

ارائه یک روش جدید ارزیابی اثرات اصطکاک در فرآیندهای آهنگری بر اساس آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای

مهرداد خاندائی*

حمید عربی

محمد بیگ محمدی

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

محقق ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

دانشجوی کارشناسی ارشد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوریهای ساخت، دانشگاه صنعتی مالک

اشتر، تهران، ایران

چکیده

ضریب اصطکاک در سطح تماس قالب و قطعه‌کار یکی از عوامل مهمی است که تأثیر قابل توجهی بر مراحل طراحی یک فرایند آهنگری دارد. تا کنون روش‌های مختلفی توسط محققان برای اندازه‌گیری اصطکاک مورد استفاده قرار گرفته‌اند که همگی دارای مزایا و معایبی می‌باشند. در این مقاله، روش جدیدی به نام فشار قالب باز میله برای اندازه‌گیری اصطکاک معرفی شده و مورد بررسی عددی و تجربی قرار گرفته است. با توجه به اینکه آلیاژهای تیتانیوم از نوع آلیاژهای کارسخت‌پذیر هستند و ارزیابی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی تیتانیوم اهمیت بالایی دارد، لذا در آزمون تجربی، یک نمونه از جنس Ti-6Al-4V مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهند که حساسیت این روش نسبت به میزان ضریب اصطکاک در حد مطلوبی بالا است؛ به طوری که منحنی‌های نمودار کالیبراسیون آزمون به خوبی از یکدیگر تفکیک می‌شوند. همچنین شکل هندسی قطعه‌کار سبب می‌شود تا سطح‌افزایی بالایی در حین انجام آزمون صورت بگیرد.

واژه‌های کلیدی: اصطکاک، آزمون ارزیابی اصطکاک، فرایند آهنگری، فشار قالب باز میله، نمودار کالیبراسیون اصطکاک، آلیاژ Ti-6Al-4V.

A new method for investigating friction effects in forging processes using open die compression test of a cylindrical rod

Mehrdad Khandaei

Hamid Arabi

Mohammad Beig Mohammadi

Materials and Manufacturing Technologies Comple, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Materials and Manufacturing Technologies Comple, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Materials and Manufacturing Technologies Comple, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

The friction factor between workpiece and die is one of the important factors that affects the design steps of a forging process. By now, various methods, that each one has its own advantages and disadvantages, have been used by other researchers in order to estimate the friction factor. In this paper, a new method, which has been named open die compression of a cylindrical rod, has been presented to estimate the friction factor and investigated numerically and experimentally. As Titanium alloys are classified as a kind of hard to work metal alloys and it is important to investigate friction in forming processes of titanium, a sample of Ti-6Al-4V bar has been investigated in experimental test. The results show that this method has an agreeably high sensitivity to friction factor value; So that calibration graphs are separate enough. Also, the geometrical shape of the workpiece causes a great surface expansion during the test.

Keywords: Friction, Friction estimation test, Forging process, Open die compression of a cylindrical rod, Friction calibration graphs, Ti-6Al-4V alloy.

دارد. با این توصیف، بدیهی است که اصطکاک می‌تواند راندمان یک فرآیند شکل‌دهی فلزات را به شدت تحت تأثیر قرار دهد [۱]. در فرآیند آهنگری قالب بسته دقیق، دستیابی به شکل هندسی نهایی قطعه‌کار در فرآیند شکل‌دهی از اهمیت بالایی برخوردار است، به همین دلیل ضرورت تحلیل و بررسی اصطکاک نیز بسیار بیشتر می‌باشد. در واقع می‌توان گفت که ارزیابی راندمان روانکار و بررسی میزان ضریب اصطکاک در یک فرآیند آهنگری به اندازه تحلیل اجزاء محدود فرآیند اهمیت دارد [۲]. به همین دلیل، تا به حال روش‌های مختلفی جهت ارزیابی خاصیت روانکاری روانکارهای مختلف و همچنین تخمین میزان ضریب اصطکاک مؤثر در یک فرآیند شکل‌دهی فلزات توسط محققین

