



ارائه یک روش ارزیابی اصطکاک در ناحیه ورودی قالب اکستروژن بر اساس ترکیب آزمون‌های اکستروژن معکوس قالب باز و فشار حلقه

مهرداد خاندائی^{۱*}، سعید محمدی فیروزجائی^۲ و حمید عربی^۳

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

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

^۳ محقق ارشد، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۲/۲۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۰۴

چکیده

در این مقاله یک روش ترکیبی جدید، شامل آزمون‌های فشار حلقه و اکستروژن معکوس قالب باز، به منظور ارزیابی ضریب اصطکاک در فرآیند اکستروژن ارائه می‌گردد. در این روش، رفتار اصطکاکی در ناحیه سطح آزاد قالب و حفره قالب اکستروژن با هم متفاوت در نظر گرفته شده‌اند. از این رو، ضریب اصطکاک در سطح آزاد قالب با استفاده از آزمون فشار حلقه به دست می‌آید و در شبیه‌سازی‌های آزمون اکستروژن معکوس قالب باز در ناحیه سطح آزاد قالب اعمال می‌شود. سپس شبیه‌سازی‌های المان محدود آزمون اکستروژن معکوس قالب باز، با فرض معلوم بودن ضریب اصطکاک در سطح آزاد قالب، برای ضرایب اصطکاک مختلف در حفره قالب اکستروژن انجام می‌شوند تا منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک در این ناحیه به دست آیند. در نهایت با مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی با منحنی‌های کالیبراسیون، ضریب اصطکاک در حفره قالب به دست می‌آید. مقایسه ضرایب اصطکاک حاصل از سه آزمون نشان می‌دهد که ضریب اصطکاک در کانال اکستروژن قالب بیشتر از سطح آزاد آن است.

کلمات کلیدی: آزمون فشار حلقه؛ آزمون اکستروژن معکوس قالب باز؛ فرآیند اکستروژن؛ ضریب اصطکاک.

Presenting a New Method for Evaluating Friction Effects at Extrusion Die Entrance Based on Combination of the Open Die Backward Extrusion and Ring Compression Tests

M. Khandaei^{1,*}, S. Mohammadi Firuzjaei², H. Arabi³

¹ Assistant Professor, Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

² MSc Student, Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

³ Senior Researcher, Faculty of Material & Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Iran.

Abstract

In this article, a new combined approach including, the ring compression test and open die backward extrusion (ODBE) test, is presented to assess the friction coefficient in the extrusion process. It is assumed that the frictional behavior at the free surface of the die and the extrusion cavity is different. Firstly, the friction coefficient at the contact interface between the free surface of the die and the workpiece is obtained using the ring compression test. Then, to obtain the friction calibration curves at the contact interface between the workpiece and the extrusion channel, the finite element simulations of the ODBE test are performed for different friction coefficients in this area, and the friction coefficient is obtained comparing the experimental results and calibration curves. The comparison of the friction coefficients obtained from the three tests shows that the friction coefficient in the extrusion cavity is higher than that of the free surface.

Keywords: Open Die Backward Extrusion Test; Ring Compression Test; Extrusion Process; Friction Coefficient.

۱- مقدمه

اصطکاک بین قطعه‌کار و قالب یکی از عوامل مهم و مؤثر در طراحی فرآیندهای شکل‌دهی دقیق (نزدیک به ابعاد نهایی) فلزات است. اصطکاک می‌تواند نیروی فرآیند، عمر قالب، کیفیت سطح قطعه‌کار، تشکیل عیوب در قطعه‌کار، میزان اتلاف مواد و انرژی و نیز دقت ابعادی قطعه‌کار را تحت تأثیر قرار دهد [۱]. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی به منظور ارزیابی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات انجام شده است [۱].

تعیین دقیق شرایط اصطکاک در فرآیندهای اکستروژن دشوار می‌باشد، زیرا لغزش بین قالب و قطعه‌کار تحت فشارهای تماسی بسیار بالا رخ می‌دهد، انبساط سطح زیاد است و دما نیز بر فرآیند تأثیرگذار است [۲]. از این رو نیاز است تا روشی مناسب برای ارزیابی اصطکاک در فرآیند اکستروژن به کار گرفته شود که با شرایط فوق‌الذکر سازگاری داشته باشد. آزمون فشار حلقه یکی از پرکاربردترین روش‌های آزمون اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی حجمی فلزات است که ابتدا توسط کانوگی [۳] مطرح شد و سپس توسط میل [۴] به منظور ارزیابی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی توسعه یافت. در این روش، قطر داخلی حلقه در شرایط اصطکاک متفاوت تغییر می‌کند. از این رو به دلیل حساسیت تغییرات قطر داخلی حلقه به شرایط اصطکاک، نمودار کاهش قطر داخلی حلقه نسبت به کاهش ارتفاع آن به عنوان منحنی کالیبراسیون اصطکاک به حساب می‌آید [۲]. نتایج بعضی از پژوهش‌ها نشان داده که آزمون فشار حلقه قادر به شبیه‌سازی شرایطی از قبیل، توزیع فشار تماسی، شدت تغییر شکل و سیلان ماده نیست که در برخی از فرآیندهای شکل‌دهی از جمله اکستروژن وجود دارند. آزمون اکستروژن به منظور تعیین شرایط اصطکاک در ناحیه تماس قالب و قطعه‌کار مورد استفاده قرار گرفته است [۲]. شین و همکاران [۵] آزمون آهنگری شبیه به اکستروژن معکوس را برای ارزیابی اصطکاک پیشنهاد نمودند. در این آزمون از یک سنبه و ماتریس نامتقارن برای فشردن یک قطعه‌کار استوانه-ای استفاده می‌شود که در انتهای ماتریس قرار می‌گیرد. در این روش برای کل سطوح تماسی قالب با قطعه‌کار یک ضریب اصطکاک یکسان در نظر گرفته می‌شود. باسکاوژن و همکاران [۶] آزمون اکستروژن معکوس دو طرفه را به منظور

