

تخمین ضریب اصطکاک برخی روانکارها توسط آزمایش حلقه

محسن خلیلیان^۱ و محمد خدائی^۲

۱- کارشناس ارشد و مدرس، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر

۲- عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهر مجلسی

khalilian_just@yahoo.com

چکیده

یکی از مهمترین پدیده‌های مؤثر بر فرآیند آهنگری، پدیده اصطکاک بین سطوح می‌باشد که گاهی سودمند و گاهی ناخواسته و مضر می‌باشد. علاوه بر رعایت یک سری اصول اساسی، معمول‌ترین و بهترین روش کنترل اصطکاک و سایش در این فرآیند انجام روانکاری صحیح و منظم می‌باشد. به دلیل کم هزینه بودن عملیات روانکاری در مقایسه با کاهش هزینه‌ای که این عملیات در فرآیند تولید دارد، ارزیابی روانکارها یک اصل مهم در آهنگری است. آزمایش حلقه یکی از بهترین روش‌های ارزیابی روانکارها می‌باشد که در آن با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود ضریب اصطکاک در یک فرآیند آهنگری محاسبه می‌شود. در این تحقیق با استفاده از آزمایش حلقه به صورت تجربی، اثر برخی روانکارها مانند گریس و اکسید آنتیموان در کاهش اصطکاک بین قطعه و قالب آهنگری بررسی گردیده‌است و اثر روانکار به وضوح در ابعاد نهایی قطعه و در نتیجه کاهش اصطکاک مشاهده شده‌است، به طوری که باعث تبدیل اصطکاک چسبنده به اصطکاک لغزنده گردیده‌است. همچنین به کمک ابعاد نهایی قطعه و توسط شبیه‌سازی با نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS، ضریب اصطکاک بین سطوح در شرایط مختلف تخمین زده شد که همخوانی بین مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده به وسیله نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS و منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی برای شرایط مختلف اصطکاک دیده شد.

واژه‌های کلیدی:

آزمایش حلقه، ضریب اصطکاک، روانکار، شبیه‌سازی FEM.

۱- مقدمه

در شکل‌دهی فلزات علاوه بر انرژی لازم بر تغییر شکل فلز، انرژی مازاد برای غلبه بر اصطکاک نیاز است [۳]، اما به این علت که اکثر دستگاه‌های تولیدی ظرفیت توان اضافی را دارند این موضوع در بخش تولید اهمیت عملی ندارد. اما از اثرات نامطلوب اصطکاک در بسیاری از شرایط انتقال فلز قطعه کار به ابزار [۴]، تأثیر گذاری بر سطح نهایی محصول و سایش قالب‌ها

هر چند که شکل‌دهی فلزات به روش آهنگری قدمتی کهن دارد، اما طراحی و تحلیل پارامترهای مختلف در این فرآیند همچنان مورد توجه می‌باشد [۱]. پدیده اصطکاک یکی از مهمترین متغیرها در تمامی حالات شکل‌دهی فلزات می‌باشد که همچنان مورد بررسی است [۲].

است [۱۰]. چون با افزایش اصطکاک مقاومت اصطکاکی در جهت جریان‌های درونی مواد حلقه به سمت مرکز از مقاومت اصطکاکی در جهت بیرون کم‌تر می‌شود [۱۵]. تحقیقات نشان می‌دهد روش صحیح محاسبه‌ی ضریب اصطکاک در تست حلقه برقراری ارتباط بین درصد کاهش قطر داخلی (ΔD_I %) با درصد کاهش ارتفاع (ΔH %) است [۲]. 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 می‌شوند.

نرم‌افزارهای مختلفی برای تحلیل فرآیندهای آهنگری وجود دارد [۱۰]. به‌دلیل دقت و سرعت روش‌های عددی در تحلیل مسائل پیچیده شکل‌دهی و تولیدی، کدهای تجاری و دانشگاهی بسیاری بر اساس این روش‌ها نوشته شده‌است. نرم‌افزار علمی-تجاری ABAQUS، یکی از توانمندترین کدها بر مبنای روش المان محدود است [۱۶]. این بسته نرم‌افزاری از دو شبیه‌ساز صریح^۶ و ضمنی^۷ تشکیل شده‌است. حل مسائل غیر خطی پیچیده با روش صریح معمولاً به‌صرفه‌تر بوده و علاوه بر زمان حل نسبتاً کم در مقابل روش ضمنی، دقت بهتری را نیز ارائه می‌کند. مسائل شکل‌دهی فلزات از جمله مسائلی هستند که دارای رفتار کاملاً غیر خطی بوده و دارای تماس‌های پیچیده هستند. بسته نرم‌افزاری ABAQUS/Explicit به‌عنوان یکی از مشهورترین شبیه‌سازی‌های صریح، در تحلیل فرآیندهای شکل‌دهی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش نیز به‌دلیل ماهیت تغییر شکل گسترده و همچنین تماس‌های پیچیده بین ابزار و قطعه، نرم‌افزار ABAQUS به‌عنوان بهترین انتخاب مورد استفاده قرار گرفته‌است.

