

شبیه‌سازی المان محدود و بررسی عملی کاهش ضریب اصطکاک با استفاده از روغن‌های پایه گیاهی

وحید معرفت خلیل آباد^۱، سعید شیدایی گورچین قلعه^۲، پیمان مشهدی کشتیان^۳ و*

^۱مربی، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

^۲کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه

^۳استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه

*مسئول مکاتبات: pmkmech@gmail.com

چکیده

واژگان کلیدی

شکل دهی فلزات
روغنهای گیاهی
اصطکاک
آلیاژ آلومینیوم
آزمون فشار حلقه

اصطکاک یک عامل اساسی در هدر روی انرژی و همچنین مستهلک شدن فلزات در فرایندهای مختلف مکانیکی می‌باشد. در صنعت شکل دهی فلزات به منظور غلبه بر اصطکاک و اثرات آن معمولاً از روانکاری استفاده می‌شود. مشکلات زیست محیطی در کاربرد روانکارهای معدنی، صنایع مختلف را به استفاده از روغن‌های زیست سازگار سوق داده است. از جمله این روغن‌ها، روغن‌های پایه گیاهی هستند. هدف از این مطالعه، مقایسه عملکرد روانکارهای پایه گیاهی نسبت به روانکارهای پایه معدنی در صنعت شکل دهی سرد آلیاژ آلومینیوم به ویژه در صنعت فورجینگ می‌باشد. در این مقاله فرایند فورج مورد نظر آزمون فشار حلقه بوده و جهت ارزیابی اثر هر یک از روانکارها پارامتر اصطکاک مورد بررسی قرار گرفته است و برای استخراج ضریب اصطکاک از منحنی‌های کالیبراسیون استفاده شده است. نتایج حاصل از انجام آزمایشات تجربی نشان داد که اکثر روانکارهای پایه گیاهی به طور چشم‌گیری ضریب اصطکاک را نسبت به روانکار پایه معدنی کاهش می‌دهند. در نتیجه به دلیل قابلیت و راندمان بالای آنها در روانکاری و کاهش ضریب اصطکاک برشی، روانکارهای پایه گیاهی می‌توانند جایگزین بسیار مناسبی برای روانکارهای پایه معدنی باشد.

تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۱/۱۹
تاریخ پذیرش ۱۳۹۷/۰۵/۰۱

۱ مقدمه

در اصطکاک و سایش (خواص تریبولوژیکی روانکارها)، دو عامل اساسی در هدر روی انرژی و مستهلک شدن فلزات در فرایندهای مختلف شکل دهی هستند [۱]. بنابراین نیروهای اصطکاک به وجود آمده در ناحیه تماس باید کنترل شوند. بدین منظور از روانکارها و روش‌های مختلف روانکاری برای کنترل و کاهش اصطکاک در فصل مشترک تماس استفاده می‌شود [۲].

منابع نفتی محدود و تجدید ناپذیر هستند و استفاده مستمر از آنها سبب کاهش این منابع شده است. علاوه بر این، مسئله مهمتر آلودگی‌های زیست محیطی و مشکلات منتج از آن است. با توجه به این دو موضوع جایگزین کردن موادی با پایه غیر نفتی به جای محصولات تولید شده از نفت خام بسیار حائز اهمیت است. یکی از این مواد روغن‌های گیاهی هستند. این روغن‌ها در بسیاری از جهات دارای خواص روانکاری مشابه و حتی بهتر از روانکارهای پایه معدنی و سنتزی هستند [۳]. روانکارهای با روغن‌های پایه گیاهی که در اصطلاح به آن‌ها بیوروانکار گفته می‌شود، علاوه بر اینکه به علت وابستگی به منابع گیاهی تجدیدپذیر می‌باشند، به علت خاصیت زیست تخریب‌پذیری بالا و همچنین سمی نبودن، محیط زیست را آلوده نمی‌کنند [۴] بنابراین پتانسیل خوبی جهت جایگزینی با روانکارهای پایه نفتی موجود را دارند.

روانکارها با ایجاد یک فیلم از روغن بین سطوح اصطکاک، آنها را از یکدیگر جدا می‌کنند و بدین طریق موجب پایین آمدن اصطکاک و سایش بین

سطوح می‌شوند.