ارزیابی اصطکاک ارائه کردند. در این آزمون یک نمونه استوانه‌ای شکل درون یک قالب با قطر برابر قرار می‌گیرد. سنبه پایین ثابت است و سنبه بالا با سرعت ثابت به طرف پائین حرکت می‌کند. ماده قطعه‌کار در فضای بین سنبه‌های بالا و پایین و قالب سیلان می‌کند و دو فنجان با ارتفاع متفاوت و جهت رو به بالا و پایین تشکیل می‌شوند. سرعت‌های نسبی بین سنبه، قطعه‌کار و محفظه قالب منجر به ایجاد شرایط اصطکاک متفاوت می‌شود؛ در نتیجه ارتفاع یا طول قسمت‌های اکستروژن شده به شدت به اصطکاک وابسته است. نسبت ارتفاع فنجان بالا به فنجان پایین مشخصه حساسیت اصطکاک در این آزمون است.

ژانگ و همکاران [۷] آزمون فشار T شکل را به منظور ارزیابی اصطکاک در فرآیند شکل‌دهی سرد ارائه کردند. قالب این فرآیند از یک سنبه تخت در بالا و یک ماتریس V شکل تشکیل شده است. قطعه‌کار استوانه‌ای روی دهانه‌ی ماتریس V شکل قرار می‌گیرد و در اثر فشار سنبه به داخل شیار V جریان می‌یابد. به دلیل شباهت سطح مقطع نهایی قطعه‌کار به حرف T، به این فرآیند آزمون فشار T شکل اطلاق شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داده‌اند که منحنی جابجایی-نیرو و طول قسمت اکستروژن شده تحت تأثیر اصطکاک قرار دارند. نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها نشان داده است که با کاهش شعاع گوشه قالب و زاویه شیار V، حساسیت این روش به تغییرات اصطکاک افزایش می‌یابد.

وانگ و همکاران [۷] آزمون اکستروژن دو طرفه را به منظور ارزیابی اصطکاک در کانال یاتاقانی در فرآیند اکستروژن توسعه دادند. در این آزمون، یک بیلت آلومینیومی بین دو قالب اکستروژن با طول‌های یاتاقانی مختلف فشرده شده و دو فرآیند اکستروژن معکوس به طور همزمان انجام می‌شود. در این فرآیند به دلیل اصطکاک متفاوت در دو قالب، طول قسمت‌های اکستروژن شده به شرایط اصطکاک حساس است؛ لذا بر همین اساس می‌توان اصطکاک بین قطعه‌کار اکستروژن شده و کانال یاتاقانی قالب را با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود و آزمایش‌های تجربی محاسبه کرد.

کانگ و همکاران [۸] روشی را بر پایه اکستروژن معکوس به منظور ارزیابی اصطکاک ارائه کردند که در آن یک سنبه استوانه‌ای توخالی قطعه‌کار را تحت فشار قرار می‌دهد و قطعه‌کار در تماس با سطوح داخلی و خارجی سنبه، اکستروژن

می‌شود. مشاهده شد که طول قسمت‌های اکستروژن شده داخلی و بخش جریان‌یافته بیرونی تحت شرایط اصطکاکی مختلف تغییر می‌کند. منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاکی در این روش با ترسیم طول‌های این دو قسمت به دست آمده‌اند. آزمون اکستروژن معکوس قالب باز توسط سوفولو [۹]، به عنوان روشی جایگزین برای ارزیابی اصطکاک فشار حلقه ارائه شد. در این روش، بیلت استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای بین دو قالب صلب فشرده می‌شود که در بالا و پایین آن قرار دارند. در این روش به جای ایجاد حفره در قطعه‌کار (مانند قالب تست فشار)، حفره در قالب بالا ایجاد شده است تا در حین انجام فرآیند، بخشی از ماده قطعه‌کار در آن جریان یابد. با حرکت قالب بالا به سمت پایین، بخشی از ماده قطعه‌کار وارد حفره شده و بخشی از آن دچار تغییر شکل محیطی می‌شود. در این فرآیند منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک با رسم منحنی طول اکستروژن شده قطعه‌کار در مقابل جابجایی سنبه بالا به دست آمده‌اند. خاندائی و همکاران [۱۰] نیز یک آزمون ارزیابی اصطکاک را مبتنی بر فشار قالب باز میله استوانه‌ای برای فرآیند آهنگری ارائه نمودند. این آزمون برای تعیین ضریب اصطکاک در بخش‌هایی از پیش‌فرم آهنگری که حالت تنش نزدیک به شرایط کرنش صفحه‌ای است، قابل استفاده است.

