرارت، زبری، خواص مکانیکی قطعه و قالب و تغییرات فازی مواد در اثر تغییر درجه حرارت. بررسی جزئی این فاکتورها مشکل است، چون سطح تماس

هدف از افزایش دقت در فرآیندهای شکل دهی فلزات تولید قطعات تغییر شکل یافته ی بدون عیب و با کمترین مصرف مواد و هزینه ی ابزار است. به منظور دستیابی به این موضوع دانستن دقیق خواص مواد، پارامترهای فرآیند،

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: dehghan.mojtaba@yahoo.com

۱. دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

۲. استادیار، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه سمنان

۳. دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مواد و متالورژی،

دانشگاه آزاد اسلامی

قطعه- قالب در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات تحت فشار و دمای بالا قرار دارد [۶ و ۷].

در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به‌منظور غلبه بر اصطکاک معمولاً از روان‌کار استفاده می‌شود [۸ و ۹]. پارامترهای موثر بر اصطکاک و روان‌کاری در عملیات فورج داغ عبارتند از: پارامترهای ابزار قطعه‌کار مانند خواص ماده‌ی قطعه‌کار، صافی سطح ابزار و قطعه‌کار، هندسه‌ی قالب و پوسته‌های اکسیدی موجود روی سطح قطعه‌کار؛ پارامترهای روان‌کار مانند ترکیب، گرانیوی و مقدار روان‌کار (نوع روان‌کار)؛ پارامترهای فرآیندی مانند فشار اعمالی توسط قالب، سرعت و طول لغزش قالب نسبت به قطعه‌کار، مقدار انبساط سطحی و گرمای ناشی از فرآیند [۱۰].

به دلیل هزینه‌ی کم عملیات روان‌کاری در مقایسه با کاهش هزینه‌ای که این عملیات در فرآیند تولید دارد، ارزیابی روان‌کارها و در صورت لزوم جایگزینی آن‌ها با دیگر روان‌کارها یک اصل مهم در فرآیند فورج می‌باشد، که در شرایط مختلف دما و نرخ کرنش، به‌منظور بهینه کردن اقتصادی فرآیند برای تولید محصول با کیفیت و شکل مورد نیاز ضروری است [۱۱]. محاسبه‌ی اصطکاک برای محاسبات عددی و تحلیلی تنش، کرنش، نیروی شکل‌دهی و پیش‌بینی نیروی فشار اهمیت زیادی دارد [۱۲].

تعیین کمی شرایط اصطکاک طی عملیات شکل‌دهی، منجر به انجام آزمایش‌های ارزیابی مختلف می‌شود [۱۳ و ۱۴]. در یک آزمایش خوب باید دمای نمونه و قالب، مدت زمان تماس و سرعت نسبی بین نمونه و ابزار و همچنین انبساط سطحی نمونه تقریباً مشابه فرآیند مورد مطالعه باشد [۱۰]. آزمایش‌های شبیه‌سازی نیمه‌صنعتی زیادی مانند آزمون فشار حلقه، آزمون اکستروژن پسرودونجانی، آزمون اکستروژن پسرودونجانی و آزمون فشار پیچی طراحی شده‌اند، تا اصطکاک و روان‌کاری را در عملیات فورج ارزیابی کنند [۱۲ و ۱۵]. آزمون فشار حلقه بهترین شبیه‌سازی کاربردهایی از فورج با میزان متوسطی