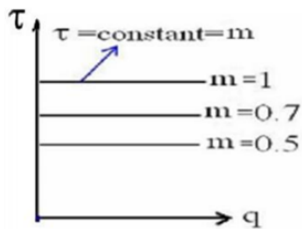
تا به حال تحقیقات متعددی در ارتباط با سنجش ضریب اصطکاک توسط آزمون فشار حلقه و همچنین کاربرد روانکارهای پایه گیاهی در روانکاری و کاهش اصطکاک در صنایع مختلف شکل دهی به عمل آمده است. شهریار و همکاران [۵] در تحقیقی به سنجش ضریب اصطکاک در شکل دهی داغ سوپر آلیاژ نامونیک ۱۱۵ تحت شرایط مختلف روانکاری (ورقه‌های میکا، پودر شیشه، پودر گرافیت و حالت خشک) توسط مشاهدات فیزیکی و شبیه‌سازی المان محدود پرداختند. آنان میکا را به عنوان بهترین روانکار با ضریب اصطکاک برشی ۰/۳ در درجه حرارت‌های بالا معرفی کردند. در ادامه یانچون ژو و همکاران [۶] توسط آزمون فشار حلقه به تعیین ضریب اصطکاک برشی برای آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V در فرایند شکل دهی داغ به صورت آزمایشات تجربی و شبیه سازی المان محدود پرداختند. باروقی و همکاران [۷] تاثیر روانکاری گرافیت، تفلون و ورقه‌های میکا را جهت سنجش اصطکاک در فرایند شکل دهی گرم آلیاژ آلومینیوم ۶۰۸۲ توسط آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی المان محدود مورد بررسی قرار دادند، آنان دریافتند که تفلون به عنوان بهترین روانکار با ضریب اصطکاک برشی ۰/۳۲ می‌باشد. همچنین راجیش و همکاران [۸] نیز توسط آزمون فشار حلقه تاثیر روانکاری استئارات روی، MoS_2 ، پودر گرافیت و حالت خشک را بر روی نمونه‌های آلومینیومی جهت سنجش اصطکاک مورد مطالعه قرار دادند، آنان پایین‌ترین

ب) مدل اصطکاک برشی^۲

این مدل برای حالتی که فشار زیاد است استفاده می‌شود و به صورت رابطه (۲) بیان می‌شود. نمودار آن در شکل ۲ نشان داده شده است [۱۲].

$$\tau = mk, \quad 0 \leq m \leq 1 \quad (2)$$

که m فاکتور اصطکاک برشی است که مقادیر $m = 0$ برای سطح بدون اصطکاک تا $m = 1$ برای اصطکاک چسبنده را شامل می‌شود و k حد تسلیم برشی است.

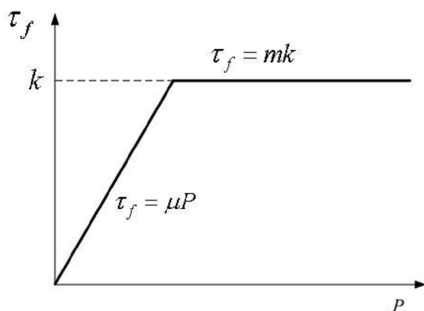


شکل ۲: نمودار مدل اصطکاک برشی [۱۲]

ج) مدل اصطکاک عمومی

این مدل ترکیبی از دو مدل ذکر شده در بالاست که با معادله (۳) بیان می‌شود. که نمودار آن در شکل ۳ نشان داده شده است [۱۲].

$$\tau_f = F\alpha k = mk \quad (3)$$



شکل ۳: نمودار مدل اصطکاک عمومی [۱۲]

۲.۲ آزمون فشار حلقه

تعیین کمی شرایط اصطکاک طی عملیات شکل دهی منجر به انجام آزمایشات ارزیابی مختلف می‌شود [۱۳]. آزمایشات شبیه‌سازی نیمه صنعتی زیادی مانند آزمون فشار حلقه، آزمون اکستروژن پسر دو فنجان و قالب بار، آزمون فشار-پیچشی طراحی شده‌اند تا اصطکاک و روانکاری را ارزیابی کنند [۱۳]. در میان همه روش‌های مشترک برای اندازه‌گیری ضریب اصطکاک، آزمون فشار حلقه بدلیل سادگی و ارزانی بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶]. این روش ابتدا توسط کونگوی به کار گرفته شد [۱۴]. و بعدها به عنوان روش قابل استفاده به وسیله میل و کوکوکرافت توسعه و ارائه گردید [۱۵]. آزمون فشار حلقه به طور گسترده برای مطالعه تحلیلی، تجربی و عددی اصطکاک در فرایندهای شکل دهی حجمی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۶]. در این روش یک نمونه‌ی حلقه‌ای شکل تخت تا مقدار مشخصی از کاهش ارتفاع فشرده