در پژوهش حاضر پس از انجام آزمایش حلقه و شبیه‌سازی آن توسط نرم‌افزار تحلیل المان محدود ABAQUS، ضریب اصطکاک در فرآیند آهنگری مورد نظر محاسبه و تأثیر روانکارهای مختلف در ابعاد نهایی قطعه و در نتیجه کاهش اصطکاک مشاهده شد. همچنین همخوانی بین مقادیر ضریب

و ابزار، ایجاد عیوبی مانند لبه‌ی سرد در آن و ناهمگنی تغییر شکل می‌باشد [۳ و ۵].

در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات به‌منظور کاهش اصطکاک مواد ویژه‌ای بین سطوح تماس قطعه و قالب افزوده می‌شود، این مواد روانکار نام دارند [۶] که اکثراً از خانواده سیالات هستند [۷]. عملکرد روانکار مناسب در فلزکاری شامل کاهش سایش قالب، ممانعت از کندگی فلز از روی سطح ابزار [۲]، کاهش اصطکاک برای تولید محصول مرغوب با حداقل نیروی ممکن، کمک در راحت جدا شدن محصول آهنگری از قالب، کنترل پرداخت سطحی [۸]، کاهش بار تغییر شکل، افزایش حد تغییر شکل قبل از شکست [۵]، کاربرد به‌عنوان خنک‌کننده، محافظ حرارتی می‌باشد [۹].

عوامل تأثیرگذار بر اصطکاک و روانکاری در یک عملیات آهنگری سرد عبارتند از: پارامترهای ابزار قطعه کار مانند خواص ماده‌ی قطعه کار، صافی سطح ابزار و قطعه کار، هندسه قالب و پوسته‌های اکسیدی موجود روی سطح قطعه کار، پارامترهای روانکار مانند ترکیب، گرانیروی و مقدار روانکار (نوع روانکار)، پارامترهای فرآیندی مانند فشار اعمالی توسط قالب، سرعت و طول لغزش قالب نسبت به قطعه کار، مقدار انبساط سطحی [۱۰]. در شکل‌دهی فلزات برای تخمین ضریب اصطکاک روانکار یا عامل اصطکاکی معمولاً از آزمایش حلقه استفاده می‌شود. با توجه به اینکه آزمایش حلقه به‌طور گسترده‌ای برای تعیین شرایط اصطکاک در مراحل شکل‌دهی و تعیین روانکارها استفاده می‌شود، از این رو مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده‌است. فشردگی حلقه اولین بار برای مطالعه اصطکاک توسط کونجی^۱ [۱۱]، انجام گرفت و بعد از آن توسط مل^۲ و دیپرر^۳ [۱۲]، راثو^۴ [۱۳] و ونگ^۵ [۱۴] توسعه یافت.

در این آزمایش، یک نمونه‌ی حلقه‌ای شکل تخت، تا مقدار مشخصی از کاهش ارتفاع فشرده می‌شود. تغییر در قطرهای داخلی و خارجی حلقه‌ی آهنگری شده به‌میزان بسیار زیادی به‌اصطکاک در سطح تماس قالب-حلقه بستگی دارد. هر چه کاهش قطر داخلی بیشتر باشد، ضریب اصطکاک بیشتر

۳- ضریب اصطکاک، در سطح تماس قطعه و قالب ثابت است. دمای سطح ثابت در نظر گرفته می‌شود. در این حالت تنش مماسی عبارت است از $\tau = \frac{m\sigma_0}{\sqrt{3}}$ که σ_0 تنش تسلیم ماده می‌باشد. با اندازه‌گیری ابعاد هندسه تغییر شکل یافته می‌توان ضریب اصطکاک را تعیین نمود. برای حالت کاهش ارتفاع تا ۶۰٪ می‌توان ضریب اصطکاک کولمب را با استفاده از رابطه $\mu = \frac{m_{Ring}}{2\sqrt{3}}$ محاسبه نمود [۱۳].