از تغییرشکل است، که در آن انبساط سطحی ایجاد شده در محدوده‌ی ۱۰۰ درصد است [۱۶ و ۱۷]. آزمون فشار حلقه در مقایسه با آزمایش‌های دیگر اصطکاک‌ی نیاز به ابزار ارزان‌تری دارد و ساده‌تر انجام می‌شود [۱۵ و ۱۸]. آزمون فشار حلقه به‌طور گسترده برای مطالعه‌ی تحلیلی، تجربی و عددی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۹ و ۲۰]. در این آزمایش، یک نمونه‌ی حلقه‌ای شکل تخت، تا مقدار مشخصی از کاهش ارتفاع فشرده می‌شود. تغییر در قطرهای داخلی و خارجی حلقه‌ی فورج شده به میزان بسیار زیادی به اصطکاک در سطح تماس قالب- حلقه بستگی دارد. اگر اصطکاک مساوی صفر باشد، حلقه مانند یک دیسک توپر تغییرشکل می‌یابد، که در آن هر جزء با نرخی متناسب با فاصله‌اش از مرکز به‌طور شعاعی سیلان می‌کند. اصطکاک این سیلان شعاعی را محدود می‌کند [۲۱ و ۲۲]. اگر اصطکاک از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، مقاومت اصطکاک‌ی در جهت بیرونی از مقاومت اصطکاک‌ی در جهت سیلان‌های درونی مواد حلقه به سمت مرکز بزرگ‌تر می‌شود. با افزایش تغییرشکل، اگر اصطکاک زیاد باشد، قطر داخلی کاهش یافته و اگر کم باشد، قطر داخلی افزایش می‌یابد. بنابراین، تغییر در قطر داخلی، یک روش ارزیابی اصطکاک سطح تماس را ارائه می‌کند [۲۱ و ۲۳]. در تحقیقات مختلف چندین راه حل تئوری در مورد تحلیل آزمون فشار حلقه ارائه و بررسی شده‌است [۲۱]. ترکیب کردن آزمایشات مدلی فیزیکی و شبیه‌سازی اجزای محدود روشی ساده و موثر برای مطالعه‌ی مکانیزم-های اصطکاک‌ی در شرایط تغییرشکل پلاستیک زیاد است [۱]. تحقیقات نشان می‌دهد، روش صحیح محاسبه‌ی ضریب اصطکاک در آزمون فشار حلقه برقراری ارتباط بین درصد کاهش قطر داخلی ( $\Delta D_i$ %) و درصد کاهش ارتفاع ( $\Delta H$ %) است [۲۴]. این ارتباط را بیشتر با روش تحلیل اجزای محدود برقرار می‌کنند. نتایج به‌صورت منحنی‌های کالیبراسیون برای حلقه‌هایی با نسبت‌های ابعاد استاندارد «ضخامت: قطر داخلی: قطر خارجی» ارائه می‌شود.

تهیه شده است. به منظور کاهش ضریب اشتباه هر آزمایش روی پنج نمونه‌ی یکسان انجام شده است. از طرفی هر آزمایش در سه حالت بدون استفاده از روان کار (تحت شرایط خشک) و همچنین با استفاده از روان کارهای مخلوط ۵٪ و ۱۰٪ گرافیت در آب انجام شده است.

آزمون فشار حلقه توسط دستگاه پرس پیچی هزار تن و به منظور کنترل دقیق تر کورس پرس (ایجاد ۵۰٪ کوبش در قطعه) به صورت قالب بسته انجام شده است. به همین دلیل به وسیله‌ی دستگاه اسپارک قالب‌هایی از جنس فولاد گرم کار ۱/۲۳۴۴ با محفظه‌ی استوانه‌ای شکل تهیه گردیده است. ابزار فورج که در معرض کار در دمای بالا و تحت بارهای مکانیکی قرار دارند، برای جلوگیری از شکست ناشی از تنش‌های مکانیکی و حرارتی از فولادهای گرم کار ساخته می‌شود [۶].

درجه حرارت انجام کار داغ روی فولاد CK45 محدوده‌ی دمایی ۹۰۰-۱۱۰۰°C می‌باشد؛ به همین دلیل قبل از انجام آزمایش، هر قطعه درون کوره‌ی دوار قرار داده شده تا درجه حرارت آن به ۱۱۰۰°C برسد. از آنجا که محیط این کوره‌ها تا حدودی اکسید کننده هستند، پس از بیرون آمدن هر قطعه از درون کوره، در حدود یک ثانیه در آب سرد قرار داده شده و سپس ضربه‌ای به آن وارد شده است، تا اکسید قطعه گرفته شود. عملیات اکسیدزدایی به این دلیل انجام شد، که پوسته‌های اکسیدی طی فرآیند فورج از روی سطح قطعه کار کنده می‌شود و به‌عنوان ذرات خراشنده عمل می‌کند و منجر به سایش سایا که مکانیزم غالب سایش در فرآیند فورج داغ می‌باشد، می‌شود [۲۶].

پس از انجام عملیات اکسیدزدایی دمای قطعه تا حدود ۱۰۰۰°C کاهش یافت. سپس بلافاصله قطعه زیر پرس گذاشته و فرآیند فورج انجام شده است.

پس از انجام آزمون فشار حلقه روی قطعات مورد نظر و اندازه‌گیری ابعاد نهایی آن‌ها، ضریب اصطکاک توسط نرم-افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS (کد FEM، ABAQUS/Explicit) محاسبه شده است. در مدل‌سازی قطعات مدل حلقه از نوع Axisymmetric

شبیه‌سازی اجزای محدود منجر به پیش‌بینی دقیق و جزئی تغییر شکل مواد و تغییرات هندسی قطعه می‌شود، که در نهایت می‌توان در شرایط مختلف اصطکاک منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک را از آن به‌دست آورد [۲۵].