۱- مقدمه

نقش کمی و کیفی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات برای متخصصین و کارشناسان صنعتی مرتبط با این حوزه کاملاً واضح و روشن است. اصطکاک می‌تواند سهم قابل توجهی از نیروی مورد نیاز فرآیند را به خود اختصاص دهد و درصد کمی تغییر در ضریب اصطکاک می‌تواند موجب تغییر قابل توجهی در نیروی مورد نیاز فرآیند شود. از طرف دیگر، اصطکاک بین قطعه‌کار و ابزار در یک فرآیند شکل‌دهی فلزات، در کیفیت جریان ماده در حین فرآیند شکل‌دهی، اعوجاج‌های داخلی قطعه‌کار و تشکیل عیوب داخلی نیز نقش قابل توجهی

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: m_khandaei@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۶/۰۵/۱۵

تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۱/۱۴

ارائه شده‌اند. بعضی از این روش‌ها نسبتاً ساده هستند و انجام آنها مستلزم به کار گیری ابزارهای ویژه‌ای نیست. اما بعضی دیگر پیچیدگی‌های قابل توجهی داشته و به تجهیزات خاصی نیاز دارند. در این مقاله یک روش ساده برای ارزیابی اصطکاک در فرآیند آهنگری ارائه شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش، از فرآیند فشار یک میله استوانه‌ای توسط قالب‌های تخت استفاده می‌شود.

۲- انواع روش‌های آزمون اصطکاک

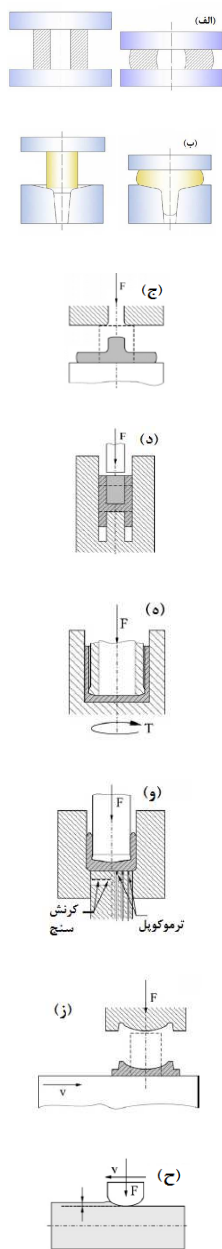
میزان ضریب اصطکاک در سطح تماس قالب و قطعه‌کار به عواملی از قبیل مشخصات فیزیکی روانکار، ضخامت لایه روانکار، چسبندگی بین روانکار و سطوح فلزی، دما، فشار عمودی بین سطوح تماسی قطعه‌کار و قالب، سرعت جریان فلز نسبت به سطح قالب، میزان سطح افزایی و شکل هندسی ناحیه تماس بستگی دارد. بدیهی است که اگر بنا باشد تا یک آزمون آزمایشگاهی بتواند میزان اصطکاک را در یک فرآیند آهنگری برآورد نماید، باید عوامل فوق در آزمون مذکور تا حد معقولی به فرآیند واقعی نزدیک باشند. البته در صورت افراط در نزدیک کردن شرایط آزمون به فرآیند واقعی، آزمون بیش از حد پیچیده و پرهزینه خواهد شد.

تا کنون روش‌های مختلفی جهت تخمین مقدار اصطکاک در فصل مشترک قالب و قطعه‌کار ارائه شده است. این روش‌ها را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی نمود [۳]. دسته اول آزمون‌هایی هستند که در آنها قطعه‌کار می‌تواند در دو جهت مختلف تغییرشکل پلاستیک پیدا کند. نسبت تغییرشکل ایجاد شده در دو جهت بستگی به میزان اصطکاک دارد. لذا تنها با اندازه‌گیری میزان تغییرشکل قطعه‌کار در انتهای آزمون، می‌توان ضریب اصطکاک را برآورد نمود. دسته دوم آزمون‌هایی هستند که در آنها علاوه بر تغییرشکل قطعه‌کار، باید نیرو و یا گشتاور نیز در حین انجام آزمون اندازه‌گیری شود. بدیهی است که انجام آزمون‌های دسته دوم مشکل‌تر و پرهزینه‌تر از آزمون‌های دسته اول می‌باشد. شناخته شده‌ترین روش آزمون ارزیابی اصطکاک در دسته اول، آزمون فشار حلقه است که طرحواره آن در شکل ۱ الف نمایش داده شده است [۱].

