



تحلیل عددی و تجربی اثر روانکار در فرآیند آهنگری دقیق همدمای پره تیتانیومی با استفاده از آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای

حمید عربی^۱، مهرداد خاندائی^{۱*}، محمد بیگ محمدی^۱

^۱ مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۶/۰۸/۱۵
پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸

کلمات کلیدی:

آهنگری هم‌دما
اصطکاک
آزمون فشار حلقه
آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای
پره کمپرسور

خلاصه: اصطکاک نقش مهمی در چگونگی جریان پلاستیک مواد در حین فرآیند آهنگری و همچنین تعیین میزان نیروی مورد نیاز فرآیند دارد. به همین دلیل، به منظور بالا بردن دقت نتایج شبیه‌سازی‌های عددی در مرحله طراحی قالب آهنگری و پیش‌بینی نیروی مورد نیاز فرآیند، ضرورت دارد تا آزمون‌های اصطکاکی مناسبی جهت برآورد ضریب اصطکاک فرآیند انجام شوند. در این تحقیق، یک آزمون جدید به نام آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای برای ارزیابی اصطکاک معرفی شده و منحنی‌های کالیبراسیون آن به دست آمده‌اند. این آزمون به همراه آزمون فشار حلقه برای پیش‌بینی ضریب اصطکاک در فرآیند آهنگری هم‌دمای یک نمونه پره کمپرسور توربین گاز از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V به کار می‌رود. ضریب اصطکاک حاصل از آزمون فشار حلقه برای ناحیه ریشه پره و ضریب اصطکاک حاصل از آزمون فشار میله برای ناحیه ایرفویل پره مورد استفاده قرار می‌گیرند. سپس فرآیند آهنگری پره مذکور با روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است و مقایسه مقادیر به دست آمده برای حداکثر نیروی مورد نیاز فرآیند، انطباق قابل قبولی را نشان می‌دهد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای روش قابل قبولی برای ارزیابی اصطکاک است. اختلاف بین مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده از دو روش مذکور، وابستگی ضریب اصطکاک به حالت تغییر فرم قطعه کار را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه

یک مدل اصطکاک متغیر وابسته به فشار منجر شده است. این مدل ضریب اصطکاک را همزمان در حین کورس پیشروی پرس و در سطوح تماسی مختلف تغییر می‌دهد. ژانگ^۲ و همکاران [۵] در تحقیق خود عوامل مؤثر در کاهش نیروی فرآیند آهنگری سرد نوسانی^۳ نسبت به فرآیند آهنگری سرد متداول را مورد بررسی قرار داده‌اند. یکی از عوامل اصلی مؤثر در این کاهش نیرو، اصطکاک فرآیند می‌باشد. برای در نظر گرفتن شرایط مختلف اصطکاکی و سرعت متغیر، یک مدل اصطکاک که لغزش و سرعت را در بر می‌گیرد ارائه شده و در شبیه‌سازی اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفته است. هو^۴ و همکاران [۶] نیز در کار تحقیقاتی خود، با توجه به شباهت جریان پلاستیک در نواحی مختلف برآمدگی و فرورفتگی قالب آهنگری قطعات پیچیده به فرآیندهای اکستروژن مستقیم و معکوس، یک روش آزمون اصطکاکی جدید، که ترکیبی از دو فرآیند اکستروژن مستقیم و معکوس می‌باشد، برای تعیین ضریب اصطکاک در فرآیند آهنگری پیشنهاد و ارائه کرده‌اند. در این روش، یک قطعه خام استوانه‌ای همزمان از یک طرف در معرض

با توجه به اینکه در فرآیندهای آهنگری، جریان پلاستیک فلز از فشار انتقال یافته از قالب‌ها به قطعه کار ناشی می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که شرایط اصطکاکی در سطح تماس قالب/قطعه کار به میزان قابل توجهی بر کیفیت جریان فلز، تشکیل عیوب سطحی و داخلی، تنش‌های اعمالی بر قالب‌ها و نیرو و انرژی مورد نیاز فرآیند تأثیر می‌گذارد [۱]. به همین دلیل، تا به حال آزمون‌های مختلفی برای ارزیابی کمی اصطکاک در فصل مشترک قالب و قطعه کار در فرآیند آهنگری طراحی و پیشنهاد شده‌اند [۲]. از جمله این روش‌ها می‌توان به آزمون فشار حلقه، آزمون اکستروژن دو فنجانی، آزمون فشار تی شکل، آزمون اکستروژن معکوس، آزمون فشار-سایش اشاره کرد [۳]. در کار تحقیقاتی آلتان^۱ و همکاران [۴] آزمون فشار حلقه برای بررسی آثار توپولوژی سطح بر اصطکاک و روانکاری در دمای اتاق در دو شرایط خشک و روانکاری شده و همچنین بررسی اثر دمای قالب بر اصطکاک و روانکاری، با تغییر دادن دماهای قالب و حلقه‌ها، به کار رفته است. نتایج حاصل از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود به توسعه

2 Zhang
3 Oscillating Cold Forging
4 Hu

1 Altan

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_khandaei@mut.ac.ir



آزمون مذکور به همراه نتایج آزمون فشار حلقه به طور همزمان در شبیه‌سازی اجزاء محدود فرآیند آهنگری یک نمونه پره توربین گازی استفاده می‌شود. سپس نمودار نیرو-جابجایی حاصل از این شبیه‌سازی با نمودار نیرو-جابجایی حاصل از شبیه‌سازی با فرض یکنواخت بودن ضریب اصطکاک در کل سطح تماس قالب و قطعه کار مقایسه می‌شود.