۲-۲- فرضیات حل به روش المان محدود

۱- در کلیه تحلیل‌ها به علت وجود تقارن در قطعه، برای کاهش زمان محاسبات از مدل تقارن محوری استفاده شده‌است.
 ۲- به دلیل اینکه فرآیند مورد مطالعه در این پژوهش، در حالت سرد در نظر گرفته شده‌است، تنش سیلان مستقل از نرخ کرنش بوده و تنها وابسته به میزان کرنش است. همچنین فرض شده‌است که در حین انجام فرآیند دمای قطعه کار ثابت می‌ماند.
 ۳- کلیه تحلیل‌ها در ABAQUS/Explicit انجام گرفته‌است.
 ۴- در کلیه تحلیل‌ها برای شبیه‌سازی المانهای قطعه از المان متقارن محوری پیوسته CAX4R استفاده شده‌است. در مورد ابزار کار، قالب، از جسم صلب عددی بدون المان استفاده شده‌است.
 در مورد آزمایش حلقه نیازی به سرعت اولیه قالب نیست و حرکت ابزار توسط یک جدول تعیین شده به نرم‌افزار داده می‌شود. در شکل (۱) نمونه‌ای از چگونگی حرکت قالب نشان داده شده‌است [۱۸].

این تابع سهموی در نرم‌افزار ABAQUS به نام منحنی Smooth تعریف شده معادله آن به زمان شروع حرکت، پایان حرکت و جدول تعیین شده توسط اپراتور بستگی دارد [۱۸]. علت انتخاب تابع سهموی برای سرعت حرکت قالب این است که حرکت در ابتدا و انتهای کورس آهسته بوده (به خاطر برقرار شدن تماس بهتر در نرم‌افزار) و در وسط کورس بیشترین سرعت را داشته

اصطکاک به دست آمده به وسیله نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS و منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک برای شرایط مختلف اصطکاک دیده شد. از این همخوانی بین مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده در این دو روش این نتیجه به دست آمد که شبیه‌سازی شرایط آهنگری سرد مجموعه‌ای از منحنی‌های کالیبراسیون ایجاد می‌کند.

۲- روش تحقیق

در بیشتر مسائل شکل‌دهی مانند اکستروژن و آهنگری نیاز به موادی است که میزان کرنش زیادی بر روی آن در حالت سرد قابل اعمال باشد. آلیاژهای کارپذیر آلومینیوم این قابلیت را دارا می‌باشند. به همین دلیل برای تست تجربی و شبیه‌سازی از آلومینیوم ۵۱۵۴ با خواص زیر استفاده گردید [۱۷]:
 رابطه تنش و کرنش حقیقی:

$$\sigma = 287.288 \varepsilon^{0.285} \text{ MPa}$$

$$E = 70.7 \text{ GPa} \text{ مدول یانگ}$$

$$\rho = 2660 \text{ Kg} / \text{m}^3 \text{ چگالی}$$

$$\nu = 0.33 \text{ ضریب پواسان}$$

در نرم‌افزار ABAQUS برای شبیه‌سازی خواص مواد برای حالت سخت‌شوندگی ایزوتروپیک علاوه بر معرفی مدول الاستیک، ضریب پواسان و چگالی، رفتار مواد در حالت پلاستیک نیز ضروری می‌باشد. از این جهت برای تعریف وضعیت تنش در حالت پلاستیک از منحنی تنش و کرنش استفاده می‌شود.

۲-۱- فرضیات جهت ارزیابی اصطکاک به کمک آزمایش حلقه

۱- ماده تحت تغییر شکل از قانون جریان میز پیروی می‌کند و هیچ گونه کرنش سختی، تغییر شکل الاستیک و تغییرات حجم رخ نخواهد داد.
 ۲- تغییر شکل حلقه در امتداد ضخامت یکنواخت می‌باشد. یعنی تنشهای اصطکاک توزیع یکنواختی در امتداد ضخامت دارند و تغییر شکل فاقد هر گونه فرم بشک‌ای غیر یکنواخت می‌باشد.

جدول (۱): ضریب اصطکاک برای روانکارهای مختلف.

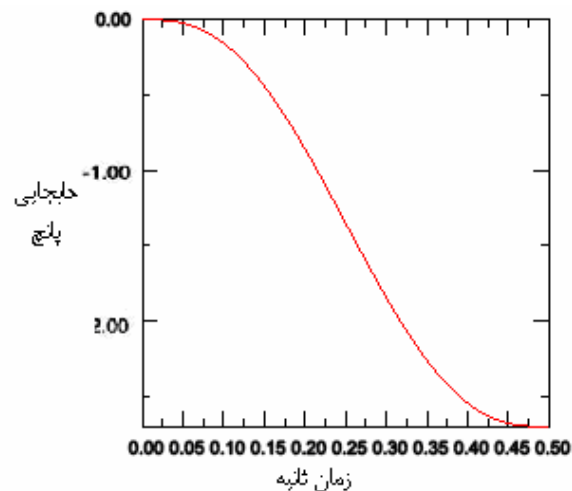
ضریب اصطکاک	بدون روانکار	روانکار گریس	روانکار اکسید آنتیموان
	اصطکاک چسبنده		۰/۳۵