ذکر این نکته لازم است که آزمون فشار حلقه مقدار متوسطی از اصطکاک سطحی را اندازه می‌گیرد. بنابراین این آزمون برای بررسی جزئیات اصطکاک یک فرآیند ناکافی است، ولی برای پیش‌بینی رفتار قطعه بر اثر اصطکاک و مقایسه‌ی تأثیر روان کارهای مختلف مناسب است [۲۱].

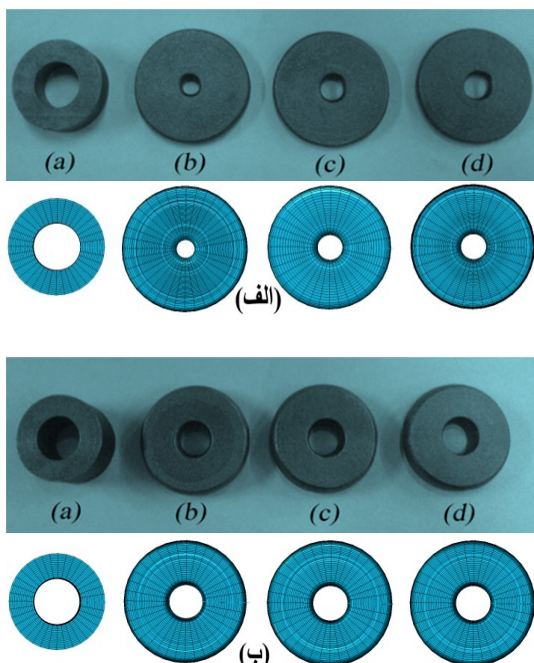
در این تحقیق پس از انجام آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی آن توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS، ضریب اصطکاک در فرآیند فورج مورد نظر محاسبه و تأثیر روان کار مخلوط پودر گرافیت در آب در ابعاد قطعه‌ی نهایی و در نتیجه کاهش اصطکاک بررسی شده است. همچنین پس از محاسبه‌ی ضریب اصطکاک توسط منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک و مشاهده‌ی اختلاف زیاد بین مقادیر ضریب اصطکاک به‌دست آمده در این دو روش این نتیجه به‌دست آمد، که شبیه‌سازی شرایط فورج داغ مجموعه‌ی همگانی از منحنی‌های کالیبراسیون فراهم نمی‌آورد.

## ۲- روش آزمایش

هدف از انجام این تحقیق به‌دست آوردن ضریب اصطکاک و بررسی اثر روان کار در فرآیند فورج تولید ابزارآلات دستی از جنس فولاد CK45 توسط آزمون فشار حلقه و همچنین شبیه‌سازی و تحلیل آن می‌باشد. بدین منظور ابتدا قطعات حلقه‌ای شکل از جنس فولاد CK45 با نسبت‌های ابعاد استاندارد «ضخامت: قطر داخلی: قطر خارجی» «۴: ۳: ۶» (ضخامت ۳۰mm، قطر داخلی ۲۲/۵mm و قطر خارجی ۴۵mm) و «۲: ۳: ۶» (ضخامت ۱۵mm، قطر داخلی ۲۲/۵mm و قطر خارجی ۴۵mm)

روان کار مخلوط گرافیت در آب است؛ که نشان دهنده‌ی اصطکاک شدید بین قطعه و قالب در طی انجام فرآیند در شرایط بدون روان کار است.

با دقت در ابعاد قطعات آزمایش شده با دو نوع روان کار در شکل ۱ به وضوح می‌توان دریافت، که افزایش درصد گرافیت در آب از ۵٪ به ۱۰٪ تأثیر زیادی در افزایش قطر داخلی قطعات محصول و در نتیجه کاهش اصطکاک ندارد. ضرایب اصطکاک به‌دست آمده توسط نرم‌افزار ABAQUS نیز این موضوع را تأیید می‌کند (جدول ۱). البته همان‌طور که مشخص است، این افزایش درصد گرافیت در روان کار به میزان بسیار کمی باعث کاهش ضریب اصطکاک می‌شود.