۲- صورت مسأله

در این مقاله اثر روانکار در آهنگری همدمای پره تیتانیومی نشان داده شده در شکل ۱ با روش‌های عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور باید مقدار ضریب اصطکاک را با استفاده از روانکار مورد استفاده در فرآیند آهنگری پره و با در نظر گرفتن ملاحظات که قبلاً ذکر شد، مورد ارزیابی قرار داد. همانطور که در شکل ۱ ملاحظه می‌شود، این قطعه کار از دو ناحیه مجزا، یعنی ریشه و ایرفویل، تشکیل شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱: (الف) تصویر پیش‌فرم آهنگری (ب) تصویر پره تیتانیومی پس از آهنگری و برش پلیسه

Fig1. (a) Forging perform shape (b) Titanium blade shape after forging and flash cutting

اکستروژن معکوس و از طرف دیگر در معرض اکستروژن مستقیم قرار داده می‌شود. از نسبت طول‌های اکستروژن شده در دو طرف، برای تعیین ضریب اصطکاک استفاده شده است.

در مطالعه شرایط اصطکاک در شکل‌دهی داغ، یک آزمایش مناسب می‌باید الزامات زیر را تأمین نماید [۷]:

- دمای نمونه و قالب باید مشابه با دماهایی باشد که در عملیات آهنگری داغ وجود دارند.
- مدت زمان تماس بین نمونه و ابزار تحت فشار باید تقریباً مشابه با عملیات شکل‌دهی مورد نظر باشد.
- مقدار انبساط سطحی نمونه^۱ (نسبت مساحت سطح تغییر شکل یافته به مساحت سطح اولیه نمونه) باید تقریباً مشابه مقدار آن در فرآیند مورد نظر باشد.
- سرعت تغییر فرم قطعه کار نسبت به قالب‌ها باید تقریباً همان مقدار و جهتی را داشته باشد که در فرآیند شکل‌دهی مورد نظر وجود دارد.
- جنس ابزار و نمونه آزمایشگاهی باید با جنس قالب و قطعه کار در فرآیند مورد نظر یکسان باشد.

در همین راستا ژو^۲ [۷] به بررسی ضریب اصطکاک آلیاژ تیتانیوم Ti-6Al-4V تحت شرایط آهنگری داغ با استفاده از روانکار شیشه به وسیله ترکیب نتایج حاصل از آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی اجزاء محدود پرداخته است. نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش نشان می‌دهند که ضریب انتقال حرارت اثر قابل توجهی بر روی جریان فلز و منحنی‌های کالیبراسیون و در نتیجه میزان ضریب اصطکاک در سطح تماس دارد. لازم به توجه است که ضریب انتقال حرارت برای روانکار شیشه و شرایط بدون روانکار متفاوت است. بنابراین به منظور به دست آوردن منحنی‌های کالیبراسیون مربوط به تعیین ضریب اصطکاک سطح تماس در آزمون فشار داغ حلقه در مرجع [۷]، سعی شده است تا شرایط انتقال حرارت مناسب در نظر گرفته شود.

آزمون فشار حلقه یکی از روش‌های شناخته شده به منظور محاسبه ضریب اصطکاک بین قطعه و ابزار در فرآیندهای شکل‌دهی سرد و گرم می‌باشد. این آزمون نخستین بار در مطالعات انجام گرفته توسط کونوگی^۳، کودو^۴ و جانسون^۵ ارائه گردید و بعدها توسط محققین دیگر همچون میل^۶ و کوکرافت^۷ توسعه یافت [۸].

در این مقاله یک روش جدید به نام آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای برای برآورد ضریب اصطکاک در فرآیند آهنگری ارائه و استفاده می‌شود. با توجه به متفاوت بودن شرایط اصطکاک در نواحی مختلف سطح تماس قطعه کار و قالب در فرآیند آهنگری، از نتایج

- 1 Surface Expansion
- 2 Zhu
- 3 Kunogi
- 4 Kudo
- 5 Johnson
- 6 Male
- 7 Cockcroft

حدود ۱/۰ میلی‌متر می‌باشد، که پس از اعمال روانکار بر روی قطعه و پیش از قرار دادن قطعه در داخل کوره اندازه‌گیری شده است. نتایج ارائه شده در مراجع نشان می‌دهند که در فرایند آهنگری که تنش‌های عمودی بالا هستند، قانون اصطکاک برشی (چسبنده)، تنش برشی اصطکاکی را به خوبی بیان می‌کند [۳]. به همین دلیل در این تحقیق از قانون اصطکاک برشی استفاده شده است.

قبل از انجام آزمون فشار حلقه باید منحنی‌های کالیبراسیون مربوط به آن تهیه شوند. برای تهیه منحنی‌های مذکور به صورت زیر عمل می‌شود:

(۱) ابتدا شبیه‌سازی آزمون فشار حلقه با پارامترهای مشابه شرایط آزمایشگاهی، اما با ضرایب اصطکاک مختلف صورت می‌پذیرد.

(۲) با استفاده از نتایج به دست آمده برای هر ضریب اصطکاک مشخص، به ازاء هر مقدار جابه‌جایی سنبه، قطر داخلی و ارتفاع نمونه از نتایج شبیه‌سازی استخراج شده و با استفاده از روابط (۱) و (۲) به ترتیب درصد تغییرات قطر داخلی و درصد کاهش در ارتفاع حلقه محاسبه می‌شوند.

$$\frac{D_0 - D}{D_0} \times 100 \quad (1)$$

$$\frac{H_0 - H}{H_0} \times 100 \quad (2)$$

در این روابط ID و H به ترتیب قطر داخلی لحظه‌ای و ارتفاع لحظه‌ای حلقه می‌باشند.

(۳) با تکرار مرحله قبل برای مقادیر مختلف جابه‌جایی سنبه تا انتهای فرآیند، درصد‌های مختلف تغییرات قطر داخلی و همچنین کاهش در ارتفاع نمونه اندازه‌گیری شده و نمودار تغییرات آن‌ها بر حسب یکدیگر رسم می‌گردد.