دستگاه پرس مکانیکی بیست تن، به صورت قالب باز و به منظور کنترل دقیق تر کورس پرس از استوپر دقیق استفاده شده است. پس از انجام آزمایش حلقه روی قطعات آلومینیومی و اندازه گیری ابعاد نهایی آن‌ها، ضریب اصطکاک در فرآیند با کمک نرم افزار تحلیل المان محدود ABAQUS محاسبه شده است. به این صورت که پس از شبیه سازی فرآیند مقادیر مختلفی به عنوان ضریب اصطکاک برای نرم افزار تعریف شده که به ازای هر یک از این ضرایب، اندازه های خاصی برای ابعاد نهایی قطعه حاصل شده است. در نهایت پس از مقایسه هر یک از این ابعاد با ابعاد قطعه حاصل از آزمایش عملی حلقه، ضریب هر روانکار تخمین زده شده است (جدول ۱).

۳- نتایج و مباحث

۳-۱- تأثیر روانکار در کاهش اصطکاک

وقتی قطعات حاصل از تست حلقه مورد بررسی قرار گرفت، مشاهده شد که قطر داخلی حلقه های تست شده بدون روانکار کوچکتر از قطر حلقه های آزمایش شده با روانکار و قطر اولیه حلقه ها است (شکل ۲). همان طور که در جدول (۱) مشخص است، وجود روانکار در کاهش ضریب اصطکاک تأثیر قابل توجهی دارد. در واقع ملکول های مواد روانکار با لغزش آسان روی هم، باعث کاهش اصطکاک شده و لغزیدن سطوح فلزی را تسهیل می کنند. ماهیت شیمیایی (استحکام باندهای بین ملکولی) مواد روانکار و اندازه ذرات جامد موجود در آن، تأثیر زیادی بر قابلیت روانکاری آن مواد دارد.

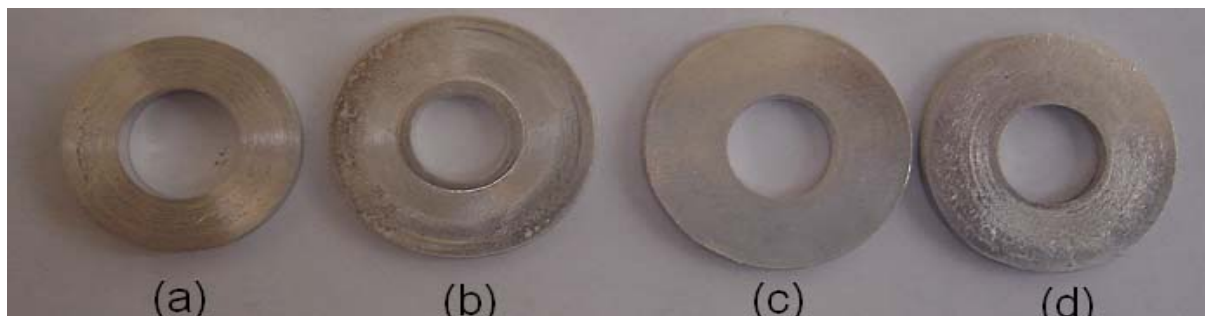


شکل (۱): حرکت پنچ نسبت به زمان که در این نوع حرکت سرعت پنچ به صورت تابع سهموی است [۱۸].

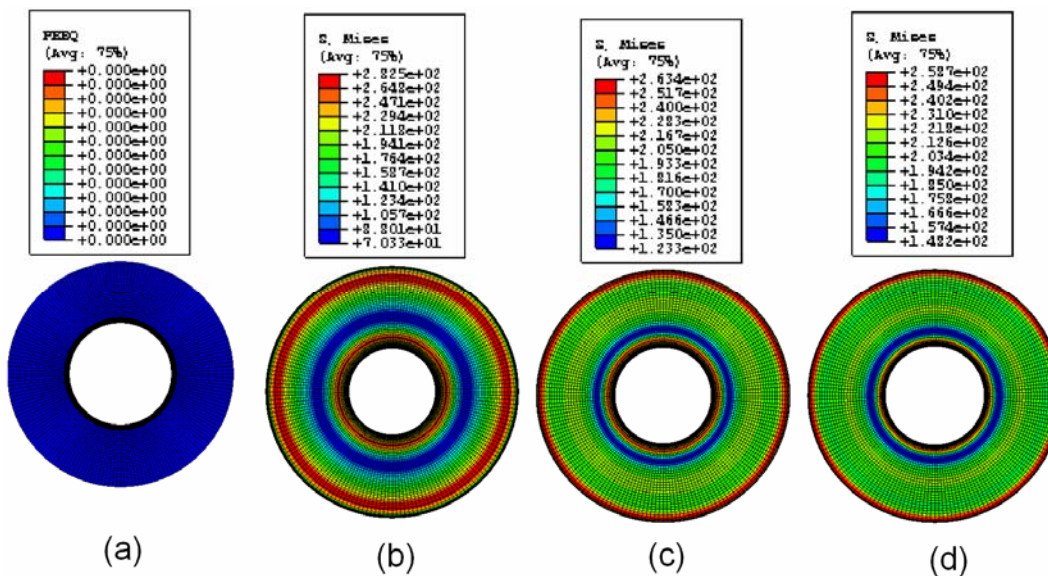
باشد. با توجه به اینکه در این تحقیق برای آزمایش حلقه از پرس مکانیکی استفاده شد، این نوع حرکت دقیقاً با حرکت این پرسها مطابقت دارد.