شکل ۱- شکل اولیه و نهایی قطعات در آزمایش فشار حلقه، (الف): نسبت ابعاد «۶: ۳: ۲»، (ب): نسبت ابعاد «۶: ۳: ۴» [a]: قطعه‌ی اولیه، (b): بدون روان کار، (c): روان کار مخلوط ۵٪ گرافیت در آب، (d): روان کار مخلوط ۱۰٪ گرافیت در آب]

Deformable و مدل قالب‌ها از نوع Axisymmetric Analytical rigid تعیین شد. در ادامه دانسیته و خواص الاستیک و پلاستیک فولاد CK45 وارد نرم‌افزار شد و یک Section از نوع Solid/Homogeneous برای حلقه در نظر گرفته شد. سپس آنالیز Dynamic, Explicit برای حل مسئله در نظر گرفته شد. در ادامه شرایط بارگذاری مانند سرعت برخورد کوبه‌ی پرس به قطعه و درجه‌ی آزادی قالب و قطعه به نرم‌افزار داده شد. به‌منظور کنترل مش‌بندی از شکل المان Quad و تکنیک Structured استفاده شد. در طراحی نوع المان‌ها از خانواده‌ی Axisymmetric Stress و از شیوه‌ی Linear استفاده شد. بدین ترتیب المان به‌کار رفته برای مش‌بندی از نوع CAX4R می‌باشد. پس از شبیه‌سازی فرآیند مقادیر مختلفی به عنوان ضریب اصطکاک برای نرم‌افزار تعریف شد، که به ازای هریک از این ضرایب، اندازه‌های خاصی برای ابعاد نهایی قطعه حاصل شده‌است. در نهایت پس از مقایسه‌ی هر یک از این ابعاد با ابعاد قطعه‌ی حاصل از آزمایش فشار حلقه، ضریب اصطکاک فرآیند در هر حالت به‌دست آمده است.

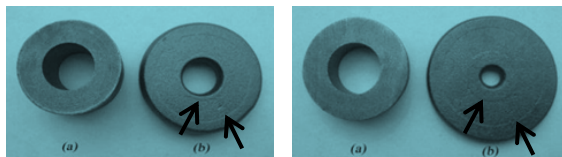
### ۳- نتایج و بحث

در شکل ۱ قطعات اولیه و نهایی آزمایش شده در شرایط مختلف روان کاری و همچنین تصاویر مربوط به شبیه‌سازی قطعات نشان داده شده‌است. وقتی قطعات حاصل از آزمون فشار حلقه علی‌الخصوص در مورد حلقه‌ها با نسبت ابعاد «۶: ۳: ۲» مورد بررسی قرار گرفت، مشاهده شد که قطر داخلی قطعات آزمایش شده بدون روان کار کوچک‌تر از قطر اولیه‌ی قطعات و قطر داخلی قطعات تست شده با

جدول ۱- ضریب اصطکاک ( $\mu$ ) به‌دست آمده از منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک و شبیه‌سازی فرآیند

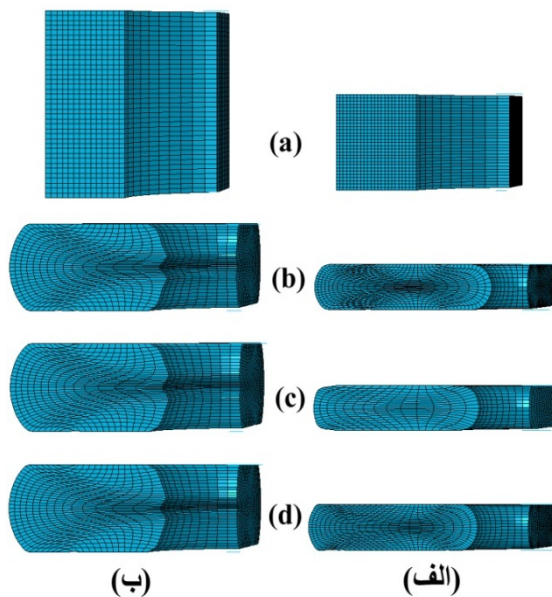
$D_0 : D_1 : H$	بدون روان کار		روان کار ۵٪ گرافیت در آب		روان کار ۱۰٪ گرافیت در آب	
	شبیه‌سازی	منحنی کالیبراسیون	شبیه‌سازی	منحنی کالیبراسیون	شبیه‌سازی	منحنی کالیبراسیون
۴۵ : ۲۲/۵ : ۱۵	اصطکاک چسبنده	اصطکاک چسبنده	۰/۲۶۰	۰/۴۹۱	۰/۲۳۲	۰/۴۴۶
۴۵ : ۲۲/۵ : ۳۰	اصطکاک چسبنده	۰/۲۴۲	۰/۵۰۴	۰/۲۳۵	۰/۴۸۰	۰/۲۲۷

خارجی اولیه‌ی قطعه را مشاهده کرد، که هیچ سیلانی از خود نشان نداده‌اند (علامت پیکان). چون در شرایط اصطکاک چسبنده، مواد سطحی قطعه‌ی اولیه که از ابتدا در تماس با قالب است، لغزشی ندارد و در جای خود ثابت باقی می‌ماند. همان‌طور که از نحوه‌ی سیلان مواد در شکل ۴ مشخص است، موادی هم که در دو طرف این لبه‌ها در قطعه‌ی نهایی وجود دارد، ناشی از سیلان مواد از بخش داخلی قطعه به سمت سطوح قطعه می‌باشد.