(۴) تکرار مراحل فوق برای ضرایب اصطکاک متفاوت به کار رفته در شبیه‌سازی، نمودارهای مربوط به هر شرایط اصطکاکی را به دست می‌دهد که با رسم همگی آن‌ها در یک نمودار، منحنی کالیبراسیون به دست می‌آید.

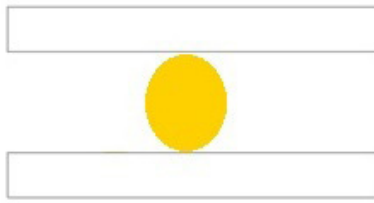
با در اختیار داشتن نمودارهای کالیبراسیون برای تعیین ضریب اصطکاک، کافی است پس از اجرای آزمون حلقه، قطر داخلی و ارتفاع نمونه اندازه‌گیری شده و با جایگذاری در روابط (۱) و (۲) درصد تغییرات قطر داخلی و همچنین درصد کاهش ضخامت نمونه محاسبه شود. سپس مقادیر محاسبه شده با منحنی کالیبراسیون تطبیق داده شده و بدین ترتیب ضریب اصطکاک تخمین زده شود.

با توجه به اینکه شکل حلقه یک شکل متقارن محوری می‌باشد، لذا از مدل دوبعدی متقارن محوری برای شبیه‌سازی آن استفاده شده است. تصویر مدل مورد استفاده در شبیه‌سازی آزمون فشار حلقه، در شکل ۲ مشاهده می‌شود.

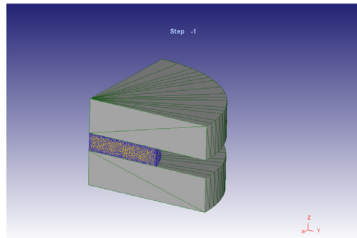
نسبت سطح به حجم در ناحیه ریشه چندان زیاد نیست و در حین تغییر فرم نیز انبساط سطحی خیلی زیادی در این ناحیه رخ نمی‌دهد. اما برعکس، ناحیه ایرفویل نسبت سطح به حجم بسیار بالایی دارد و در حین تغییر فرم نیز انبساط سطحی زیادی در آن ایجاد می‌شود. با توجه به توضیحاتی که قبلاً داده شد، بدیهی است که رفتار روانکار و شرایط اصطکاکی در این دو ناحیه متفاوت خواهد بود. در ناحیه ایرفویل، به دلیل انبساط سطحی زیادی که در آن ایجاد می‌شود و همچنین حالت تقریباً کرنش صفحه‌ای که بر تغییر فرم آن حاکم است، روانکار در جهت عرض (پهنای) ایرفویل جریان پیدا کند. در حالی که تغییر فرم ناحیه ریشه، به گونه‌ای است که تا حدی روانکار را در فضای تماس بین قالب و قطعه‌کار حبس می‌نماید. البته در هر دو ناحیه، بخش قابل توجهی از روانکار همراه با پلیسه از قالب خارج می‌شود. توضیحات فوق ایجاد می‌نمایند که برای ارزیابی اثر اصطکاک در دو ناحیه ریشه و ایرفویل از دو نوع آزمون اصطکاکی مختلف استفاده شود.

۳- انتخاب آزمون مناسب جهت ارزیابی اصطکاک در ناحیه ریشه پره

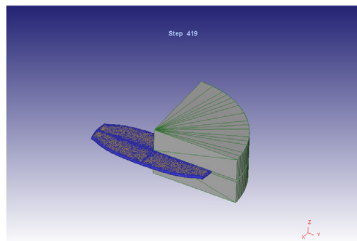
با توجه به توضیحات قبلی، آزمون شناخته شده فشار حلقه برای ارزیابی اصطکاک در ناحیه ریشه پره مناسب به نظر می‌رسد. شرایط آزمون فشار حلقه، از قبیل دما، جنس قطعه‌کار و قالب، نوع روانکار و سرعت انجام فرآیند باید با فرآیند آهنگری پره یکسان باشند. دمای انجام آهنگری هم‌دمای پره تیتانیومی 900°C می‌باشد، لذا آزمون فشار حلقه نیز در همین دما انجام می‌شود. سرعت حرکت قالب بالایی نیز همان سرعت حرکت قالب آهنگری در فرآیند اصلی، که مقدار آن 0.3 میلی‌متر بر ثانیه می‌باشد، خواهد بود. جنس قالب نیز همانند جنس قالب‌های مورد استفاده برای آهنگری پره، از سوپر آلیاژ اینکونل ۱۰۰ انتخاب شده است. ابعاد $3: 20: 27/5$ نیز به عنوان ابعاد نهایی برای انجام آزمون فشار حلقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای آهنگری داغ آلیاژهای تیتانیوم با انبساط سطحی کم معمولاً از روانکارهای دارای ترکیبات گرافیتی استفاده می‌شود. در صورتی که انبساط سطحی زیاد باشد، روانکار شیشه مورد استفاده قرار می‌گیرد که به صورت دوغاب به کار می‌رود [۳]. گاهی از هر دو روانکار، یعنی از روانکار شیشه بر روی قطعه و از روانکار گرافیت بر روی قالب نیز استفاده می‌شود [۹ و ۱۰]. در آهنگری هم‌دمای آلیاژهای تیتانیوم، روانکار علاوه بر کمک به جریان مواد، از سطح قطعه‌کار در برابر واکنش با عناصر گازی نیز محافظت می‌کند. در این تحقیق نیز با توجه به مطالعات صورت گرفته، از روانکار شیشه که به صورت دوغاب بر روی قطعه اعمال شده و پس از آن توسط حرارت خشک می‌شود، برای روانکاری استفاده شده است. ضخامت روانکار پوشش داده شده برای کلیه قطعاتی که در این تحقیق مورد آزمایش قرار گرفته‌اند در