هدف از انجام این تحقیق به دست آوردن ضریب اصطکاک و بررسی اثر روانکار در فرآیند آهنگری از جنس آلومینیوم ۵۱۵۴ با استفاده از آزمایش حلقه می باشد. مهمترین مزیت آزمایش حلقه اندازه گیری ابعاد فیزیکی فرم نهایی جهت برآورد میزان اصطکاک می باشد، در صورتی که سایر روشهای اندازه گیری اصطکاک نیازمند اندازه گیری خواص مکانیکی ماده می باشد.

بدین منظور ابتدا قطعاتی با نسبت های ابعاد استاندارد (ضخامت: قطر داخلی: قطر خارجی) (۲:۳:۶) (ضخامت ۶/۶۶ mm، قطر داخلی ۱۰ mm و قطر خارجی ۲۰ mm) تهیه شده است. با توجه به شرایط یکسان تولید نمونه ها، زبری سطح در تمام نمونه ها برابر است. هر آزمایش در سه حالت بدون استفاده از روانکار (تحت شرایط خشک) و با استفاده از روانکارهای گریس و اکسید آنتیموان و با سه مقدار فشردگی مختلف ۳۰٪، ۴۵٪ و ۶۰٪ انجام شده است. از طرفی به منظور کاهش ضریب اشتباه هر آزمایش روی سه نمونه یکسان انجام گردیده است. این آزمایش در



(الف)



(ب)

شکل (۲): شکل اولیه و نهایی قطعات در آزمایش حلقه (مقدار فشردگی ۴۵٪، الف) به صورت تجربی، ب) به صورت شبیه‌سازی (توزیع تنش) (a): قطعه اولیه، (b): بدون روانکار، (c): روانکار گریس، (d): روانکار اکسید آنتیموان].

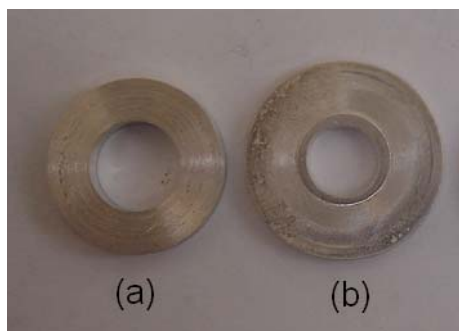
که D_{if} قطر داخلی نهایی، D_{ie} قطر داخلی اولیه، H_F ارتفاع نهایی و H_E ارتفاع اولیه می‌باشد. پس از محاسبه ضریب اصطکاک توسط منحنی‌های کالیبراسیون (شکل ۳) مشاهده شد که این مقادیر با مقادیر حقیقی ضریب اصطکاک که توسط نرم‌افزار تحلیل اجزای محدود ABAQUS محاسبه شده و در جدول (۱) آمده، همخوانی خوبی دارد. بنابراین تحت شرایط آهنگری سرد، این منحنی‌ها را می‌توان به‌عنوان همگانی در نظر گرفت، زیرا در دمای سرد برخی خواص ماده مانند کرنش سختی تأثیر کمی بر منحنی دارند [۱۰].

۲-۳- تخمین ضریب اصطکاک توسط منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک

برای محاسبه ضریب اصطکاک توسط منحنی‌های کالیبراسیون، ابتدا بایستی دو پارامتر درصد کاهش قطر داخلی (ΔD_I) و درصد کاهش ارتفاع (ΔH) توسط روابط زیر محاسبه شود.