(الف) (ب)

شکل ۳- عدم لغزش مواد در شرایط اصطکاک چسبنده،  
(الف): نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶»، (ب): نسبت ابعاد «۴: ۳: ۶»  
(a): قطعه‌ی اولیه، (b): بدون روان کار]

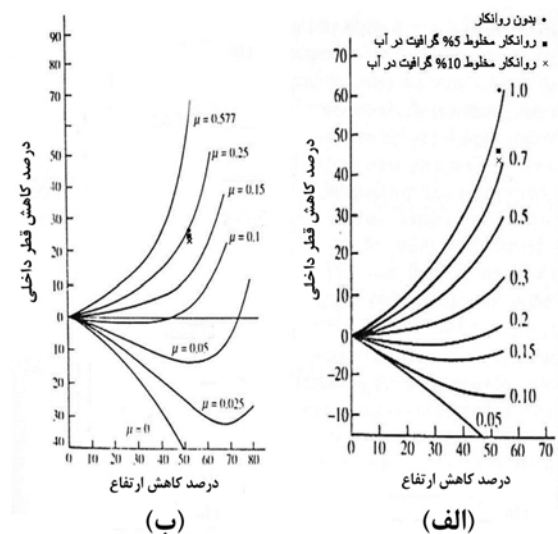


(الف) (ب)

شکل ۴- سیلان مواد از قسمت‌های داخلی قطعه به سطح،  
(الف): نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶»، (ب): نسبت ابعاد «۴: ۳: ۶»  
(a): قطعه‌ی اولیه، (b): بدون روان کار، (c): روان کار مخلوط  
۵٪ گرافیت در آب، (d): روان کار مخلوط ۱۰٪ گرافیت در آب]

در شرایط تست یکسان هر چه ضخامت حلقه‌ی اولیه کمتر باشد، پس از انجام تست تغییرات قطر داخلی آن

برای محاسبه‌ی ضریب اصطکاک توسط منحنی‌های کالیبراسیون، ابتدا بایستی دو پارامتر درصد کاهش قطر داخلی ( $\Delta D_i$ %) و درصد کاهش ارتفاع ( $\Delta H$ %) محاسبه شود. پس از محاسبه‌ی ضریب اصطکاک توسط منحنی-های کالیبراسیون (شکل ۲) مشاهده شد، که این مقادیر با مقادیر حقیقی ضریب اصطکاک که توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS محاسبه شده و در جدول ۱ آمده، بسیار متفاوت است. در نتیجه شبیه‌سازی شرایط فورج داغ مجموعه‌ی همگانی از منحنی کالیبراسیون فراهم نمی‌آورد. منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک باید برای هر جنس خاص حلقه تحت دماهای خاص قالب و حلقه و شرایط خاص سرعت کوبه تولید شوند. ولی تحقیقات نشان می‌دهد که تحت شرایط فورج سرد، این منحنی‌ها را می‌توان به عنوان همگانی در نظر گرفت، زیرا خواص ماده (یعنی کرنش سختی) تأثیر کمی بر منحنی دارد [۱۰ و ۱۹].



(الف) (ب)