(الف)



(ب)



(ج)

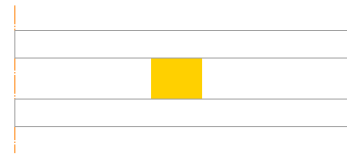
شکل ۳: مدل آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای، (الف) طرح شماتیک آزمون (ب) مدل اجزاء محدود سه بعدی برش خورده قبل از تغییر فرم (ج) مدل اجزاء محدود پس از تغییر فرم

Fig3. Model of open die compression of cylindrical rod test (a) Schematic test model (b) Three-dimensional FE model cut view before deformation (c) FE model after deformation

بدیهی است که در این روش نیز باید مانند تمام روش‌های تخمین ضریب اصطکاک، دمای آزمایش، مدت زمان تماس بین ابزار و نمونه تحت فشار، مقدار انبساط سطحی نمونه، سرعت نسبی بین قطعه و قالب‌ها، جنس ابزار آزمایش و ... با فرآیند واقعی مطابقت داشته باشند. بدین منظور مقادیر تمام پارامترهای فوق مطابق با شرایط آزمون فشار حلقه و فرآیند آهنگری قطعه کار اصلی انتخاب شد. علاوه بر شرایط فرایند، ابعاد نمونه مورد نظر نیز مطابق با ابعاد بخش استوانه‌ای شکل پیش‌فرم که به ایرفویل پره مربوط می‌شود، یعنی با طول و قطر به ترتیب ۴۳ و ۵/۱۸ میلی‌متر تعیین شد.

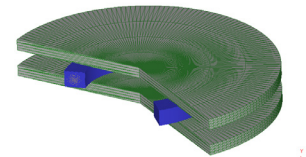
در فرآیند فشار قالب باز میله، اگر طول میله بسیار بلند باشد، توزیع تنش و کرنش مطابق حالت کرنش صفحه‌ای خواهد بود و لذا در حین تغییر فرم میله، تقریباً افزایش طول رخ نخواهد داد. اما در حالتی که طول میله کوتاه است، تغییر فرم از حالت کاملاً کرنش صفحه‌ای خارج شده و میزان اصطکاک بین قالب و قطعه کار، تعیین می‌کند که چه مقدار افزایش

Step -1



(الف)

Step -1



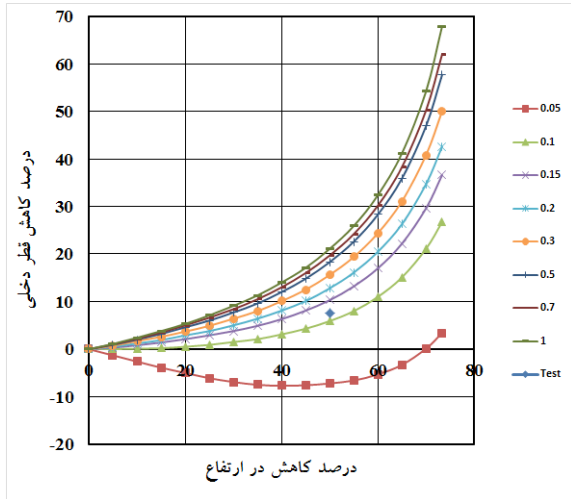
(ب)

شکل ۲: مدل اجزاء محدود آزمون حلقه، (الف) مدل اجزاء محدود متقارن محوری (ب) طرح شماتیک دوران یافته مدل متقارن محوری
Fig2. Ring test FE model (a) Axisymmetric finite element model (b) Schematic rotated view of axisymmetric model

۴- ارائه یک آزمون جدید جهت ارزیابی اصطکاک در ناحیه ایرفویل پره

همانطور که قبلاً شرح داده شد، در ناحیه ایرفویل پره حالتی نزدیک به شرایط کرنش صفحه‌ای حاکم است و انبساط سطحی زیادی در حین تغییر فرم در آن رخ می‌دهد. این حالت تغییر فرم سبب می‌شود تا بخش قابل توجهی از روانکار از مرکز ایرفویل در راستای عرضی و به سمت کانال‌های پلیسه در دو طرف ایرفویل هدایت گردد. در این شرایط لایه بسیار نازکی از روانکار در سطح تماس بین ایرفویل و قالب باقی می‌ماند. به سبب همین نازک شدن لایه روانکار، انتظار می‌رود تا ضریب اصطکاک در ناحیه ایرفویل بزرگتر از ناحیه ریشه پره باشد. روش‌هایی که تا کنون در مراجع مختلف برای ارزیابی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات ارائه شده‌اند، به طور کامل شرایط توصیف شده حاکم بر تغییر فرم ایرفویل را فراهم نمی‌کنند. به همین دلیل نویسندگان مقاله ترجیح دادند تا یک روش جدید را برای ارزیابی اصطکاک در ناحیه ایرفویل این پره ارائه نمایند. به این منظور آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای، که در ادامه توضیح داده خواهد شد، ارائه گردید. در این آزمون ساده، یک میله استوانه‌ای به صورتی که در شکل ۳ نمایش داده شده است توسط دو قالب تخت تحت فشار قرار می‌گیرد. با توجه به تقارن‌های هندسی موجود، یک چهارم از شکل هندسی میله در شبیه‌سازی اجزاء محدود در نظر گرفته می‌شود.

همانطور که قبلاً اشاره شد، برای استخراج ضریب اصطکاک از آزمون‌های اصطکاک، نیاز به نمودارهای کالیبراسیون می‌باشد. نمودار کالیبراسیون مربوط به آزمون فشار حلقه که با استفاده از نتایج شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود به دست آمده، در شکل ۵ ارائه شده است.