یکی از نقاط ضعف آزمون فشار حلقه این است که چنانچه میزان فشردگی حلقه در حین آزمون زیاد شود تا سطح افزایی کافی، که یکی از عوامل مؤثر در شرایط اصطکاک فرآیندها شکل‌دهی است، انجام گردد، دیواره‌های جانبی حلقه خم شده و به سطوح تخت بالایی و پایینی اضافه می‌شوند. نمونه‌ای از این وضعیت در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به اینکه شرایط روانکاری سطوح تخت حلقه با شرایط فرآیند واقعی همسان‌سازی می‌شوند، این پدیده سبب می‌شود تا شرایط روانکاری در نظر گرفته شده برای سطوح تخت حلقه در طول آزمون ثابت باقی نماند.

روش آزمون فشار T شکل که در شکل ۱ ب نمایش داده شده است، روشی است که در آن جریان مواد به داخل یک شیار وارد می‌شود و لذا می‌تواند برای ارزیابی اصطکاک در حین پر شدن حفره‌های قالب مورد استفاده قرار گیرد. این روش توسط ژانگ^۱ و همکاران [۵]

برای ارزیابی اصطکاک در فرآیند آهنگری سرد مورد استفاده قرار گرفته است.



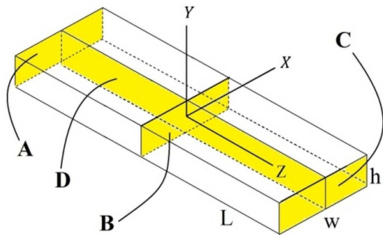
شکل ۱- روش‌های مختلف آزمون اصطکاک (الف) آزمون فشار حلقه [1] (ب) آزمون فشار T شکل [۵] (ج) آزمون میخچه [۲] (د) آزمون اکستروژن دو فنجان [۲] (ه) آزمون اکستروژن معکوس (روش اول) [۶] (و) آزمون اکستروژن معکوس (روش دوم) [۷] (ز) آزمون فشار-سایش (روش اول) [۸] (ح) روش فشار-سایش (روش دوم) [۹]

¹Zhang

در این صورت با روش تحلیل قاچی می‌توان به سادگی رابطه (۱) را برای توزیع فشار عمودی بر روی سطح بالایی بلوک به دست آورد [۱۰].

$$P = 2k \exp \left[\frac{2\mu}{h} \left(\frac{w}{2} - x \right) \right] \quad (1)$$

رابطه (۱) نشان می‌دهد که بیشینه فشار عمودی در نقطه میانی عرض بلوک، یعنی $x = 0$ ، ایجاد می‌شود، زیرا نقاط واقع در مرکز بلوک برای تغییر شکل و جابجایی در راستای محور x ، باید بر نیروی اصطکاک وارد بر نقاط جلوتر از خود نیز غلبه کنند. روشن است که چنانچه طول بلوک محدود باشد، دیگر نمی‌توان فرض کرنش صفحه‌ای را برای تمام نقاط بلوک به کار برد. در این شرایط، با توجه به تقارن و شرایط مرزی بلوک، فرض کرنش صفحه‌ای با تقریب قابل قبولی برای مقطع B شکل ۴ برقرار می‌باشد. این در حالی است که مقاطع A و C شکل ۴ کاملاً در شرایط تنش صفحه‌ای قرار خواهند داشت.



شکل ۴- بلوک مستطیلی با طول محدود در فرآیند فشار قالب باز

حال اگر رابطه (۱) را به طور تقریبی بر روی مقطع D شکل ۴ و در امتداد محور Z به کار ببریم، یعنی

$$P = 2k \exp \left[\frac{2\mu}{L} \left(\frac{w}{2} - z \right) \right] \quad (2)$$