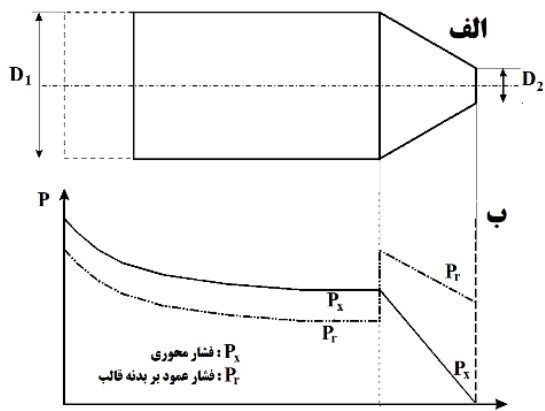
در آزمون‌های ارزیابی اصطکاک، تعداد زیادی از شرایط تماسی، از قبیل دما، فشار تماسی، فاصله لغزش، سرعت لغزش و مقدار اکسیداسیون باید به دقت در نظر گرفته شوند، زیرا این عوامل تاثیر قابل توجهی بر ضریب اصطکاک می‌گذارند. به طور کلی، نمی‌توان تنها با اتکا به یک روش ارزیابی اصطکاک تمامی شرایط تماسی فرآیند را شبیه‌سازی کرد، زیرا یک روش ارزیابی اصطکاک تنها قادر به شبیه‌سازی یک یا چند شرایط تماسی خاص است؛ بنابراین برای تعیین شرایط اصطکاکی در فرآیندهای اکستروژن، باید از ترکیبی از روش‌های آزمون مختلف استفاده شود [۱۱]. مدل لایه سطحی ارائه شده در مرجع [۱۲] بیان می‌کند که اگرچه نیروی فرآیند تحت تأثیر اصطکاک قرار دارد، ولی هر تغییر در نیروی فرآیند تنها ناشی از تغییرات اصطکاک نیست. از این رو، تعیین ضریب اصطکاک تا حد امکان نباید به نیروی فرآیند بستگی داشته باشد؛ بنابراین، آزمون‌های اصطکاکی مانند آزمون فشار T شکل که در تعیین ضریب اصطکاک از

نمودارهای نیروی فرآیند استفاده می‌کنند، آزمون‌های ایده‌آلی نیستند. ژنگ و همکاران [۱۳] با روش تجربی به بررسی قوانین حاکم بر اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی فلزات با حجم روانکار بسیار کم پرداخته‌اند. وانگ و همکاران [۱۴]، رفتار اصطکاک مواد کارسخت شونده را بدون وجود روانکار با روش‌های عددی و تجربی تحلیل نمودند. در سال‌های اخیر بررسی اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی مورد علاقه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله، سشچاریولو و همکاران [۱۵] به مرور مهمترین تحقیقاتی که از سال ۱۹۹۳ تا ۲۰۰۶ در خصوص تدوین مدل و یا اندازه‌گیری اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی انجام شده پرداخته‌اند. تریبیچینسکی و همکاران [۱۶] نیز به تفصیل، تحقیقات انجام شده در زمینه توسعه رویکردهای جدید مدلسازی و اندازه‌گیری اصطکاک در فرآیندهای سنتی و مرحله‌ای شکل‌دهی ورق‌های فلزی انجام شده پرداخته‌اند. ۲۰۱۸ مرور نموده‌اند. سلیمان و همکاران [۱۷] با تحلیل عددی و تجربی، اثر یک پوشش خاص قالب را بر میزان اصطکاک و سایش در فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی، با روانکار و بدون روانکار، بررسی کرده‌اند. سیگوانت و همکاران [۱۸]، اثر دو عامل زبری سطح و نرخ کرنش را در اصطکاک فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی و نتایج تحلیل‌های عددی مطالعه کرده‌اند. زو و همکاران [۱۹] پدیده‌های مؤثر در اصطکاک در فرآیند میکرو نوردکاری ورق‌های فلزی را بررسی کرده‌اند. در کار تحقیقاتی شیسده و همکاران [۲۰] نیز رویکرد ترکیبی را که حاصل در نظر گرفتن همزمان اثرات هیدرودینامیکی روانکار و درگیری مستقیم برجستگی‌های مربوط به زبری سطوح است، در مدلسازی اصطکاک فرآیندهای شکل‌دهی ورق‌های فلزی به کار برده‌اند. وحدتی و همکاران [۲۱] نیز فرآیند شکل‌دهی تدریجی تک نقطه‌ای ورق‌های آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیده‌اند که در این فرآیند روانکار بیشترین اثر را در کاهش نیروی عمودی شکل‌دهی دارد و چنانچه فرآیند بدون وجود روانکار انجام شود، اعمال ارتعاشات اولتراسونیک بیشترین تأثیر را در کاهش نیروی عمودی شکل‌دهی دارد.