$$\% \Delta D_I = \frac{D_{if} - D_{ie}}{D_{if}} * 100 \quad (۱)$$

$$\% \Delta H = \frac{H_F - H_E}{H_F} * 100 \quad (۲)$$

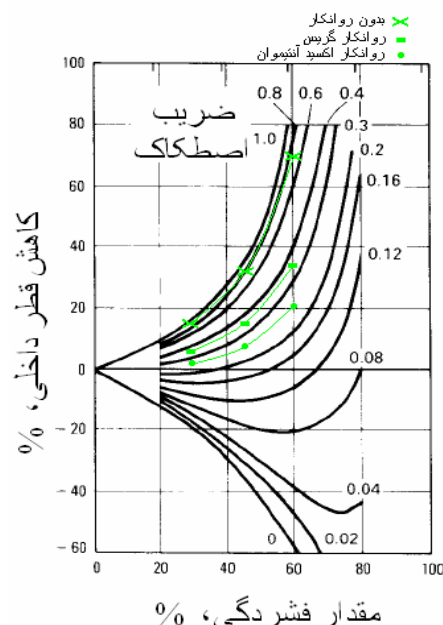


شکل (۴): عدم لغزش موارد در شرایط اصطکاک چسبنده (a): قطعه اولیه، (b): بدون روانکار.

در همین سطوح بالا و پایین به سمت لبه‌های داخلی نیز میزان کرنش زیاد است. واضح است در آن قسمت از سطح قطعه نهایی که در تماس با قالب بوده، میزان کرنش کم است، چون قالب اجازه لغزش به آن قسمت از قطعه را نمی‌دهد و این عدم لغزش با افزایش ضریب اصطکاک به صورت بیشتری مشهود است (شکل ۵ و ۶).

۴-۳- تأثیر روانکار بر نمودارهای نیرو-جابجایی

در شکل (۷) نمودار نیرو-جابجایی برای روانکارهای مختلف مشاهده می‌شود. این مجموعه نمودار برای حالت ۶۰٪ تغییر شکل و برای موارد بدون روانکار، روانکار گریس و روانکار اکسید آنتیموان رسم شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد نیرو برای نمونه با روانکار اکسید آنتیموان حداقل بوده و برای نمونه بدون روانکار به حداکثر مقدار خود می‌رسد و همچنین برای نمونه بدون روانکار مقداری عدم یکنواختی در نمودار نیرو-جابجایی دیده می‌شود که این به دلیل چسبیدگی مواد سطح قطعه به قالب است. پس نتیجه گرفته می‌شود که در مقدار درصد فشردگی یکسان، با افزایش ضریب اصطکاک مقدار نیروی لازم برای تست حلقه افزایش می‌یابد.

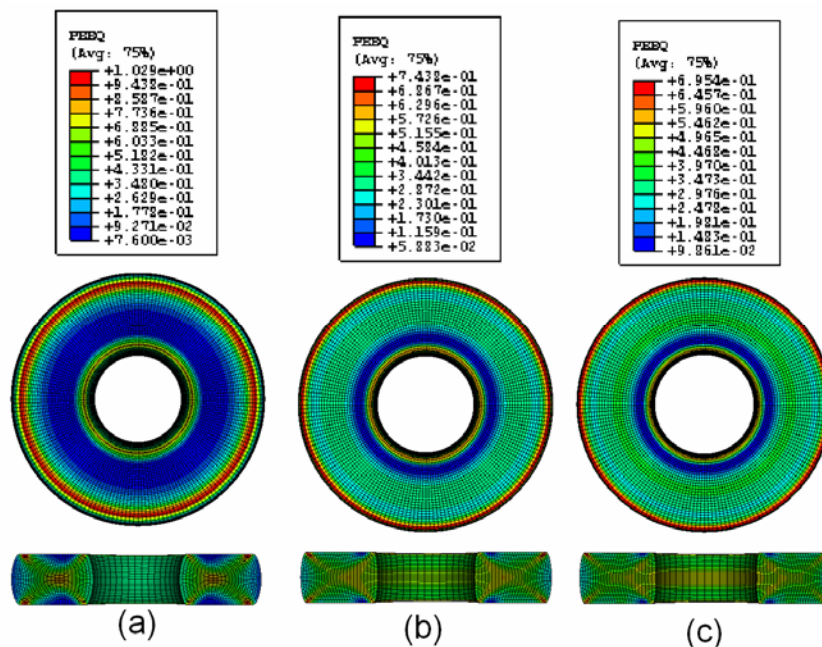


شکل (۳): محاسبه ضریب اصطکاک فرآیند توسط منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی (نسبت ابعاد ۲:۳:۶) [۱۵].