با استدلال مشابه می‌توان گفت که در این شرایط، نقاط مجاور سطح B برای تغییر شکل و جابجایی در امتداد محور Z ، باید بر نیروی اصطکاک وارد بر نقاط جلوتر از خود غلبه نمایند. لذا حالت تنش در این نقاط به حالت کرنش صفحه‌ای نزدیک می‌باشد و مطابق رابطه (۲)، بیشینه فشار در امتداد محور Z ، در محل $Z = 0$ ایجاد خواهد شد. این در حالیست که با فاصله گرفتن از سطح B در امتداد محور Z ، حالت تنش به تدریج تغییر می‌کند تا در سطوح A و C به حالت تنش صفحه‌ای تبدیل می‌شود. می‌توان انتظار داشت که هر چه میزان ضریب اصطکاک بین سطوح بالایی و پائینی بلوک و قالب بیشتر شود، محدوده وسیع‌تری از نقاط ناحیه میانی بلوک در مجاورت سطح B به حالت کرنش صفحه‌ای نزدیک شوند. در این صورت میزان جابجایی نقاط واقع بر سطوح A و C در امتداد محور Z کمتر خواهد شد. از این بحث می‌توان نتیجه گرفت که میزان جابجایی نقاط واقع بر سطوح A و C در فرآیند فشار قالب باز بلوک مستطیلی، تابعی از اصطکاک بین قالب و سطوح بالایی و پائینی بلوک می‌باشد. با توجه به این مسأله، در این مقاله فرآیند فشار قالب باز میله به عنوان یک روش سنجش ضریب اصطکاک پیشنهاد می‌گردد.

نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که چنانچه یک بلوک مستطیلی در این فرآیند تحت فشار قرار داده شود، حتماً پس از مقداری تغییر شکل، دیواره‌های جانبی بلوک خمیده شده و به سطوح بالایی و پائینی اضافه می‌شوند. در این صورت پدیده‌ای مشابه با آنچه



شکل ۲- حلقه فشرده شده در آزمون فشار حلقه (مناطق تیره‌تر، در نتیجه خم شدن دیواره‌های جانبی حلقه به وجد آمده‌اند) [۴]

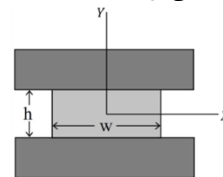
روش آزمون دیگری که برای ارزیابی اصطکاک متداول است، روش موسوم به میخچه است که در شکل ۱ ج نمایش داده شده است [۳]. آزمون اکستروژن دو فنجانی که در شکل ۱ د نشان داده شده است، نیز روشی است که توسط شریدر^۲ و همکاران [۲] برای ارزیابی اصطکاک در آهنگری سرد مورد بررسی قرار گرفته است.

از دسته دوم روش‌های آزمون اصطکاک می‌توان به آزمون اکستروژن معکوس که توسط هانسن^۳ و همکاران [۶] برای ارزیابی اصطکاک در آهنگری سرد ارائه شده اشاره نمود. این روش در شکل ۱ ه نشان داده شده است. در این روش گشتاور وارد بر قالب پائینی باید اندازه‌گیری شود. دُج^۴ و همکاران [۷] شکل دیگری از روش آزمون اکستروژن معکوس را برای ارزیابی اصطکاک پیشنهاد نمودند که در آن کرنش و دما در قالب پائینی اندازه‌گیری می‌شود. این روش در شکل ۱ و نمایش داده شده است. گروچه^۵ و همکاران [۸] روشی را ارائه نمودند که مبتنی بر اعمال همزمان نیروی فشاری و سایش بر قطعه‌کار است. این روش در شکل ۱ ز نشان داده شده است. ناگیل^۶ و همکاران [۹] نیز شکل دیگری از روش آزمون با فشار و سایش همزمان را ارائه نمودند که در شکل ۱ ح نشان داده شده است.

۳- ارائه فرآیند فشار قالب باز میله به عنوان یک

آزمون ارزیابی اصطکاک

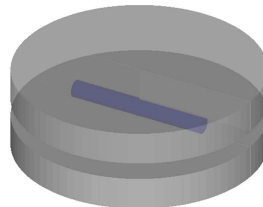
روابط حاکم بر فرآیند فشار بلوک مستطیلی شکل با روش تحلیل قاچی در مراجع مختلف ارائه شده‌اند [۱۰]. طرحواره این فرآیند در شکل ۳ نمایش داده شده است. بدیهی است که در صورتی که طول بلوک مستطیلی در شکل ۳ نامحدود باشد (در راستای عمود بر صفحه)، می‌توان حالت تنش را کرنش صفحه‌ای در نظر گرفت (در تمام نقاط بلوک $\epsilon_z = 0$ در نظر گرفته می‌شود).