شکل ۵: نمودار کالیبراسیون برای حلقه از جنس Ti-6Al-4V و ابعاد ۳:۲۰:۲۷/۵ در دمای °C ۹۰۰ و سرعت فک پرس ۰/۰۳ میلی‌متر بر ثانیه و نتایج به دست آمده از آزمون تجربی

Fig5. Calibration graph for ring test of Ti-6Al-4V alloy and dimensions 27.5:20:3 at 900°C and press ram velocity of 0.03 m/s and experimental results

آزمون حلقه تا رسیدن به حدود ۵۰٪ کاهش ارتفاع انجام شده و در انتهای آزمون ضخامت حلقه به ۱/۵ میلی‌متر رسیده است. در این تحقیق، قطر داخلی در چهار جهت که با یکدیگر زاویه ۴۵ درجه دارند، با استفاده از دستگاه سایه نگار نوری، اندازه‌گیری شده و سپس مقدار میانگین آن برای رسم نمودارها مورد استفاده قرار گرفته است. ضخامت نیز در چهار نقطه از قطعه با زاویه ۹۰ درجه نسبت به هم به وسیله میکرومتر اندازه‌گیری و میانگین حاصل مورد استفاده قرار گرفته است. مقادیر درصد کاهش ارتفاع و درصد کاهش قطر داخلی حلقه در این آزمون در جدول ۱ ارائه شده و نقطه نشان‌دهنده این نتیجه این آزمون در شکل ۵ نیز نمایش داده شده است. با انطباق دادن نتایج این آزمون با نمودارهای کالیبراسیون شکل ۵، ضریب اصطکاک در حدود ۱۱۵٪ به دست می‌آید.

آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای نیز در شرایطی مشابه با فرآیند اصلی انجام شد. شکل ۶ الف تصویر میله آماده‌سازی شده جهت انجام آزمون تجربی را نشان می‌دهد. روانکار استفاده شده در این آزمون نیز همانند فرآیند آهنگری پره، روانکار شیشه می‌باشد که با ضخامت ۱/۱ میلی‌متر به صورت دوغاب بر روی قطعه اعمال شده و سپس به وسیله حرارت خشک شده است. شکل ۶ ب تصویر میله تغییر فرم یافته پس از انجام آزمون را نشان می‌دهد.

طول در حین تغییر فرم میله صورت می‌گیرد. لذا با این توصیف، میزان افزایش طول یک میله کوتاه در حین تغییر فرم بین دو قالب تخت تابعی از ضریب اصطکاک بین قالب و میله خواهد بود. نتایج شبیه‌سازی‌های عددی نیز کاملاً همین وابستگی را نشان می‌دهند. لذا در این آزمون، درصد افزایش طول میله در حین تغییر فرم به عنوان پارامتر اصلی نشان دهنده ضریب اصطکاک در نظر می‌شود. در مورد این آزمون نیز لازم است تا ابتدا نمودارهای کالیبراسیون ترسیم شوند. با توجه به توضیحات قبلی، برای به دست آوردن نمودار کالیبراسیون، تغییرات درصد افزایش طول میله در برابر درصد کاهش ارتفاع ترسیم خواهد شد. درصد کاهش ارتفاع و درصد افزایش طول به ترتیب از روابط (۳) و (۴) قابل محاسبه می‌باشند.

$$\frac{H_0 - H}{H_0} \times 100 \quad (3)$$

$$\frac{L - L_0}{L_0} \times 100 \quad (4)$$

در روابط فوق (H_0) ارتفاع اولیه‌ی نمونه (که برابر با قطر نمونه می‌باشد)، (H) ارتفاع لحظه‌ای نمونه، (L_0) طول اولیه نمونه و (L) طول لحظه‌ای نمونه می‌باشند. مراحل محاسبه نمودار کالیبراسیون این آزمون مطابق توضیحات بخش ۳ می‌باشد.

۵- نتایج تجربی آزمون‌های ارزیابی اصطکاک و تطبیق آن‌ها با نمودارهای کالیبراسیون

با توجه به شرایط تغییر فرم در ناحیه ایرفویل میله، روانکار شیشه برای استفاده در فرآیند آهنگری هم‌دمای پره انتخاب شده است. لذا در هر دو آزمون ارزیابی اصطکاک نیز از همین روانکار استفاده می‌شود. در شکل ۴ حلقه مورد استفاده در آزمون فشار حلقه قبل از آزمون (بدون روانکار و بعد از پوشش روانکار) و بعد از آزمون نمایش داده شده است.



شکل ۴: (الف) حلقه آماده‌سازی شده جهت انجام آزمون فشار حلقه قبل و بعد از پوشش روانکار (ب) حلقه تغییر فرم یافته پس از آزمون فشار

Fig4. (a) Prepared ring for compression test before and after covering the lubricant (b) Deformed ring after compression test

توجه است که تمام شرایط برای دو آزمون فشار حلقه و فشار میله یکسان بوده و تنها شکل هندسی نمونه‌ها (یعنی حلقه و میله) متفاوت بوده است. لذا اختلافی که در ضرایب اصطکاک به دست آمده از این دو آزمون ملاحظه می‌شود، دقیقاً نشان دهنده تأثیر شرایط تغییر فرم بر رفتار روانکار و میزان ضریب اصطکاک است.