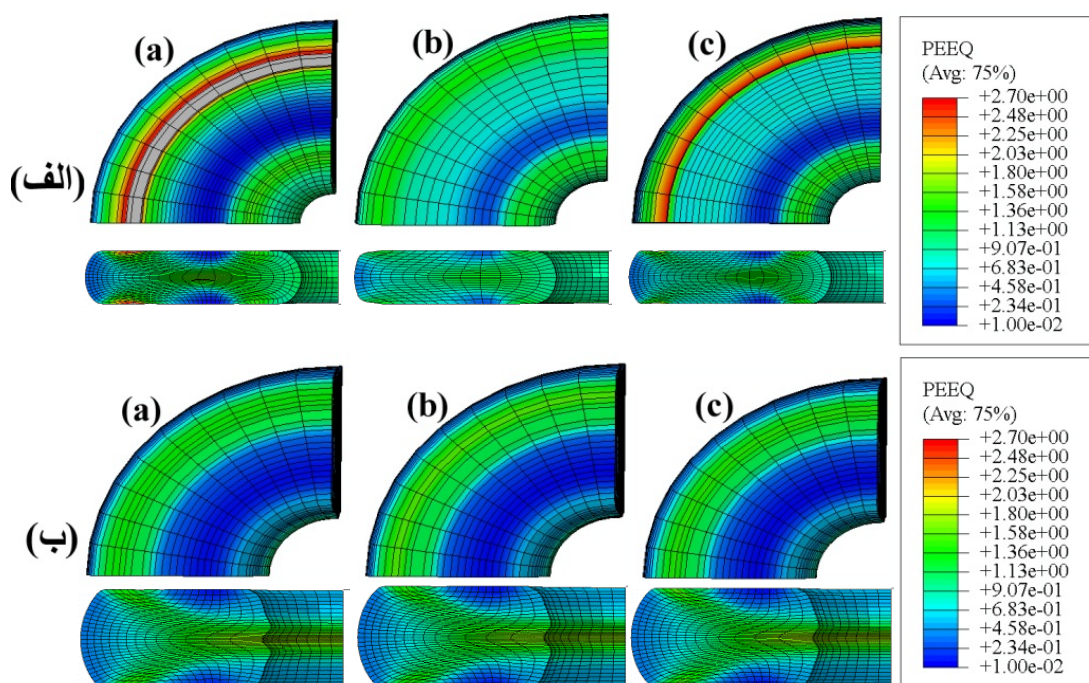
شکل ۲- محاسبه‌ی ضریب اصطکاک فرآیند توسط منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک (الف) نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶»،  
(ب) نسبت ابعاد «۴: ۳: ۶» [۲۴]

در شکل ۳ سطوح قطعات اولیه و قطعات نهایی که در شرایط اصطکاک چسبنده آزمایش شدند، (قطعات تست شده بدون روان کاری) آمده است. با توجه به سطوح قطعات تست شده بدون روان کاری، می‌توان لبه‌ی داخلی و

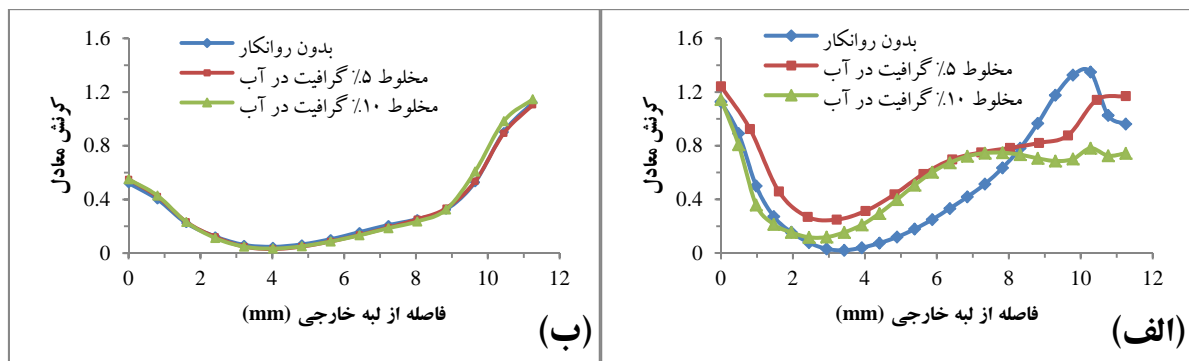
موضوع در مورد قطعات با ابعاد اولیه‌ی یکسان صدق می‌کند؛ یعنی در اینجا لزوماً، به دلیل میزان بیشتر کاهش قطر داخلی، ضریب اصطکاک در قطعات با نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶» بیشتر از ضریب اصطکاک در قطعات با نسبت ابعاد «۳: ۴: ۶» نیست.

در شکل ۵ چگونگی توزیع کرنش معادل در سطوح نهایی قطعات آمده است. مطابق شکل ۵ میزان کرنش در سطوح بالا و پایین قطعه‌ی نهایی به سمت لبه‌های خارجی، بیشتر از قسمت‌های دیگر است. در همین سطوح بالا و پایین به سمت لبه‌های داخلی نیز میزان کرنش زیاد است. واضح است، در آن قسمت از سطح نهایی قطعات که در تماس با قالب بوده، میزان کرنش کم است؛ چون اصطکاک بین قطعه و قالب اجازه‌ی لغزش به آن قسمت از قطعه را نمی‌دهد. منحنی‌های شکل ۶ که نشان‌دهنده‌ی چگونگی توزیع کرنش معادل در سطحی از قطعه که در تماس با قالب است، نیز موید این مطلب می‌باشد.