شکل ۳- طرحواره فرآیند فشار قالب باز بلوک مستطیلی [۱۰]

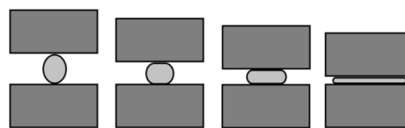
¹ spike
² Schrader
³ Hansen
⁴ Doege
⁵ Groche
⁶ Nagile

در شکل ۲ در خصوص آزمون فشار حلقه نشان داده شده است، رخ خواهد داد. همانطور که قبلاً اشاره شد، این پدیده نامطلوب و محدود کننده است. لذا در اینجا پیشنهاد می‌شود تا به جای بلوک مستطیلی از یک میله استوانه‌ای، مطابق شکل ۵، در آزمون فشار قالب باز استفاده شود.



شکل ۵- فرآیند فشار قالب باز یک میله استوانه‌ای

همانطور که در شکل ۶ به صورت طرحواره نشان داده شده است، پس از مقداری فشردگی در فرآیند فشار قالب باز میله استوانه‌ای، مقطع قطعه کار به بلوک مستطیلی تغییر شکل یافته شبیه خواهد شد. لذا وابستگی تغییر شکل طولی میله به ضریب اصطکاک، مشابه با آنچه در مورد بلوک مستطیلی اشاره شد، برای میله استوانه‌ای هم برقرار خواهد بود.



شکل ۶- طرحواره فرآیند فشار قالب باز میله استوانه‌ای

استفاده از میله استوانه‌ای به جای بلوک مستطیلی مزایای زیر را در پی خواهد داشت:

(الف) از پدیده خمیدگی دیواره‌های جانبی، مانند آنچه در آزمون فشار حلقه رخ می‌دهد، پیشگیری می‌شود. لذا امکان سطح افزایی زیادی در این آزمون وجود خواهد داشت.

(ب) در تعداد قابل توجهی از فرآیندهای آهنگری صنعتی، برای سادگی، سعی می‌شود تا از یک میله استوانه‌ای یا اشکال نسبتاً ساده-ای که از تغییر شکل میله استوانه‌ای حاصل می‌شوند، به عنوان پیش‌فرم آهنگری استفاده شود. تاریخچه تغییر شکل قطعه کار در آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای، به این نوع فرآیندهای آهنگری شباهت دارد. همانطور که قبلاً اشاره شد، این شباهت برای یک آزمون ارزیابی اصطکاک، یک مزیت محسوب می‌گردد.

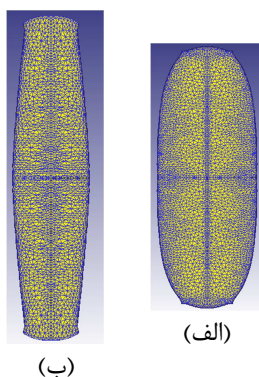
۴- بررسی عددی آزمون فشار قالب باز میله

استوانه‌ای و استخراج منحنی‌های کالیبراسیون

با توجه به اینکه آلیاژهای تیتانیوم آلیاژهایی با کارپذیری دشوار هستند، شکل‌دهی آنها نیازمند دمای بالا و نیروی زیادی است، و روانکارهای محدودی نیز برای کار در آن دماهای بالا وجود دارند، در این تحقیق آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای برای ارزیابی اصطکاک در تغییر شکل آلیاژ Ti-6Al-4V در دمای ۹۰۰°C با روانکار شیشه به کار برده شده است. در تحلیل اجزاء محدود از منحنی تنش-کرنش آلیاژ مذکور در دمای مورد نظر که در کتابخانه نرم‌افزار موجود است استفاده شده است. یک میله استوانه‌ای با قطر (H₀) و طول (L₀) به

ترتیب برابر ۵/۱۸ mm و ۴۳ mm مورد بررسی قرار گرفته است. نسبت ابعادی میله را به صورت H₀:L₀ نمایش می‌دهیم. میله مورد نظر مطابق شکل ۵ بین دو قالب دایروی تخت قرار داده شده و داخل یک کوره مقاومتی که به صورت متقارن اطراف قالب‌ها را احاطه می‌کند قرار داده می‌شود. همانطور که قبلاً اشاره شد، انتظار می‌رود که با افزایش اصطکاک بین قالب‌ها و قطعه کار، میزان افزایش طول میله کمتر شود.