جدول ۱: مشخصات و نتایج حاصل از آزمون‌های فشار حلقه و فشار قالب باز میله استوانه‌ای

Table 1. Characteristics and results of ring compression and open die rod compression tests

مقدار ضریب اصطکاک برشی	مقدار ضخامت روانکار (mm)	درصد کاهش قطر داخلی / افزایش طول	مقدار قطر داخلی / طول پس از انجام آزمایش	ارتفاع قطعه پس از انجام آزمایش	درصد کاهش ارتفاع	نوع آزمون
۰/۱۱۵	۰/۱	۷/۵٪	۱۸/۵	۵۰٪	۱/۵	فشار حلقه
۰/۳۹	۰/۱	۱۶/۴۷٪	۵۰/۰۸	۷۵/۱٪	۱/۲۹	فشار میله

۶- تحلیل اجزاء محدود و فرایند تجربی آهنگری پره

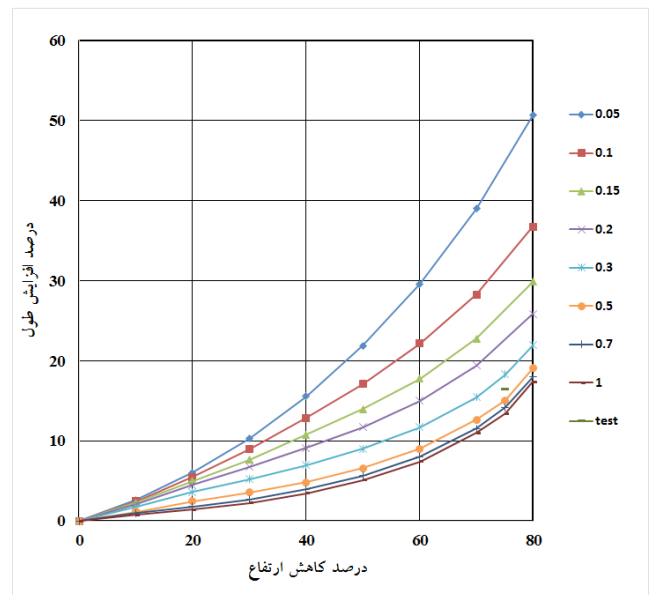
فرایند آهنگری پره با استفاده از نرم‌افزار تجاری دی‌فورم^۱ به صورت سه‌بعدی تحلیل شده و از منحنی‌های تنش- کرنش آلیاژ Ti-6Al-4V مربوط به دمای ۹۰۰°C که در کتابخانه نرم‌افزار موجود هستند در آن استفاده شده است. نرم‌افزار دی‌فورم به دلیل قابلیت‌هایی که برای تحلیل فرایند آهنگری دارد امروزه در تحقیقات علمی و صنعتی مربوط به آهنگری مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۱]. فرآیند آهنگری هم‌دمای پره به صورت شبه استاتیکی مدل‌سازی و تحلیل شده است. با توجه به اینکه فرآیند تجربی به صورت هم‌دمای انجام می‌شود، و لذا دمای قطعه‌کار و قالب در تمام طول فرآیند با هم برابر می‌باشد، باید همین شرایط حرارتی دمای ثابت را در شبیه‌سازی اجزاء محدود نیز در نظر گرفت. برای مش‌بندی مدل پیش‌فرم پره از المان‌های هرمی شکل و تکنیک مش‌بندی مجدد استفاده شده است. مدل پیش‌فرم با اندازه کوچک‌ترین المان ۰/۱۴۵ میلی‌متر و نسبت بزرگ‌ترین المان به کوچک‌ترین المان ۳/۵ و با تعداد ۳۵۲۱۴۳ المان مش‌بندی شد. با مقایسه مش‌بندی‌های مختلف مشخص شد که با این کیفیت مش‌بندی، حساسیت نتایج تحلیل به تعداد مش وجود ندارد. شکل ۸ نمودار تغییرات نیروی فرآیند در برابر تعداد المان‌های مدل را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که به ازاء تعداد المان‌های بیشتر از ۳۰۰۰۰۰، وابستگی نیروی فرآیند به تعداد المان‌ها از بین رفته است.



شکل ۶: (الف) تصویر میله آماده‌سازی شده جهت انجام آزمون فشار میله (ب) تصویر میله تغییر فرم یافته پس از خاتمه آزمون

Fig6. (a) Prepared rod for open die compression of cylindrical rod test (b) Deformed rod after compression test

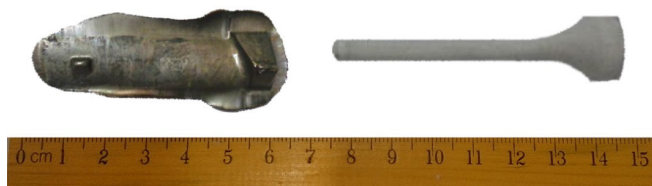
نمودارهای کالیبراسیون آزمون فشار میله نیز با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی به دست آمده و در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۷: نمودار کالیبراسیون آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای برای آلیاژ Ti-6Al-4V و ابعاد $\text{Ø } 5.18 \times 43$ در دمای ۹۰۰°C و سرعت حرکت رام ۰/۰۳ میلی‌متر بر ثانیه به همراه نتایج به دست آمده از آزمون تجربی

Fig7. Calibration graph for open die compression test of cylindrical rod of Ti-6Al-4V alloy and dimensions Ø 5.18:43 at 900°C and press ram velocity of 0.03 m/s and experimental results

در آزمون فشار میله، میله تا ارتفاع ۳/۸۹ میلی‌متر فشرده شد. مقادیر مربوط به درصد کاهش ارتفاع و درصد افزایش طول با استفاده از روابط (۳) و (۴) به ترتیب برابر ۷/۵٪ و ۱۶/۴۷٪ به دست آمدند. با قرار دادن این نتایج در نمودار کالیبراسیون آزمون فشار میله، شکل ۷، مقدار ضریب اصطکاک برشی در حدود ۰/۳۹ به دست می‌آید. ملاحظه می‌شود که ضریب اصطکاک به دست آمده تا حد قابل توجهی بزرگتر از ضریب اصطکاک حاصل از آزمون فشار حلقه است. نتایج حاصل از آزمون‌های حلقه و میله در جدول ۱ قابل مشاهده هستند. لازم به