ضریب اصطکاک را، روانکار MoS₂ و استئارات روی با ۱۴/۰ گزارش کردند. عبدالغدير و همکاران [۹] با استفاده از آزمون فشار حلقه و آزمون اغتشاشی دو دیسک تاثیر استفاده از روغن‌های گیاهی را روی آلیاژ آلومینیوم، مورد ارزیابی قرار دادند و به بررسی پارامتر ضریب اصطکاک برشی پرداختند. آنان روغن خرما را به عنوان بهترین روانکار در دمای اتاق، و روغن کره درخت قلم را به عنوان بهترین روانکار در دمای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد گزارش کردند. همچنین سیاه‌رویل و همکاران [۱۰] در تحقیقی عملکرد روانکاری روغن خرما و روغن پارافین (VG 460, VG 95) را توسط آزمون اکستروژن سرد به جلو رونده مورد ارزیابی قرار دادند و به بررسی پارامترهای نیروی اکستروژن و زبری سطح پرداختند. نتایج نشان داد که روغن خرما نسبت به روغن پارافین از عملکرد بهتری برخوردار بوده و زبری سطح و نیروی اکستروژن را بطور چشم‌گیری کاهش داده است.

براساس تحقیقات و مطالعات انجام شده، تحقیقی که به بررسی پارامتر اصطکاک توسط آزمون فشار حلقه با بهره‌گیری از روانکارهای پایه گیاهی انجام شده باشد، بسیار محدود است. بنابراین هدف تحقیق حاضر، ارزیابی عملکرد روانکاری، روانکارهای پایه گیاهی نسبت به روانکار پایه معدنی در فرایند شکل دهی سرد آلیاژ آلومینیوم می‌باشد که با استفاده از آزمون فشار حلقه به بررسی ضریب اصطکاک پرداخته شده است.

۲ اصطکاک و آزمون فشار حلقه

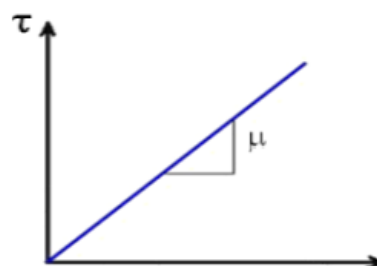
۱.۲ اصطکاک

اصطکاک نقش مهمی را در کل فرایند شکل دهی ایفا می‌کند و باید در حین طراحی فرایند نقش آن در نظر گرفته شود. کیفیت و سلامت سطوح، نحوه سیلان ماده و عیوب ایجاد شده در قطعات تولیدی، شدیداً تحت اثر شرایط اصطکاک کنترل می‌شود. مدل‌های تئوری مختلفی برای بررسی اصطکاک وجود دارد که در ادامه سه مدل به صورت مختصر بیان می‌شود.

الف) مدل اصطکاک کلمبی^۱

این مدل بر پایه قانون آمونتون می‌باشد که معمولاً در برنامه‌های کامپیوتری المان محدود استفاده می‌شود. و مطابق رابطه (۱) بیان می‌شود. و نمودار آن در شکل ۱ نشان داده شده است. که τ تنش برشی اصطکاک، μ ضریب اصطکاک در سطح مشترک قطعه و قالب و P نیروی عمودی وارده می‌باشد [۱۱].

$$\tau = \mu P \quad (1)$$



شکل ۱: نمودار مدل اصطکاک کلمبی [۱۱]

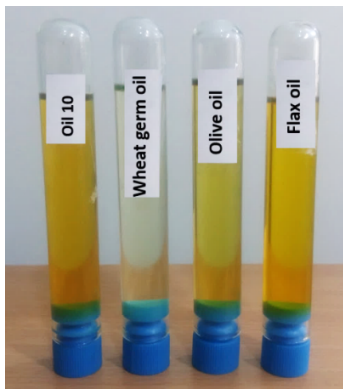
¹μ-Model ²m-Model

بوده و از المان نوع چهار نقطه ای (CAX4R) استفاده شد. جهت بررسی اصطکاک از روش پنالتی و شرایط اصطکاک کولمب برای سطوح تماسی استفاده شد. برای بدست آوردن منحنی های کالیبراسیون ضرایب اصطکاک ۰/۰۲، ۰/۰۳، ۰/۰۴، ۰/۰۵، ۰/۰۶، ۰/۰۷، ۰/۰۸، ۰/۰۹، ۰/۱، ۰/۱۲، ۰/۱۵، ۰/۲ و ۰/۳ بین سطوح تماسی در نظر گرفته شدند. در تمام شبیه سازیها قالب و سنبه صلب در نظر گرفته شدند.