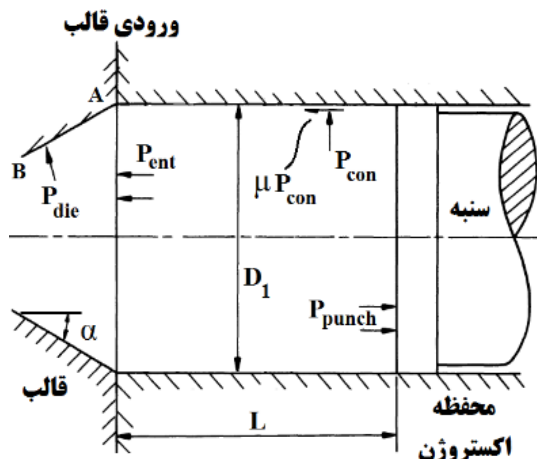
در آزمون اکستروژن معکوس قالب باز فرض شده است که ضریب اصطکاک در سطح تماس بین کف قالب و

در روابط فوق \bar{Y} میانگین تنش جریانی ماده (میانگین تنش-های جریانی قبل از ورود به کانال و بعد خروج از کانال اکستروژن)، α نصف زاویه قالب و μ ضریب اصطکاک است. نسبت فشارهای عمود بر قالب در نقاط A و B و همچنین نسبت فشارهای عمود بر قالب و عمود بر سطح محفظه در نقطه A به ازا $D_1/D_2 = 1.2$ و $\mu = 0.1$ و زاویه α بین ۵ تا ۵۰ درجه در شکل ۳ نمایش داده شده است.

می‌دانیم که اگر زاویه α به 90° نزدیک شود، در مجاورت حفره خروجی قالب، نواحی مرده^۱ تشکیل می‌شوند. تشکیل



شکل ۱- الف) طرحواره‌ای از یک فرآیند اکستروژن و ب) نمودار توزیع فشار محوری و فشار وارد بر دیواره قالب [۲۲]



شکل ۲- طرحواره فرآیند اکستروژن [۲۳]

قطعه‌کار، با ضریب اصطکاک در سطح تماس بین قالب و قطعه‌کار در قسمت کانال اکستروژن با هم برابر می‌باشند. در این پژوهش یک روش ترکیبی جدید به منظور ارزیابی اصطکاک در فرآیند اکستروژن پیشنهاد شده است که در آن ضریب اصطکاک در قسمت کف قالب با ضریب اصطکاک در قسمت کانال اکستروژن متفاوت در نظر گرفته می‌شود. در این روش، بر خلاف کلیه پژوهش‌های پیشین، تغییر ناگهانی اصطکاک در ورودی کانال اکستروژن در نظر گرفته می‌شود. در این روش با تلفیق آزمون‌های فشار حلقه و آزمون اکستروژن معکوس قالب باز، ضریب اصطکاک در سطح تماس بین قالب و قطعه‌کار در کانال اکستروژن به دست می‌آید.

۲- توزیع فشار در قالب اکستروژن

ضریب اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی وابستگی قابل توجهی به فشار عمود بر سطح، سرعت جریان مواد نسبت به قالب، شکل هندسی و ... دارد [۲]. توزیع فشار عمود بر سطح قالب اکستروژن قبلاً توسط برخی از محققان بررسی شده است. شکل ۱ طرحواره‌ای از یک فرآیند اکستروژن را نشان می‌دهد که در آن میله‌ای از قطر D_1 به قطر D_2 تبدیل می‌شود.

در نمودار شکل ۱ (ب)، p_x فشار محوری و p_r فشار شعاعی (عمود بر دیواره‌های قالب) است. ملاحظه می‌شود که در ابتدای ورودی کانال قالب، فشار p_r ناگهان افزایش می‌یابد. در مرجع [۲۳] روابط زیر برای محاسبه فشار مورد نیاز در ورودی قالب (P_{ent})، توزیع فشار عمود بر سطح قالب در فاصله نقاط A تا B (مطابق شکل ۲) و توزیع فشار عمود بر دیواره محفظه (P_{con}) ارائه شده است.

$$P_{ent}/\bar{Y} = -[\{\beta/(\beta - 1)\} \times \{(D_1/D_2)^{2(\beta-1)} - 1\} + (2\alpha/3)] \quad (1)$$

$$\beta = (1 + \mu \cot \alpha)/(1 - \mu \tan \alpha)$$

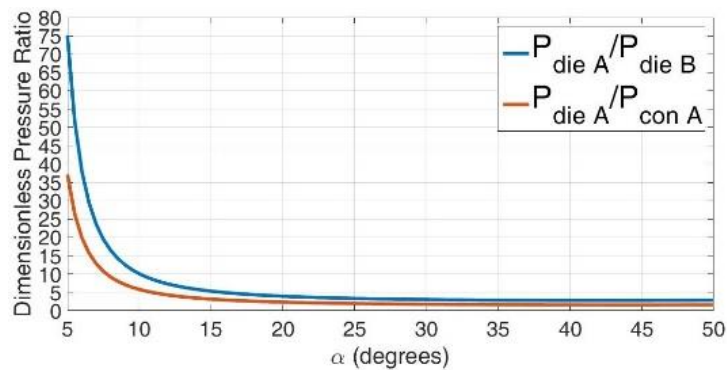
$$P_{die}/\bar{Y} = (\phi/\delta)\{(\delta + 1)(D_1/D_2)^{2\delta} - 1\} \quad (2)$$