بیشتر خواهد بود. با دقت در شکل ۱ به وضوح می‌توان دریافت که کاهش قطر داخلی در قطعات با نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶» بیشتر از کاهش قطر داخلی در قطعات با نسبت ابعاد «۳: ۴: ۶» می‌باشد؛ توجه به این نکته ضروری است، که میزان کاهش ارتفاع برای هر دو نوع قطعه ۵۰٪ بوده است. با توجه به چگونگی سیلان مواد در شکل ۴ می‌توان صحت این موضوع را تأیید کرد. در قطعات با نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶» سیلان مواد طی انجام آزمون، هم به سمت لبه‌ی خارجی و هم به سمت لبه‌ی داخلی قطعه می‌باشد؛ ولی در قطعات با نسبت ابعاد «۳: ۴: ۶» سیلان مواد بیشتر به سمت لبه‌ی خارجی قطعه و کمتر به سمت لبه‌ی داخلی قطعه است. به همین دلیل تغییرات قطر داخلی در قطعات با نسبت «۳: ۴: ۶» زیاد محسوس نیست. همان‌طور که توضیح داده شد، در آزمون فشار حلقه هر چه کاهش قطر داخلی بیشتر باشد، ضریب اصطکاک بیشتر است. توجه به این نکته ضروری است، که این



شکل ۵- توزیع کرنش معادل در سطوح قطعه‌ی نهایی، (الف): نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶»، (ب): نسبت ابعاد «۳: ۴: ۶»  
(a): بدون روان‌کار، (b): روان‌کار مخلوط ۵٪ گرافیت در آب، (c): روان‌کار مخلوط ۱۰٪ گرافیت در آب



شکل ۶- منحنی توزیع کرنش معادل در سطح قطعه، (الف): نسبت ابعاد «۲: ۳: ۶»، (ب): نسبت ابعاد «۴: ۳: ۶»

#### ۴- نتیجه گیری

سرعت‌های مختلف کوبه به صورت جداگانه تولید شوند و مورد استفاده قرار گیرند.

۳. در شرایط تست یکسان هر چه ضخامت حلقه‌ی اولیه کمتر باشد، تغییرات قطر داخلی آن بیشتر خواهد بود. در نتیجه مقایسه‌ی ضریب اصطکاک چند فرآیند در آزمون فشار حلقه بر اساس مقایسه‌ی درصد کاهش قطر داخلی قطعات، فقط در حلقه‌هایی با نسبت ابعاد اولیه‌ی یکسان، قابل انجام است.

۴. میزان کرنش معادل در سطوح بالا و پایین قطعه‌ی نهایی به سمت لبه‌ی خارجی قطعه بیشتر از دیگر نقاط است. از طرف دیگر آن قسمت از سطح نهایی قطعه که از ابتدا در تماس با قالب بوده، کمترین کرنش را داشته است.

#### تقدیر و تشکر

بدین وسیله از شرکت تولیدی ابزارمهدی به دلیل همکاری در انجام آزمون فشار حلقه تشکر می‌کند. همچنین از حمایت دفتر استعداد درخشان دانشگاه سمنان تقدیر به عمل می‌آورد.

در این تحقیق با انجام آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی آن توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS، اثر روان‌کار مخلوط گرافیت در آب و همچنین تأثیر میزان گرافیت روان‌کار در کاهش اصطکاک فرآیند فورج داغ بررسی شده است. نتایج حاصل از تحلیل آزمون فشار حلقه عبارتند از:

۱. استفاده از روان‌کار مخلوط گرافیت در آب در کاهش ضریب اصطکاک فرآیند فورج داغ تأثیر بسزایی دارد؛ ولی افزایش درصد گرافیت روان‌کار از ۵٪ به ۱۰٪ تأثیر چندانی در کاهش ضریب اصطکاک فرآیند ندارد.
۲. باتوجه به اختلاف زیاد ضرایب اصطکاک حاصل از شبیه‌سازی فرآیند با ضرایب اصطکاک حاصل از منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک، این نتیجه به دست می‌آید که یک منحنی کالیبراسیون اصطکاک نمی‌تواند برای شرایط مختلف فورج داغ مورد استفاده قرار گیرد. این منحنی‌ها باید برای جنس‌های مختلف حلقه، دماهای مختلف حلقه و قالب و همچنین

#### مراجع

- [1] Robinson, T., Ou, H., Armstrong, C.G. (2004). "Study on ring compression test using physical modeling and FE simulation". Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 54-59.
- [2] Han, X., Hua, L. (2012). "Friction behaviors in cold rotary forging of 20CrMnTi alloy". Tribology International, Vol. 55, pp. 29-39.