۳ مواد، تجهیزات و روش آزمایش

۱.۳ مواد و تجهیزات

در این پژوهش از روغن کتان، روغن جوانه گندم و روغن زیتون به عنوان روانکارهای پایه گیاهی و از روغن ۱۰ به عنوان روانکار پایه معدنی استفاده شده است. شکل ۵ تصویر روانکارهای مورد استفاده در این پژوهش را نشان داده است. جنس قالبها از فولاد VCN 150 بوده که به علت سختی و استحکام بالا، کاربردهای بسیاری در صنعت قالب سازی دارد. نمونه های حلقه ای شکل از آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ با نسبت اندازه ۲ : ۳ : ۶ «ضخامت ۱۰ mm، قطر داخلی ۱۵ mm و قطر خارجی ۳۰ mm» توسط دستگاه تراش TM50 ماشین سازی تبریز تهیه شد. شکل ۶ تصویر نمونه های آزمون فشار حلقه را در حال آماده سازی با دستگاه تراش را نشان داده است. جدول ۱ درصد ترکیبات شیمیایی آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ را نشان می دهد [۱۸]. جهت یکسان نمودن کیفیت سطح تمام نمونه ها از دستگاه سنگ TOS HOSTIVAR ساخت Czechoslovakia استفاده شد. جهت انجام آزمون فشار حلقه از یک دستگاه پرس هیدرولیکی ۶۰ تن استفاده شده است.

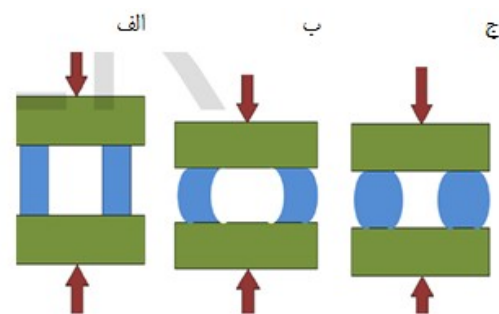


شکل ۵: روانکارهای مورد استفاده در این تحقیق

۲.۳ روش آزمایش

هدف از انجام این پژوهش بدست آوردن ضریب اصطکاک و ارزیابی عملکرد روانکارهای پایه گیاهی نسبت به روانکار پایه معدنی در فرایند شکل دهی آلیاژ آلومینیوم می باشد. که با استفاده از آزمون فشار حلقه و بکارگیری منحنی های کالیبراسیون، ضریب اصطکاک استخراج و ارزیابی روانکارها انجام می گیرد. بدین منظور ابتدا نمونه های حلقه ای شکل تهیه شده درون قالب قرار گرفت و سطوح اصطکاکی بین نمونه و قالب با روانکارهای ذکر شده روانکاری شد.

می شود. تغییر در قطرهای داخلی و خارجی حلقه تغییر شکل یافته به میزان بسیار زیادی به اصطکاک در سطح تماس قالب- حلقه بستگی دارد. اگر اصطکاک برابر صفر باشد، حلقه مانند یک دیسک تو پر تغییر شکل می یابد، که در آن هر جزء با نرخ متناسب با فاصله اش از مرکز به طور شعاعی سیلان پیدا می کند. اصطکاک این سیلان شعاعی را محدود می کند. اگر اصطکاک از یک مقدار بحرانی تجاوز کند، مقاومت اصطکاکی در جهت بیرونی از مقاومت اصطکاکی در جهت سیلان های درونی مواد حلقه به سمت مرکز بزرگتر می شود. با افزایش تغییر شکل، اگر اصطکاک زیاد باشد، مطابق شکل ۴ حالت (ج) قطر داخلی کاهش یافته و اگر کم باشد، مطابق شکل ۴ حالت (ب) قطر داخلی افزایش می یابد. بنابراین، تغییر در قطر داخلی، یک روش ارزیابی اصطکاک سطح تماس را ارائه می کند [۱۴]. این مطلب به صورت شماتیک در شکل ۴ نشان داده شده است [۸].



شکل ۴: شرایط اصطکاکی مختلف [۸] (الف) حالت اولیه، (ب) اصطکاک کم، (ج) اصطکاک زیاد

ذکر این نکته لازم است که در آزمون فشار حلقه، مقدار متوسطی از اصطکاک سطحی اندازه گرفته می شود، بنابراین این آزمون برای بررسی جزئیات اصطکاک یک فرایند ناکافی است. ولی برای پیش بینی رفتار قطعه بر اثر اصطکاک و مقایسه روانکارهای مختلف مناسب می باشد.