$$\delta = (\cot \alpha + \tan \alpha)/(1 - \mu \tan \alpha)$$

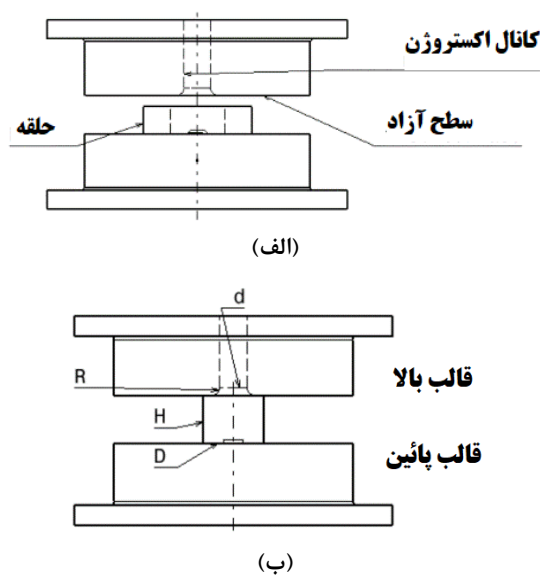
$$\phi = 1/(1 - \mu \tan \alpha)$$

$$P_{con}/\bar{Y} = 1 + \{\beta/(\beta - 1)\} \times \{(D_1/D_2)^{2(\beta-1)} - 1\} + (2\alpha/3) \quad (3)$$

¹ Dead Metal Zone



شکل ۳- نسبت فشارهای عمود بر سطح قالب اکستروژن



شکل ۴- طرحواره روش ترکیبی آزمون فشار حلقه و آزمون اکستروژن معکوس قالب باز: (الف) آزمون فشار حلقه؛ و (ب) آزمون اکستروژن معکوس قالب باز ($D=15\text{mm}$, $H=12\text{mm}$, $R=2\text{mm}$, $d=7\text{mm}$)

فرض شده است که رفتار اصطکاکی در سطح تماس قطعه کار و قالب اکستروژن معکوس در نواحی سطح آزاد قالب و کانال اکستروژن با هم متفاوت هستند.

در فرآیند اکستروژن معکوس قالب باز، بخشی از تغییر شکل که در قسمت کف قالب رخ می‌دهد، در راستای شعاعی است. از این رو با توجه به شکل ۵، ابتدا با استفاده از آزمون فشار حلقه، ضریب اصطکاک در سطح تماس قطعه کار با سطح آزاد قالب اندازه‌گیری می‌شود. سپس این ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی‌های آزمون اکستروژن معکوس قالب باز، به عنوان

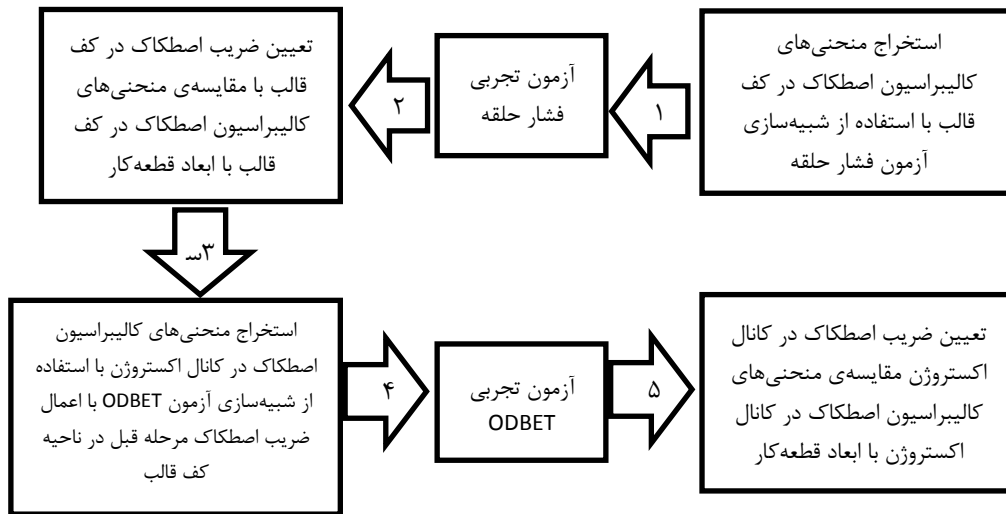
نواحی مرده در روابط (۱) تا (۳) در نظر گرفته نشده‌اند. در مرجع [۲۴] توزیع فشار عمود بر سطح قالب در ناحیه مرده به ازاء $\alpha = 90^\circ$ با استفاده از آزمون تجربی به دست آمده است.