مدل اصطکاک $\tau = mK$ (که در آن τ تنش اصطکاک و K استحکام برشی قطعه کار است و m در این مقاله ضریب اصطکاک چسبنده^۱ نامیده می‌شود) در تحلیل‌های اجزاء محدود مورد استفاده قرار گرفته است. برای بررسی این مسئله، فرآیند با در نظر گرفتن مدل اصطکاک چسبنده و به ازاء دو ضریب اصطکاک $m=0.05$ و $m=1$ با شرایط فوق توسط نرم‌افزار اجزاء محدود DEFORM شبیه‌سازی شده است. پس از بررسی حساسیت نتایج تحلیل به مش‌بندی، از حدود ۷۰۰۰ المان هرمی شکل برای مش‌بندی میله استفاده شده است. لازم به ذکر است که با توجه به تقارن‌های شکل هندسی میله و قالب، تنها یک چهارم از میله در تحلیل اجزاء محدود مدلسازی شده است. در این تحلیل از روش المان‌بندی مطلق^۲ استفاده شده است. در مش‌بندی مطلق می‌توان اندازه بزرگ‌ترین و یا کوچک‌ترین المان به همراه نسبت اندازه بزرگ‌ترین به کوچک‌ترین المان را تعیین نمود و نرم‌افزار با توجه به شکل هندسی قطعه تعداد المان‌ها را مشخص می‌سازد. این روش مش‌بندی دقت شبیه‌سازی را بالاتر می‌برد و از بالا رفتن زمان حل و زیاد بودن بی مورد تعداد المان‌ها در مراحل ابتدایی فرآیند که نیازی به آن نیست و تأثیری در نتایج نخواهد داشت نیز جلوگیری می‌نماید. همچنین با توجه به پیشرفت فرآیند و پیچیدگی تدریجی شکل قطعه کار، برای توصیف بهتر سطوح، مش‌بندی مجدد انجام شده و تعداد المان‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. اندازه کوچک‌ترین المان در این شبیه‌سازی ۰/۱۵ میلی‌متر تعریف شده است و نسبت بزرگ‌ترین المان به کوچک‌ترین المان نیز ۳ در نظر گرفته شده است. قطعه کارهای تغییر شکل یافته حاصل از این دو شبیه‌سازی در شکل ۷ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۷- تغییر شکل میله تیتانیومی به قطر ۵/۱۸mm و طول ۴۳mm در فرآیند فشار قالب باز (الف) به ازاء $m=1$ (ب) به ازاء $m=0.05$

¹ Friction factor

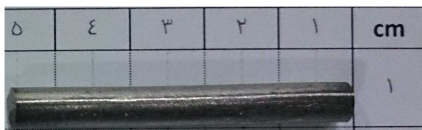
² absolute

ضخامت نمونه خوانده شده و نمودار تغییرات آن‌ها در برابر یکدیگر رسم می‌گردد.

۵- بررسی تجربی آزمون فشار قالب باز میله استوانه‌ای

برای تعیین ضریب اصطکاک کافی است پس از انجام آزمون تجربی فشار میله، طول و ضخامت اندازه‌گیری شده و با جایگذاری در روابط (۳) و (۴)، درصد تغییرات طول و همچنین درصد کاهش ضخامت نمونه محاسبه شود. سپس مقادیر محاسبه شده در منحنی کالیبراسیون رسم شده و بدین ترتیب با تطبیق نتایج آزمایشگاهی با منحنی‌های کالیبراسیون، ضریب اصطکاک تخمین زده شود.

در این تحقیق مقدار ضریب اصطکاک با استفاده از آزمون میله برای آلیاژ Ti-6Al-4V و ابعاد ۵/۱۸ : ۴۳ در دمای °C ۹۰۰ و سرعت حرکت کوبه $0.3 \frac{mm}{s}$ و با استفاده از روانکار شیشه با ضخامت ۰/۱mm تعیین شد. پیش‌فرم استفاده شده در شکل ۹ نمایش داده شده است. آزمون تجربی توسط دو قالب تخت از جنس Inconel 100 و در داخل یک کوره مقاومتی، که قالب‌ها را احاطه می‌نماید، به صورت هم‌دمای انجام می‌شود. در ابتدا قالب‌ها به داخل کوره قرار می‌گیرند تا به دمای °C ۹۰۰ برسند. سپس میله تیتانیومی که به محلول پودر شیشه در آب آغشته شده، بر روی قالب پائینی قرار داده می‌شود و به مدت زمان کافی باقی می‌ماند تا با قالب‌ها هم‌دمای شود. پس از آن، پرس هیدرولیک قالب بالایی را با سرعت $0.3 \frac{mm}{s}$ پائین می‌آورد. کوره دمای قالب‌ها و قطعه‌کار را در تمام طول آزمون ثابت نگه می‌دارد. پس از انجام آزمایش، طول قطعه‌ی نهایی، که تصویر آن در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، به وسیله سایه نگار و ضخامت آن به وسیله میکرومتر اندازه‌گیری شده و مقادیر مربوط به درصد کاهش ضخامت و درصد افزایش طول با استفاده از روابط (۳) و (۴) به دست آمد. با قرار دادن نتایج به دست آمده در نمودار کالیبراسیون آزمون فشار میله، مقدار ضریب اصطکاک چسبنده برابر ۰/۳۹ به دست می‌آید. نتایج حاصل در جدول ۱ و شکل ۸ قابل مشاهده هستند.