برای استخراج ضریب اصطکاک، ابتدا بایستی دو پارامتر درصد کاهش قطر داخلی حلقه $(\% \Delta D)$ و درصد کاهش ارتفاع حلقه $(\% \Delta H)$ با استفاده از روابط (۴) محاسبه شوند. و سپس با وارد کردن مقادیر عددی آنها در منحنی های کالیبراسیون، مقدار ضریب اصطکاک از طریق همین منحنی ها بدست خواهد آمد. این منحنی ها خود نیز با استفاده از شبیه سازی المان محدود بدست می آیند. منحنی های کالیبراسیون اصطکاکی باید برای هر جنس خاص تحت دما و سرعت کوبه مختلف به صورت جداگانه تولید شوند. ولی تحقیقات نشان داده که تحت شرایط فورج سرد، این منحنی ها را می توان به صورت همگانی در نظر گرفت، زیرا خواص ماده (یعنی کرنش سختی) تاثیر کمی بر منحنی دارد [۱۷].

$$\% \Delta D = \frac{D_0 - D}{D_0} \times 100 \quad (4)$$

$$\% \Delta H = \frac{H_0 - H}{H_0} \times 100$$

در کار حاضر نیز برای بدست آوردن منحنی های کالیبراسیون از شبیه سازی المان محدود استفاده شد. شبیه سازی المان محدود روی حلقه های با نسبت ۶ : ۳ : ۲ توسط نرم افزار آباکوس انجام شد. نوع شبیه سازی مقارن محوری

جدول ۱: درصد ترکیبات شیمیایی نمونه‌های آلیاژ آلومینیوم ۲۰۲۴ [۱۸]

Cu	Mg	Mn	Zn	Fe	Si	Ti	Cr	Al
۴/۵۰	۱/۵۰	۰/۵۰	۰/۲۰	۰/۴۰	۰/۴۱	۰/۱۲	۰/۰۷	Balance

افزایش ضریب اصطکاک کرنش پلاستیک معادل نیز افزایش می‌یابد. با انجام این شبیه‌سازیها منحنی‌های کالیبراسیون برای آلومینیوم مورد نظر استخراج شدند (شکل ۱۰) و برای بدست آوردن مقدار دقیق اصطکاک مورد استفاده قرار گرفتند.

با اندازه‌گیری درصد کاهش ارتفاع و درصد کاهش قطر داخلی و سپس با وارد کردن آن‌ها به منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی بدست آمده، مطابق شکل ۱۰ ضرایب اصطکاک استخراج شدند. جدول ۱ نتایج ضرایب اصطکاک حاصله از منحنی‌های کالیبراسیون و شکل ۱۱ تغییرات این ضرایب اصطکاک را در حالت‌های مختلف روانکاری نشان داده است.

مطابق شکل ۱۱ و اطلاعات جدول ۱ مشخص است که در حالت خشک (بدون روانکاری) بیشترین ضریب اصطکاک با مقدار $\mu = ۰/۱۴۴$ حاصل گردیده است، که در این حالت بدلیل نبود روانکار بین سطوح اصطکاکی، سطوح تماسی در اثر فشار به یکدیگر چسبیده و مانع از سیلان ماده می‌شود که در نتیجه باعث افزایش اصطکاک شده است. اما در صورت استفاده از روانکار، ماده روانکار بین سطوح اصطکاکی نفوذ کرده و مانع از برخورد مستقیم دو سطح روی یکدیگر شده که در نتیجه باعث کاهش اصطکاک می‌گردد. با توجه به شکل ۱۱ و اطلاعات جدول ۱ در صورت استفاده از روانکار پایه معدنی (روغن ۱۰) این ضریب اصطکاک تا $\mu = ۰/۱۳۱$ پایین آمده است. در صورت استفاده از روانکار پایه گیاهی روغن جوانه گندم، ضریب اصطکاک با مقدار $\mu = ۰/۱۳۲$ تقریباً عملکرد مشابهی با روغن ۱۰ را داشته است. در صورت استفاده از سایر روانکارهای پایه گیاهی از جمله روغن زیتون و روغن کتان مقدار ضریب اصطکاک برای هر دو آن‌ها یکسان و برابر $\mu = ۰/۱۲۵$ بدست آمد که نشان می‌دهد این دو روانکار از قابلیت روانکاری بالاتری نسبت به روانکار پایه معدنی برخوردار هستند. به طور کلی در صورت استفاده از روانکارهای پایه گیاهی روغن زیتون و روغن کتان ضریب اصطکاک حدود ۵٪ نسبت به روانکار پایه معدنی و حدود ۱۴٪ نسبت به حالت خشک (فاقد روانکاری) کاهش می‌یابد.