نمودار شکل ۳ نشان می‌دهد که فشار عمود بر سطح قالب در نقطه A (در شکل ۲) همواره از فشار در سطح محفظه و فشار در نقطه B بیشتر است. نمودار شکل ۵ نیز نمونه‌ای از توزیع فشار غیر یکنواخت در مجاورت حفره قالب، با وجود نواحی مرده را نشان می‌دهد. ضمناً می‌دانیم که در خروجی قالب اکستروژن با زاویه قالب نزدیک به $\alpha = 90^\circ$ تغییرات شدیدی در جهت و سرعت جریان مواد رخ می‌دهد. از این رو می‌توان انتظار داشت که ضریب اصطکاک در این نواحی توزیع غیر یکنواخت داشته باشد و مخصوصاً در ناحیه حفره خروجی قالب بیشتر از همه نواحی دیگر باشد.

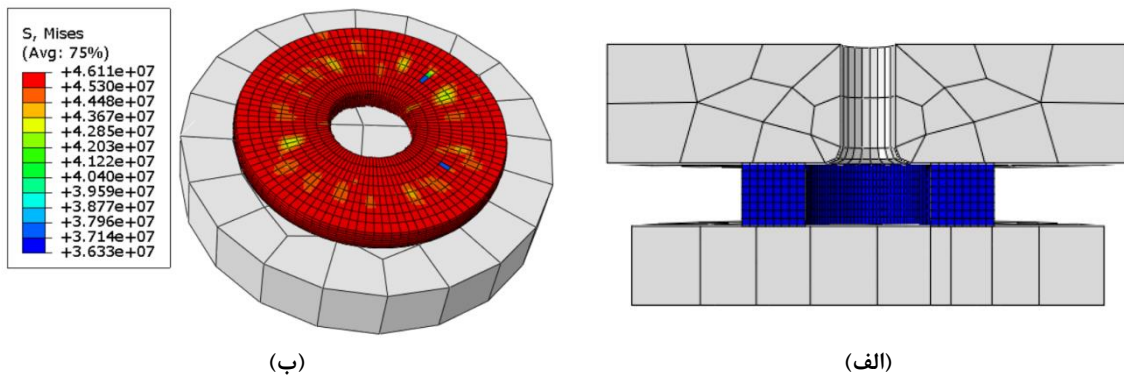
۳- روش پیشنهادی برای ارزیابی اصطکاک در فرآیند اکستروژن

در این پژوهش یک روش ترکیبی جدید، که طرحواره آن در شکل ۴ نشان داده شده، به منظور ارزیابی اصطکاک در ورودی حفره قالب اکستروژن پیشنهاد شده است. در این روش که روند آن در شکل ۵ مشاهده می‌شود با استفاده از تلفیق آزمون‌های فشار حلقه و اکستروژن معکوس قالب باز (ODBET^۱)، ضریب اصطکاک در سطح تماس بین قالب و قطعه کار در ناحیه ورودی کانال اکستروژن به دست می‌آید.

^۱ Open Die Backward Extrusion Test



شکل ۵- نمودار روند فرآیند ترکیبی ارائه شده به منظور اندازه‌گیری اصطکاک در کانال اکستروژن



شکل ۶- آزمون فشار حلقه؛ الف) مدل وارد شده در نرم افزار آباکوس و ب) تغییر شکل حلقه در ضریب اصطکاک ۰/۱ در پیشروی ۶۰ درصد قالب بالا

کوچک در قطعه‌کار به صورت مادگی، موقعیت‌دهی به قطعه‌کار راحت‌تر انجام می‌شود.

۳- آزمون فشار حلقه

شبیه‌سازی آزمون فشار حلقه

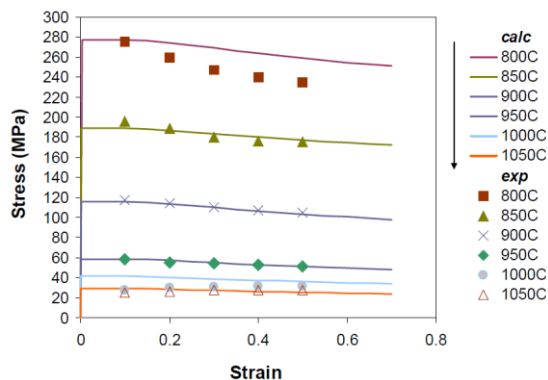
شکل ۴ الف) طرحواره آزمون فشار حلقه را نشان می‌دهد. در این آزمون حلقه بین قالب بالا و پایین قرار می‌گیرد و قالب بالا با سرعت ثابت به سمت پایین حرکت می‌کند و قالب پایین ثابت است. در اثر جابجایی قالب بالا، حلقه فشرده می‌شود و با توجه به شرایط اصطکاکی در سطوح تماسی دچار تغییر شکل می‌شود. با ترسیم منحنی‌های درصد تغییر قطر داخلی حلقه در مقابل درصد کاهش ارتفاع قطعه‌کار،

ضریب اصطکاک در سطح تماس قطعه‌کار با سطح آزاد قالب، و به عنوان یک ضریب ثابت معلوم وارد می‌شود. پس از آن شبیه‌سازی‌های آزمون اکستروژن معکوس قالب باز با ضرایب اصطکاک مختلف در ناحیه‌ی کانال اکستروژن انجام می‌شوند تا منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک در این ناحیه به دست آیند؛ در نتیجه منحنی‌های کالیبراسیون مذکور توصیف کننده رفتار اصطکاک در ورودی کانال اکستروژن بوده و اثر تغییر شکل شعاعی قطعه‌کار جدا می‌شود که در آزمون اکستروژن معکوس قالب باز با آن مواجه هستیم.