- [3] Bay, N., Eriksen, M., Tan, X., Wibom, O. (2011). "A friction model for cold forging of aluminum, steel and stainless steel provided with conversion coating and solid film lubricant". *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 60, pp. 303–306.
- [4] Ozel, T. (2006). "The influence of friction models on finite element simulations of machining". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 518–530.
- [5] Hung, J.C., Tsai, Y.C., Hung, C. (2007). "Frictional effect of ultrasonic-vibration on upsetting". *Ultrasonics*, Vol. 46, pp. 277–284.
- [6] Barrau, O., Boher, C., Gras, R., Rezai-Aria, F. (2003). "Analysis of the friction and wear behavior of hot work tool steel of forging". *Wear*, Vol. 255, pp. 1444–1454.
- [7] Joun, M.S., Moon, H.G., Choi, I.S., Lee, M.C., Jun, B.Y. (2009). "Effects of friction laws on metal forming processes". *Tribology International*, Vol. 42, pp. 311–319.
- [8] Sagisaka, Y., Ishibashi, Y., Nakamura, T., Sekizawa, M., Sumioka, Y., Kawano, M. (2012). "Evaluation of environmentally friendly lubricants for cold forging". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, pp. 1869–1874.
- [9] Buchner, B., Maderthoner, G., Buchmayr, B. (2008). "Characterisation of different lubricants concerning the friction coefficient in forging of AA2618". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, pp. 41–47.
- [۱۰] آلتان، ت.، نگایل، گ.، شن، گ. (۱۳۸۵). "مبانی و کاربرد آهنگری سرد و گرم". ترجمه‌ی حجتی، م.ح.، بخشی، م.، حسینی‌پور، س.ج. چاپ اول، انتشارات دانشگاه مازندران.
- [11] Rao, K.P., Sivaram, K. (1993). "A review of ring-compression testing and applicability of the calibration curves". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 37, pp. 295–318.
- [12] Gangopadhyay, T., Pratihar, D.K., Basak, I. (2011). "Expert system to predict forging load and axial stress". *Applied Soft Computing*, Vol. 11, pp. 744–753.
- [13] Dubar, M., Dubois, A., Dubar, L. (2005). "Wear analysis of tools in cold forging: PVD versus CVD TiN coatings". *Wear*, Vol. 259, pp. 1109–1116.
- [14] Jung, K.H., Lee, H.C., Kim, D.K., Kang, S.H., Im, Y.T. (2012). "Friction measurement by the tip test for cold forging". *Wear*, Vol. 286–287, pp. 19–26.
- [15] Zhang, Q., Felder, E., Bruschi, S. (2009). "Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5720–5729.
- [16] Zhu, Y., Zeng, W., Ma, X., Tai, Q., Li, Z., Li, X. (2011). "Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test using FEM". *Tribology International*, Vol. 44, pp. 2074–2080.
- [17] Sofuoglu, H., Gedikli, H. (2001). "Determination of friction coefficient by employing the ring compression test". *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 123, pp. 338–348.
- [18] Fereshteh-Saniee, F., Pillinger, I., Hartley, P. (2004). "Friction modelling for the physical simulation of the bulk metal forming processes". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 151–156, pp. 154–156.
- [19] Manisekar, K., Narayanasamy, R., Malayappan, S. (2006). "Effect of friction on barrelling in square billets of aluminium during cold upset forging". *Materials and Design*, Vol. 27, pp. 147–155.
- [20] Manisekar, K., Narayanasamy, R. (2007). "Effect of friction on barrelling in square and rectangular billets of aluminium during cold upset forging". *Materials and Design*, Vol. 28, pp. 592–598.
- [21] Hartley, R.S., Cloete, T.J., Nurick, G.N. (2007). "An experimental assessment of friction effects in the split Hopkinson pressure bar using the ring compression test". *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, pp. 1705–1728.
- [22] Hayhurst, D.R., Chan, M.W. (2005). "Determination of friction models for metallic die-workpiece interfaces". *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 47, pp. 1–25.



- [23] Yeh, W.C., Wu, M.C. (2008). "Effect of natural boundary condition and the neutral surface of nonlinear type on the upper-bound solution to upset forging of rings using a variational approach". *Mechanics of Materials*, Vol. 40, pp. 427–445.
- [24] Mielnik, E.M. (1991). "Metal working science and engineering". McGraw-Hill.
- [25] Tan, X. (2002). "Comparisons of friction models in bulk metal forming". *Tribology International*, Vol. 35, pp. 385–393.
- [26] *Metals Handbook*, (1992). "Friction, Lubrication and Wear Technology". Vol. 18, First Ed., ASM, Metals Park, pp.1268 and 1509.