آزمایشات فشار حلقه با ۵ آزمایش، که شامل ۳ آزمایش با روانکارهای پایه گیاهی، یک آزمایش با روانکار پایه معدنی (روغن ۱۰) و یک آزمایش برای حالت خشک (فاقد روانکاری) انجام گرفت. این آزمایشات توسط دستگاه پرس هیدرولیکی ۶۰ تن مطابق شکل ۷ انجام شد. بعد از هر آزمایش سطوح آغشته به روانکار توسط بنزین به طور کامل تمیز شده و جهت آزمایش بعدی آماده می‌شد، تا اثر روانکار قبلی بر روی سایر روانکارها تاثیر نداشته باشد.



شکل ۶: تولید نمونه‌های حلقه با دستگاه تراش



شکل ۷: تصویر نمونه‌ها حین آزمون فشار حلقه

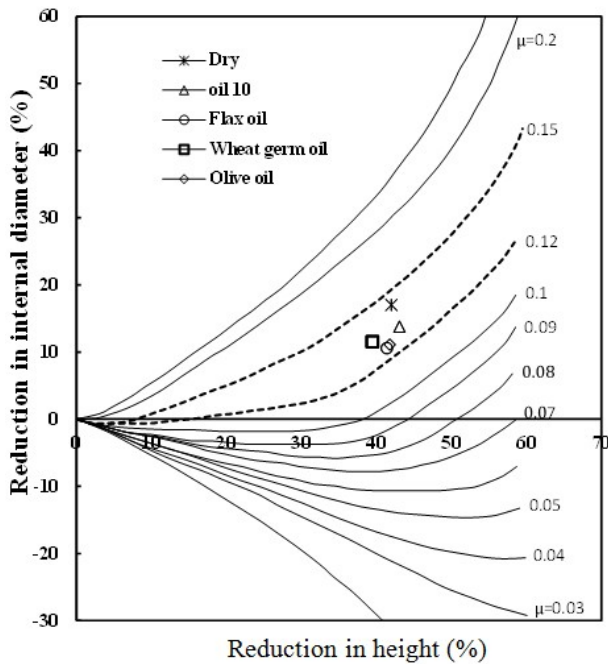
۴ نتایج و بحث

تصویر نمونه‌های قبل و بعد از آزمون فشار حلقه در شکل ۸ نشان داده است. همچنین نتایج شبیه‌سازی المان محدود کرنش پلاستیک معادل برای سه ضریب اصطکاک مختلف ۰/۳، ۰/۱ و ۰/۰۳ در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که با فلشها نیز در تصویر نشان داده شده است، با افزایش ضریب اصطکاک مواد به سختی اجازه حرکت روی یکدیگر خواهند داشت و به همین دلیل می‌توان مشاهده کرد که هر چه ضریب اصطکاک بیشتر می‌شود، جریان مواد بیشتر در داخل ماده اتفاق می‌افتد و انحنای بیشتری در قسمت استوانه‌ای داخلی مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با

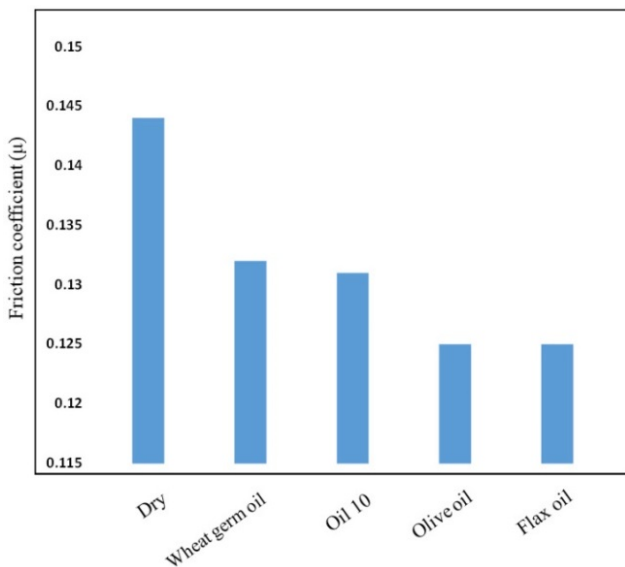


شکل ۸: نمونه‌های تغییر شکل یافته تحت حالت‌های مختلف روانکاری (۱) حالت اولیه نمونه، (۲) حالت خشک، (۳) روغن ۱۰، (۴) روغن جوانه گندم، (۵) روغن زیتون و (۶) روغن کتان