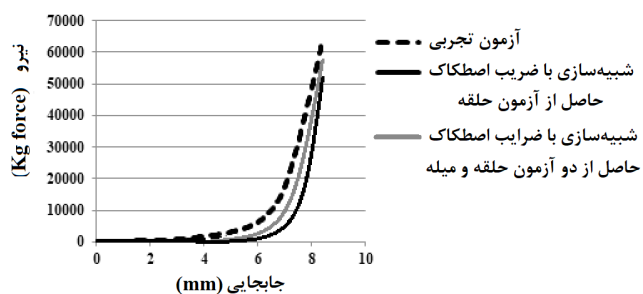
(ب) (الف)

شکل ۱۰: (الف) پیش‌فرم پوشش داده شده با روانکار شیشه (ب) قطعه‌کار حاصل از فرآیند آهنگری

Fig10. (a) Preform covered by glass lubricant (b) Forged workpiece

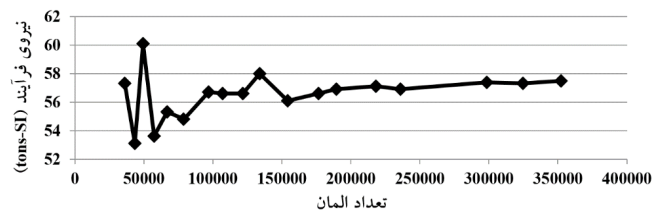
با توجه به نتایج شبیه‌سازی فرآیند آهنگری پره، نیروی مورد نیاز فرایند ۵۷/۵۲ تن به دست آمده است. شکل ۹ ج توزیع تنش مؤثر در قطعه حاصل از شبیه‌سازی اجزاء محدود را نمایش می‌دهد. فرآیند تجربی آهنگری هم‌دمای پره نیز با استفاده از روانکار شیشه به ضخامت ۱ میلی‌متر و شرایطی کنترل شده از نظر دما و نرخ کرنش انجام گرفت. با انجام فرایند آهنگری، نیروی مورد نیاز فرایند عملی نیز ۶۲/۹۸ تن به دست آمد که تطبیق قابل قبولی با نتایج شبیه‌سازی دارد. اختلاف بین ماکزیمم نیروهای به دست آمده از تحلیل عددی و آزمون تجربی برابر ۸/۶٪ می‌باشد. شکل ۱۰ ب تصویر پره آهنگری شده را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه روش معمول در اغلب تحقیقات گذشته این است که ضریب اصطکاک در کل سطح تماس بین قطعه‌کار و قالب یکسان فرض می‌شود، و غالباً این ضریب اصطکاک یکنواخت از آزمون فشار حلقه به دست می‌آید، در اینجا برای مقایسه نتایج روش مورد بحث در این مقاله با روش معمول در تحقیقات گذشته، نمودارهای نیروی فرآیند مربوط به آزمون تجربی آهنگری، شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از ضریب اصطکاک یکنواخت حاصل از آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از دو ضریب اصطکاک به دست آمده از آزمون‌های فشار حلقه و فشار میله در شکل ۱۱ ارائه شده‌اند.



شکل ۱۱: مقایسه نمودارهای نیروی فرآیند مربوط به فرآیند تجربی آهنگری، شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از ضریب اصطکاک یکنواخت حاصل از آزمون فشار حلقه و شبیه‌سازی اجزاء محدود با استفاده از دو ضریب اصطکاک به دست آمده از آزمون‌های فشار حلقه و فشار میله

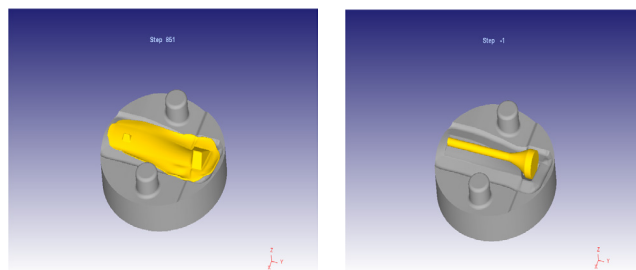
Fig11. Comparison of process force diagrams related to empirical forging process, FE simulation using uniform friction coefficient ring compression test and FE simulation using two coefficients of friction obtained from ring compression and rod compression tests



شکل ۸: تغییرات نیروی فرآیند آهنگری پره به ازاء تعداد المان‌های مختلف در شبیه‌سازی اجزاء محدود

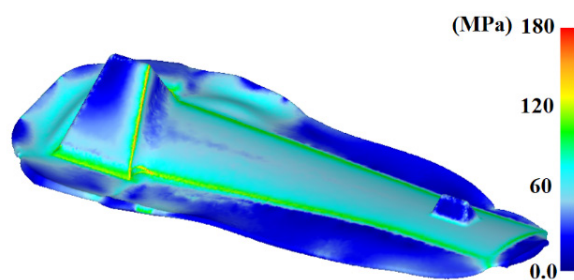
Fig8. Blade forging force variations for the different numbers of elements in FE simulation

با توجه به نتایج حاصل از دو آزمون اصطکاک انجام شده، ضریب اصطکاک برشی برای ناحیه ایرفویل پره برابر ۰/۳۹ (با توجه به نتیجه به دست آمده از آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای) و برای ناحیه ریشه برابر ۰/۱۱۵ (با توجه به نتیجه به دست آمده از آزمون فشار حلقه) در نظر گرفته شده است. نحوه قرارگیری پیش‌فرم درون قالب و تصویر پره حاصل از آهنگری در شکل ۹ نشان داده شده‌اند.



(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۹: (الف) موقعیت پیش‌فرم بر روی قالب آهنگری (ب) پره آهنگری شده در داخل قالب (ج) توزیع تنش ون‌میسز در پره آهنگری شده

Fig9. (a) Preform position on forging die (b) Forged blade in the die (c) Von-Mises stress distribution in the forged blade

در نهایت، آهنگری پره با شرایطی که در بخش‌های قبلی این مقاله ذکر شده است انجام شد. شکل ۱۰ پیش‌فرم پوشش داده شده توسط روانکار شیشه و قطعه‌کار حاصل از فرآیند آهنگری هم‌دمای پره را نشان می‌دهد.