در این پژوهش با توجه به اهمیت هم‌محوری و متقارن بودن موقعیت قطعه‌کار نسبت به کانال قالب، قیدی به صورت پله در مرکز قالب پایین تعبیه شده است. با ایجاد یک حفره

جدول ۱- خواص مکانیکی و حرارتی قالب و قطعه [۲۶]

فولاد H13	Ti-6Al-4 V	
۲۱۰	۱۱۳/۴	مدول الاستیک (گیگاپاسکال)
۰/۳	۰/۳۴۲	ضریب پواسون
۴۶۰	۴۲۰	گرمای ویژه (J/kg.°C)
۲۴/۴	۲۰/۵۸	ضریب انتقال حرارتی (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
۷۸۰۰	۴۴۳۰	چگالی (kg/m ³)
۲/۱۸۸	۲/۱۸۸	ضریب انتقال حرارت بین قالب و قطعه کار (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)



شکل ۷- منحنی تنش کرنش آلیاژ Ti-6Al-4V [۲۵]

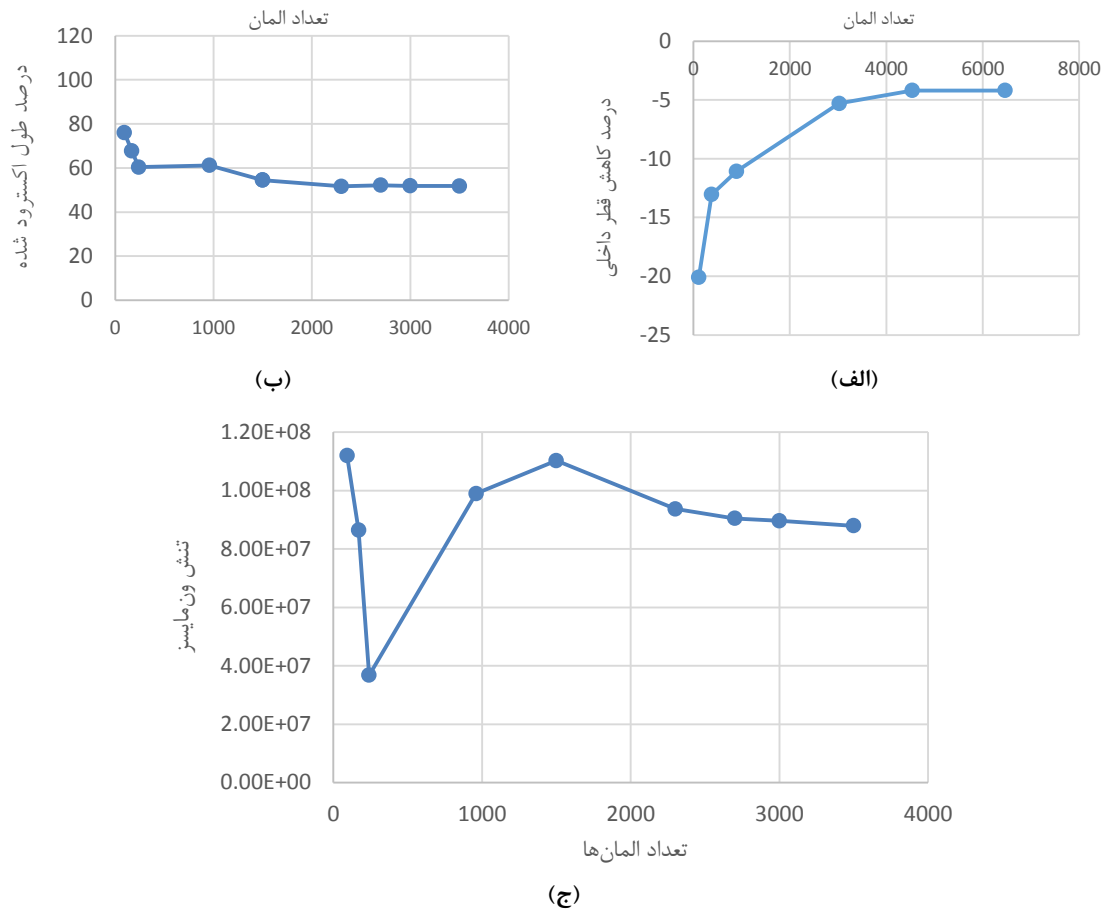
قالب و قطعه کار در نظر گرفته شده است. شبیه‌سازی‌ها در ضرایب اصطکاک ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۵ و تا ۶۰ درصد پیشروی قالب بالا انجام شدند و منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک برای آزمون فشار حلقه به دست آمدند.

شکل ۹ منحنی‌های کالیبراسیون را برای ضرایب اصطکاک مختلف در ناحیه تماس بین سطح تخت قالب با قطعه کار نشان می‌دهد.