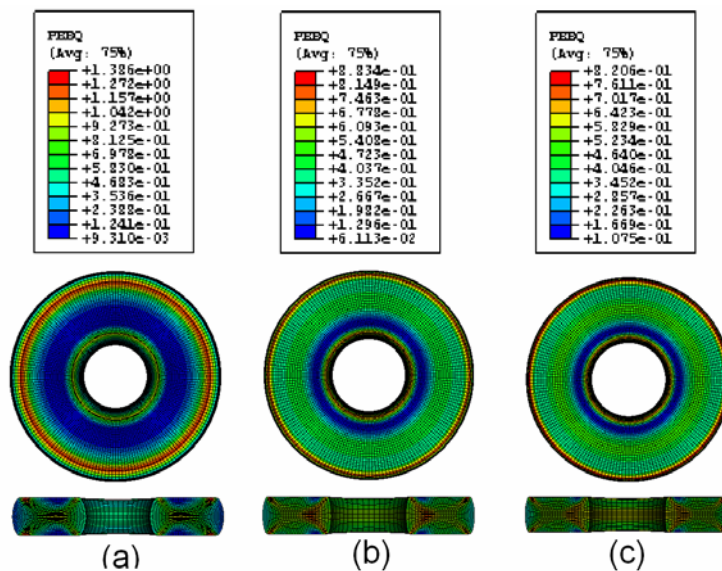
اگر به سطوح قطعات نهایی که در شرایط اصطکاک چسبنده آزمایش شدند (قطعات تست شده بدون روانکاری) دقت شود، دقیقاً می‌توان لبه داخلی و خارجی قطعه اولیه را مشاهده کرد که هیچ حرکتی از خود نشان نداده‌اند. چون در شرایط اصطکاک چسبنده مواد سطح قطعه اولیه که از ابتدا در تماس با قالب است لغزشی ندارد و در جای خود ثابت باقی می‌ماند. موادی هم که در دو طرف این لبه‌ها در قطعه نهایی وجود دارد، حین فرآیند از قسمت‌های داخلی قطعه حرکت کرده و به سطح قطعه آمده‌اند (شکل ۴).

۳-۳- توزیع کرنش معادل در سطوح قطعه تغییر شکل یافته

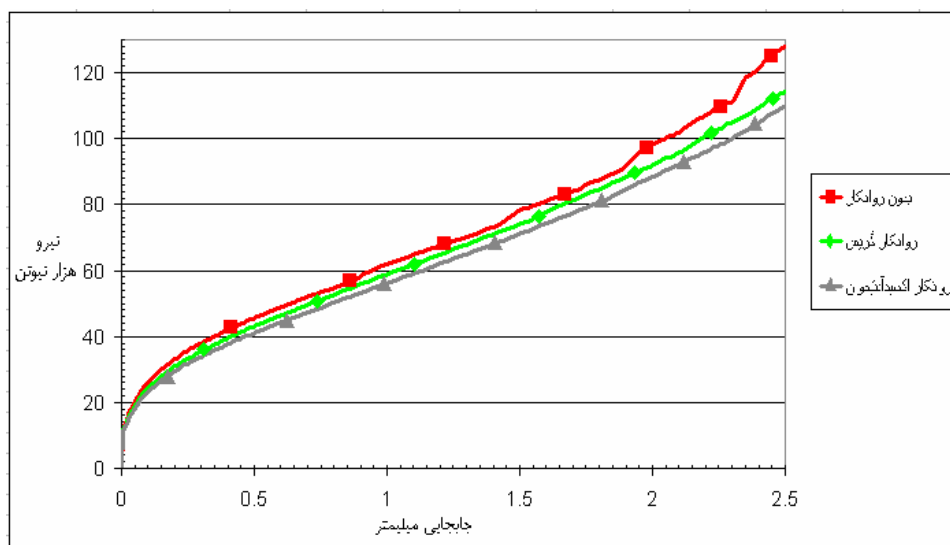
شکل (۵) توزیع کرنش معادل را برای مقدار فشردگی ۴۵٪ و شکل (۶) توزیع کرنش معادل را برای مقدار فشردگی ۶۰٪ نشان می‌دهد. با بررسی چگونگی توزیع کرنش معادل در سطوح قطعات نهایی، مشاهده می‌شود که در سطوح بالا و پایین قطعه نهایی، به سمت لبه‌های خارجی، میزان کرنش بیشتر است.



شکل (۵): توزیع کرنش معادل در سطوح مقاطع تغییر شکل یافته (مقدار فشردگی ۴۵٪) (a): بدون روانکار، (b): روانکار گریس، (c): روانکار اکسید آنتیموان.



شکل (۶): توزیع کرنش معادل در سطوح مقاطع تغییر شکل یافته (مقدار فشردگی ۶۰٪) (a): بدون روانکار، (b): روانکار گریس، (c): روانکار اکسید آنتیموان.



شکل (۷): نمودار نیرو-جابجایی برای روانکارهای مختلف (مقدار فشردگی ۶۰٪).