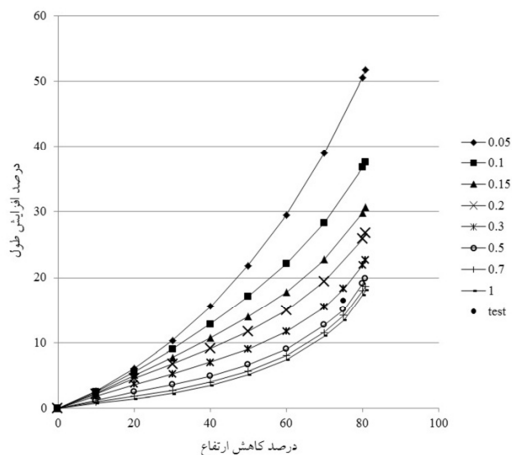
شکل ۹- تصویر میله آماده سازی شده جهت انجام آزمون فشار میله



شکل ۱۰- تصویر میله فشرده شده

ملاحظه می‌شود که همانطور که انتظار می‌رفت، مقدار ضریب اصطکاک با میزان تغییر شکل طولی میله رابطه معکوس دارد. اختلاف قابل توجه در طول دو قطعه‌کار تغییر شکل یافته در شکل ۷، نشان می‌دهد که حساسیت تغییر طول در فرآیند فشار قالب باز میله استوانه‌ای به مقدار ضریب اصطکاک زیاد است. این پدیده یک مزیت برای استفاده از این فرآیند به عنوان آزمون اصطکاک محسوب می‌شود. این حساسیت نشان می‌دهد که تغییرات طول میله را می‌توان به خوبی برای تخمین ضریب اصطکاک به کار برد. به این منظور، ابتدا باید منحنی‌های کالیبراسیون مربوط به این آزمون استخراج گردند.

منحنی‌های کالیبراسیون در آزمون فشار قالب باز میله، نمودارهایی هستند که درصد تغییرات طول میله را در برابر درصد کاهش ضخامت آن، به ازاء ضرایب اصطکاک مختلف، نمایش می‌دهند. شکل ۸ منحنی کالیبراسیون مربوط به آزمون فشار قالب باز میله‌ای با نسبت ۵/۱۸ : ۴۳ از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V در دمای °C ۹۰۰، به صورت هم‌دمای و با سرعت حرکت قالب برابر $0.3 \frac{mm}{s}$ و روانکار شیشه را نمایش می‌دهد.



شکل ۸- نمودار کالیبراسیون آزمون میله برای آلیاژ Ti-6Al-4V و ابعاد ۵/۱۸ : ۴۳ در دمای °C ۹۰۰ و سرعت حرکت کوبه $0.3 \frac{mm}{s}$ به همراه نتایج به دست آمده از آزمون عملی

برای به دست آوردن منحنی‌های کالیبراسیون از شبیه‌سازی المان محدود، با ترتیب زیر استفاده شده است:

۱- ابتدا شبیه‌سازی آزمون میله مطابق با شرایط آزمایشگاهی و به ازاء ضرایب اصطکاک مختلف صورت می‌پذیرد.

۲- با استفاده از نتایج به دست آمده به ازاء هر ضریب اصطکاک مشخص، در هر مقدار جابجایی فک پرس، طول و ضخامت نمونه‌ی فشرده شده خوانده شده و با استفاده از روابط (۳) و (۴)، درصد کاهش در ضخامت و همچنین درصد تغییر طول میله محاسبه می‌شود.