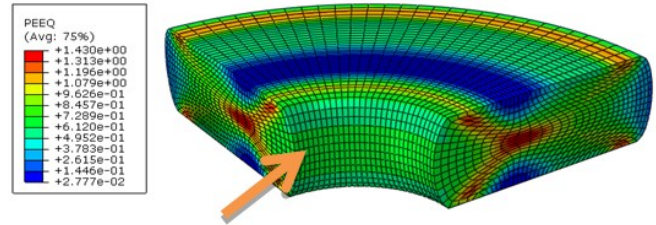
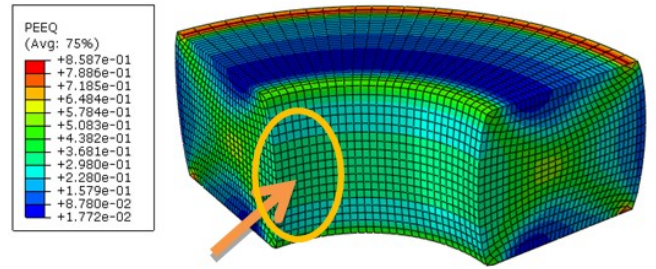
در این تحقیق، توسط آزمون فشار حلقه و منحنی‌های کالیبراسیون، رفتار اصطکاکی روانکارهای پایه گیاهی نسبت به روانکار پایه معدنی در فرایند شکل دهی سرد آلیاژ آلومینیوم مورد ارزیابی قرار گرفت. روغن جوانه گندم، روغن زیتون و روغن کتان به عنوان روانکارهای پایه گیاهی و روغن ۱۰ به عنوان روانکار پایه معدنی مورد آزمایش و ارزیابی قرار گرفتند و یک آزمایش هم برای حالت خشک (فاقد روانکاری) انجام شد. با جایگذاری نتایج تجربی حاصل از آزمون فشار حلقه در منحنی‌های کالیبراسیون، میزان ضریب اصطکاک برای هر حالت روانکاری بدست آمد. نتایج نشان داد که روانکارهای پایه گیاهی به دلیل قابلیت و عملکرد خوب آن‌ها در روانکاری، کاهش اصطکاک بیشتری را نسبت به روانکار پایه معدنی (روغن ۱۰) در فرایند شکل دهی سرد آلیاژ آلومینیوم ایجاد می‌کنند.



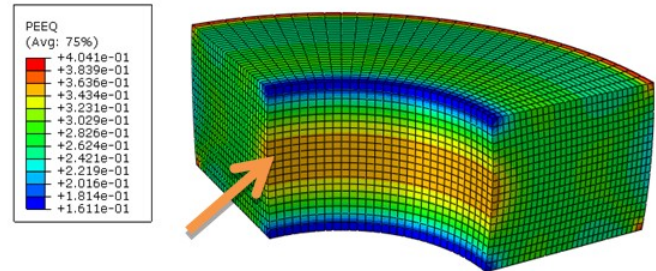
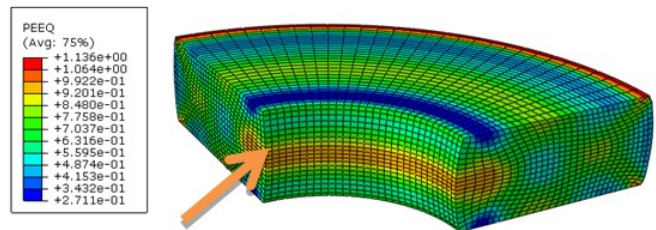
شکل ۱۰: منحنی کالیبراسیون اصطکاکی و نتایج تجربی جایگذاری شده در داخل منحنی



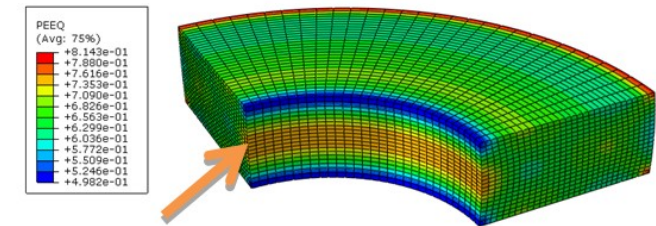
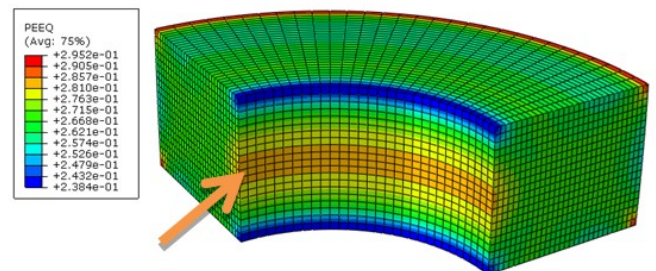
شکل ۱۱: تغییرات ضریب اصطکاک تحت حالت‌های مختلف روانکاری