۴- نتیجه گیری

- ۱- وجود روانکار اکسید آنتیمون در کاهش ضریب اصطکاک فرآیند آهنگری سرد تأثیر بسزایی دارد.
- ۲- شبیه سازی شرایط آهنگری سرد مجموعه ای از منحنی های کالیبراسیون آهنگری فراهم می آورد.
- ۳- در شرایط اصطکاک چسبنده سطح قطعه اولیه که در تماس با قالب است، لغزش بسیار کمی از خود نشان می دهد.
- ۴- میزان کرنش معادل در سطوح بالا و پایین قطعه نهایی به سمت لبه خارجی قطعه بیش تر از دیگر نقاط است. از طرف دیگر آن قسمت از سطح نهایی قطعه که از ابتدا در تماس با قالب بوده، کمترین تغییر شکل را داشته است.
- ۵- در مقدار درصد فشردگی یکسان، با افزایش ضریب اصطکاک نیروی لازم برای تست حلقه افزایش می یابد به طوری که برای اصطکاک چسبنده حداکثر نیرو لازم است.

۵- مراجع

- [۳] م. دهقان و ج. دعایی، "بررسی اثر اصطکاک در آهنگری گرم"، کارشناسی، دانشگاه سمنان، ص. ۵۷ و ۱۲۱، ۱۳۸۷.
- [۴] جفری رو، "اصول فرآیندهای فلز کاری صنعتی"، ترجمه فریدون نیکبخت، مرکز نشر دانشگاهی، ص. ۳۹۶، ۱۳۷۳.
- [۵] ج. ای. دیتز، "متالورژی مکانیکی"، ترجمه شهره شهیدی، مرکز نشر دانشگاهی، ص. ۶۵۹-۶۰، ۱۳۸۲.
- [۶] ج. بدوز، "اصول و فرآیندهای تولید محصولات فلزی"، ترجمه محمد بخشی جویباری و محمد حسن حجتی، انتشارات دانشگاه مازندران، ص. ۴۰۴، ۱۳۸۰.
- [۷] دل. ک. آلن، "تئوری و عملی متالورژی"، ترجمه علی اکبر قاری نیت، نشر آزمون، ص. ۷۸، ۱۳۸۳.
- [8] Metals Handbook, first ed., Vol. 18, ASM, Metals Park, pp. 1268 and 1509, 1992.
- [۹] ح. عالی، "آشنایی با فرآیندهای ساخت و تولید"، انتشارات دانشگاه امام حسین (ع)، ص. ۳۵۸، ۱۳۸۲.
- [۱۰] آلتان، نگایل وشن، "مبانی و کاربرد آهنگری سرد و گرم"، ترجمه محمد حسن حجتی، محمد بخشی و سید جمال حسینی پور، انتشارات دانشگاه مازندران ۱۳۸۵.

- [۱] م. گردویی، "طراحی قالب های پیش فرم آهنگری به روش تغییر شکل معکوس"، کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، ۱۳۸۲.

- [2] E. M. Mielnik, "Metal Working Science and Engineering", McGraw-Hill, USA, pp. 487-527, 1991.

- [17] M. Noorani-Azad, M. Bakhshi-Jooybari, S. J. Hosseinipour and A. Gorji, "Experimental and Numerical Study of Optimal Die Profile in Cold Forward Rod Extrusion of Aluminum", J. of Materials Processing Technology, Vol. 164-165, pp. 1572-1577, 2005.
- [18] ABAQUS (V6.9), Help, ABAQUS Analysis User Manual.
- [11] M. Kunogi, "On Plastic Deformation of Hollow Cylinders Under Axial Compressive Loading", Journal of Scientific Research Institute, Vol. 2, pp. 174-181, 1954.
- [12] A. T. Male and V. Depierre, "The Validity of Mathematical Solutions for Determination Friction From the Ring Compression Test", Journal of Lubrication Technology, Vol. 8, pp. 389-397, 1970.
- [13] K. P. Rao and K. Sivaram, "A Review of Ring Compression Testing and Applicability of the Calibration Curve", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 37, pp. 295-318, 1993.
- [14] J. P. Wang, "A New Evaluation to Friction Analysis for the Ring Test", Int. Journal of Materials Tools & Manufacture, Vol. 41, pp. 311-324, 2001.
- [15] Metals Handbook, 9th ed., Vol. 18, ASM, Metals Park pp. 379, 1989.

۶- پی نوشت

- 1- Kunogi
- 2- Male
- 3- Depierre
- 4- Rao
- 5- Wang
- 6- Explicit
- 7- Implicit

- [۱۶] ر. درویش، ر. میرزایی فر و ف. ر. بیگلری، "آنالیز مسائل پیشرفته المان محدود با نرم افزار ABAQUS"، انتشارات یا مهدی (عج)، ص. ۵، ۱۳۸۵.