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

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

در این روابط H و L به ترتیب ضخامت لحظه‌ای و طول لحظه‌ای میله می‌باشند.

۳) با تکرار مرحله قبل برای مقادیر مختلف جابجایی کوبه تا انتهای فرآیند، درصدهای مختلف تغییرات طول و همچنین کاهش

جدول ۱- نتایج ابعادی آزمون فشار میله

درصد افزایش طول	طول نهایی قطعه (L)	درصد کاهش ضخامت	ضخامت نهایی (H)
۱۶/۴۷٪	۵۰/۰۸	۷۵/۱٪	۱/۲۹

در این آزمایش، ضخامت لایه روانکار بر روی میله در حدود ۰/۱ mm بوده است. پس از تطبیق دادن نتایج جدول ۱ با نمودار کالیبراسیون شکل ۸، مقدار ضریب اصطکاک چسبنده برابر ۰/۳۹ برآورد می‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نشان داده شد که می‌توان از فرآیند بسیار ساده فشار قالب باز میله استوانه‌ای به عنوان یک آزمون تخمین ضریب اصطکاک در فرآیند آهنگری استفاده نمود. پارامتر درصد افزایش طول میله به عنوان پارامتر اصلی در استخراج منحنی‌های کالیبراسیون این آزمون انتخاب شد. نتایج نشان می‌دهند که حساسیت این پارامتر نسبت به اندازه ضریب اصطکاک به اندازه کافی بالاست، به طوری که منحنی‌های به دست آمده به ازاء ضرایب اصطکاک مختلف به خوبی از یکدیگر تفکیک شده‌اند. انتخاب مقطع دایروی برای میله سبب شده است تا پدیده نامطلوب خمیدگی دیواره‌های جانبی، که در آزمون فشار حلقه متداول است، در این آزمون رخ ندهد و لذا امکان دستیابی به درصد سطح افزایی بالا در این آزمون فراهم می‌گردد. این ویژگی، موجب می‌گردد تا شرایط آزمون به شرایط فرآیند آهنگری واقعی نزدیک‌تر شود.

۷- فعالیت پژوهشی آتی

نویسندگان این مقاله قصد دارند تا در ادامه کار، نتایج روش آزمون ارزیابی اصطکاک فشار قالب باز میله استوانه‌ای را برای برآورد ضریب اصطکاک در یک فرآیند آهنگری تجربی و محاسبه نیروی مورد نیاز فرآیند استفاده نمایند.

۸- مراجع

- [1] Altan T., Oh S., Gegel H. L., *Metal Forming Fundamentals and Applications*, American Society for Metals, 1983.
- [2] Schrader T., Shirgaokar M., Altan T., A Critical Evaluation of the Double Cup extrusion Test for Selection of Cold Forging Lubricants, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 189, pp. 36-44, 2007.
- [3] Buchner B., Maderthoner G., Buchmayr B., Characterization of Different Lubricants Concerning the Friction Coefficient in Forging of AA2618, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 198, pp. 41-47, 2008.
- [4] بیگ محمدی م.، تحلیل عددی و تجربی اثر روانکار در فرآیند آهنگری دقیق هم‌دمای پره تیتانیومی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۴.
- [5] Zhang Q., Felder E., Bruschi S., Evaluation of Friction Condition in Cold Forging by Using T-shape Compression Test, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 209, pp. 5720-5729, 2009.
- [6] Hansen B. G., Bay N., Two New Methods for Testing Lubricants for Cold Forging, *J. Mech. Work. Technol.*, Vol. 13, pp. 189-204, 1986.
- [7] Doege E., Alasti M., Jürgensen Schmidt, An Innovative Procedure for the Numerical Identification of Accurate Friction and Heat Transfer Laws for Precision Forging Processes, *Proceedings of the Ninth ISPE International Conference on Concurrent Engineering: Research and Application-Advances in Concurrent Engineering*, pp. 199-207, 2002b.
- [8] Groche P., Kappes B., *Tribologie der Massivumformung-Modellprüfstände der Tribology, Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung*, vol. 13, Expert Verlag, Bermany, pp. 1-14, 2004.
- [9] Nagile G., Saiki H., Marumo L., A Trib-testing Method for High Performance Cold Forging Lubricants, *Wear*, Vol. 262, pp. 684-692, 2007.
- [10] Hodford W. F., Caddell R. M., *Metal Forming, Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, 4th ed., 2011.