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۹: کانتور کرنش پلاستیک معادل بعد از (۵/۴ میلیمتر) ۲۵٪ و (۲/۸ میلیمتر) ۴۵٪ کاهش ارتفاع، ضرایب اصطکاک (الف) ۰/۳، (ب) ۰/۱ و (ج) ۰/۳

- [16] K. Manisekar, R. Narayanasamy, Effect of friction on barrelling in square and rectangular billets of aluminium during cold upset forging, *Materials & design*, Vol. 28, No. 2, pp. 592-598, 2007.
- [17] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, *Cold and hot forging: fundamentals and applications*: ASM international, 2005.
- [18] H. Aydın, A. Bayram, I. Durgun, The effect of post-weld heat treatment on the mechanical properties of 2024-T4 friction stir-welded joints, *Materials & Design (1980-2015)*, Vol. 31, No. 5, pp. 2568-2577, 2010.
- [1] A. Jackson, M. Webster, The role of tribology research in the development of advanced lubricants, *Tribology Series*, Vol. 41, pp. 439-448, 2003.
- [2] D.-X. Peng, C.-H. Chen, Y. Kang, Y.-P. Chang, S.-Y. Chang, Size effects of SiO₂ nanoparticles as oil additives on tribology of lubricant, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 62, No. 2, pp. 111-120, 2010.
- [3] S. M. Alves, J. F. G. de Oliveira, Vegetable based cutting fluid: an environmental alternative to grinding process, in *Proceeding of, CIRP*, pp. 664.
- [4] M. Emami, M. H. Sadeghi, A. A. D. Sarhan, F. Hasani, Investigating the minimum quantity lubrication in grinding of Al₂O₃ engineering ceramic, *Journal of cleaner production*, Vol. 66, pp. 632-643, 2014.
- [5] D. Shahriari, A. Amiri, M. Sadeghi, Study on hot ring compression test of Nimonic 115 superalloy using experimental observations and 3D FEM simulation, *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 19, No. 5, pp. 633-642, 2010.
- [6] Y. Zhu, W. Zeng, X. Ma, Q. Tai, Z. Li, X. Li, 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, No. 12, pp. 2074-2080, 2011.
- [7] B. Barooghi, A. Amiri, M. SADEGHI, Study on hot ring compression test of Al 6082 alloy using experimental observations and fem simulation, 2013.
- [8] E. Rajesh, M. SivaPrakash, Analysis of friction factor by employing the ring compression test under different lubricants, *International Journal of Scientific and Engineering Research*, Vol. 4, No. 5, pp. 1163-1171, 2013.
- [9] B. Lawal Abdulquadir, M. Bolaji Adeyemi, Evaluations of vegetable oil-based as lubricants for metal-forming processes, *Industrial Lubrication and Tribology*, Vol. 60, No. 5, pp. 242-248, 2008.
- [10] S. Syahrullail, B. Zubil, C. Azwadi, M. Ridzuan, Experimental evaluation of palm oil as lubricant in cold forward extrusion process, *International journal of mechanical sciences*, Vol. 53, No. 7, pp. 549-555, 2011.
- [11] S. Kobayashi, S.-i. Oh, T. Altan, A. Chaudhary, Metal forming and the finite-element method, *Journal of Materials Shaping Technology*, Vol. 8, No. 1, pp. 65-65, 1990.
- [12] J. Schey, *Tribology in metalworking: friction, wear and lubrication*, American Society for Metals, 1983.
- [13] K. Jung, H. Lee, D. Kim, S. Kang, Y. Im, Friction measurement by the tip test for cold forging, *Wear*, Vol. 286, pp. 19-26, 2012.
- [14] M. Kunogi, A new method of cold extrusion, *Journal of the Scientific Research Institute*, Vol. 50, No. 1, pp. 215-246, 1956.
- [15] A. T. Male, A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation, *J. Inst. Metal.*, Vol. 93, pp. 38-46, 1964.