۷- نتیجه‌گیری

مراجع

- [1] T. Altan, S.-I. Oh, G. Giegel, Metal forming fundamentals and applications, American Society for Metals, 1983, (1983) 353.
- [2] G. Shen, A. Vedhanayagam, E. Kropp, T. Altan, A method for evaluating friction using a backward extrusion-type forging, Journal of Materials Processing Technology, 33(1-2) (1992) 109-123.
- [3] B. Buchner, G. Maderthoner, B. Buchmayr, Characterisation of different lubricants concerning the friction coefficient in forging of AA2618, Journal of materials processing technology, 198(1-3) (2008) 41-47.
- [4] H. Kim, T. Altan, Effects of surface finish and die temperature on friction and lubrication in forging, Procedia Engineering, 81 (2014) 1848-1853.
- [5] Q. Zhang, N.-y. Ben, K. Yang, Effect of variational friction and elastic deformation of die on oscillating cold forging for spline shaft, Journal of Materials Processing Technology, 244 (2017) 166-177.
- [6] C. Hu, Q. Yin, Z. Zhao, A novel method for determining friction in cold forging of complex parts using a steady combined forward and backward extrusion test, Journal of Materials Processing Technology, 249 (2017) 57-66.
- [7] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, Cold and hot forging: fundamentals and applications, ASM international, 2004.
- [8] 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, 44(12) (2011) 2074-2080.
- [9] T. Robinson, H. Ou, C.G. Armstrong, Study on ring compression test using physical modelling and FE simulation, Journal of Materials Processing Technology, 153 (2004) 54-59.
- [10] A.D. Santos, J.F. Duarte, A. Reis, B. da Rocha, R. Neto, R. Paiva, The use of finite element simulation for optimization of metal forming and tool design, Journal of Materials Processing Technology, 119(1-3) (2001) 152-157.
- [11] C. Lv, L. Zhang, Z. Mu, Q. Tai, Q. Zheng, 3D FEM simulation of the multi-stage forging process of a gas turbine compressor blade, Journal of Materials Processing Technology, 198(1-3) (2008) 463-470.

در این مقاله تحلیل عددی و تجربی اثر روانکار در فرایند آهنگری دقیق هم‌دمای پره تیتانیومی مورد بررسی قرار گرفت. جهت تخمین مقدار ضریب اصطکاک برشی در فصل مشترک قالب و قطعه‌کار روانکاری شده به وسیله روانکار شیشه، از آزمون فشار حلقه برای ناحیه ریشه و از آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای برای ناحیه ایرفویل استفاده شد. با استفاده از نتایج حاصل از این آزمون‌ها، شبیه‌سازی فرایند آهنگری پره انجام گرفت و نیروی مورد نیاز فرآیند با خطای قابل قبولی به دست آمد.

با توجه به آزمون‌های انجام شده می‌توان گفت:

- آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای که برای اولین بار در این مقاله معرفی شد و مورد استفاده قرار گرفت، به خوبی می‌تواند برای ارزیابی اصطکاک در یک فرآیند شکل‌دهی فلزات مورد استفاده قرار گیرد.
- یکی از شرایط لازم برای کارآمد بودن آزمون‌های اصطکاک، تفکیک‌پذیری مناسب منحنی‌های کالیبراسیون آنهاست. شکل ۷ نشان می‌دهد که منحنی‌های کالیبراسیون آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای تفکیک‌پذیری قابل قبولی دارند.
- با توجه به توضیحاتی که در مورد رفتار متفاوت روانکار در دو ناحیه ریشه و ایرفویل پره داده شد، انتظار می‌رفت که ضریب اصطکاک در ناحیه ایرفویل بزرگتر از ناحیه ریشه باشد. نتایج حاصل از دو آزمون اصطکاک انجام شده در این مقاله، به خوبی این اختلاف قابل توجه را نشان می‌دهند.
- با توجه به اختلاف قابل توجه بین مقادیر ضریب اصطکاک در دو ناحیه ریشه و ایرفویل پره مورد بررسی در این مقاله، کاملاً روشن است که اگر آزمون‌های اصطکاک جداگانه‌ای متناسب با هر یک از این نواحی انجام نمی‌شد و یک ضریب اصطکاک یکسان برای هر دو ناحیه در شبیه‌سازی فرآیند در نظر گرفته می‌شد، خطای نتایج شبیه‌سازی به طور مشهودی افزایش می‌یافت. لذا جهت افزایش دقت پیش‌بینی نیروی فرآیندهای شکل‌دهی فلزات، بهتر است با توجه به شکل هندسی قطعه‌کار، در صورت لزوم ضریب اصطکاک هر بخش از قطعه‌کار را از آزمون متناسب با آن به دست آورد.
- با توجه به اینکه تمام شرایط برای دو آزمون فشار حلقه و فشار میله در این تحقیق یکسان بوده و تنها شکل هندسی نمونه‌ها (یعنی حلقه و میله) متفاوت بوده است، این نتیجه به دست می‌آید که اختلاف مشاهده شده در ضرایب اصطکاک به دست آمده از این دو آزمون، دقیقاً نشان دهنده تأثیر کیفیت تغییرفرم قطعه‌کار بر رفتار روانکار و میزان ضریب اصطکاک است.
- با توجه به این که پره‌ها غالباً از دو بخش ریشه و ایرفویل تشکیل شده‌اند، استفاده از آزمون حلقه برای ضریب اصطکاک بخش ریشه و آزمون میله برای ضریب اصطکاک بخش ایرفویل در شبیه‌سازی اجزاء محدود، می‌تواند دقت قابل قبولی را برای پیش‌بینی نیروی فرآیند در پی داشته باشد.