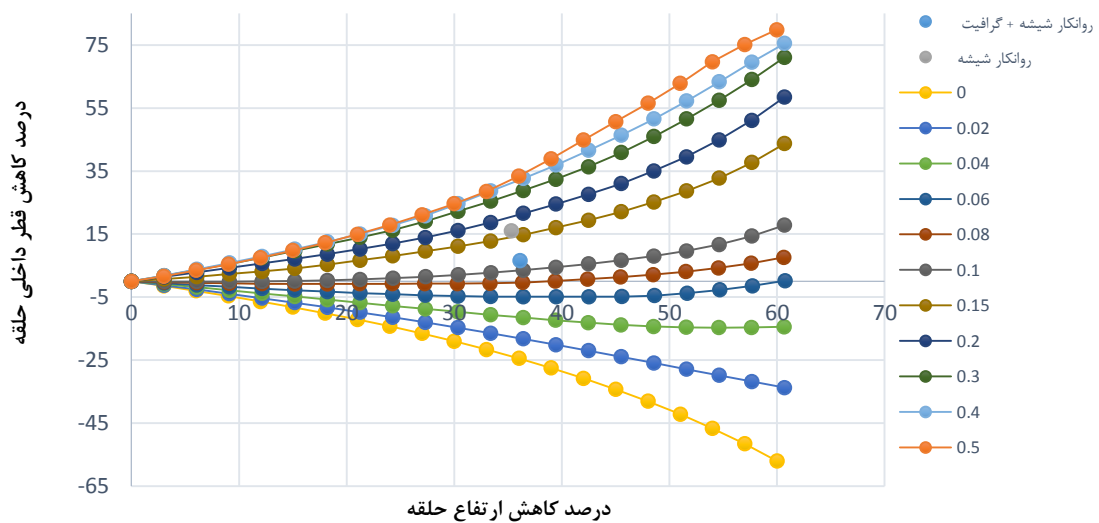
آزمون تجربی فشار حلقه

آزمون تجربی فشار حلقه با استفاده از دستگاه پرس با تناژ ۱۰۰ تن انجام شده است. پیش از انجام آزمون‌های تجربی، روانکاری حلقه‌ها با استفاده از روانکار شیشه با نام تجاری Deltaglaze™ 349 ساخت شرکت هنکل انجام شده است. این روانکار به طور ویژه به منظور روانکاری و پوشش‌دهی تیتانیوم در طول فرآیندهای آهنگری و اکستروژن در دماهای

منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک برای این آزمون به دست می‌آیند. برای این منظور، ابتدا شبیه‌سازی‌های آزمون فشار حلقه در ضرایب اصطکاک مختلف در نرم‌افزار آباکوس انجام شدند تا منحنی‌های کالیبراسیون ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین سطح تخت قالب با قطعه کار به دست آیند. سپس آزمون تجربی فشار حلقه انجام شده و با مقایسه ابعاد قطعه کار تغییرشکل یافته در آزمون تجربی فشار حلقه با منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک، ضریب اصطکاک در ناحیه تماسی بین سطح تخت قالب و قطعه کار به دست می‌آید. در این روش چیدمان آزمون فشار حلقه با چیدمان آزمون اکستروژن معکوس یکسان است، از این رو در تعیین نسبت ابعادی و ابعاد دقیق حلقه محدودیت وجود دارد؛ زیرا ممکن است که در ضرایب اصطکاک بالا، قطر حلقه در اثر پیشروی قالب بالا دچار کاهش شدید شود و با ورود به کانال اکستروژن اعتبار خود را از دست بدهد؛ همچنین این امکان وجود دارد که در ضرایب اصطکاک پایین، قطر بیرونی حلقه بیشتر از قطر قالب شده و تماس بخشی از حلقه با سطح قالب از بین برود. به منظور پیشگیری از موارد بالا، آزمون فشار حلقه با ابعاد هندسی مختلف انجام شده و در نهایت حلقه‌ها با ابعاد ۲۹ × ۱۴/۵ × ۷/۲۵ میلی‌متر و با نسبت ابعادی استاندارد (۴ : ۲ : ۱) انتخاب شدند که به ترتیب نشان‌دهنده قطر بیرونی، قطر داخلی و ارتفاع حلقه هستند. شکل ۶ مدل اجزاء محدود آزمون فشار حلقه را قبل و پس از شکل‌دهی با ضریب اصطکاک ۰/۱ نشان می‌دهد. قطعه کار از جنس Ti-6Al-4V انتخاب شده است. شبیه‌سازی‌ها در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد که در محدوده دمای شکل‌دهی داغ آلیاژ مذکور، یعنی در حدود ۰/۶ دمای ذوب مطلق آلیاژ شده‌اند. منحنی تنش کرنش آلیاژ Ti-6Al-4V در محدوده دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد در شکل ۷ نشان داده شده که از مرجع [۲۵] به دست آمده است. پس از بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی از اندازه المان که نمودار آن در شکل ۸ (الف) نشان داده شده، از ۶۴۶۴ المان از نوع C3D8RT برای شبکه‌بندی قطعه کار استفاده شد. قالب‌ها از جنس فولاد H13 انتخاب شده‌اند و دمای قالب برابر ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شده است. جدول ۱ خواص مکانیکی و حرارتی قالب و قطعه کار را نشان می‌دهد. انتقال حرارت بین محیط و



شکل ۸- بررسی استقلال نتایج شبیه‌سازی از اندازه‌ی المان‌ها: الف) آزمون فشار حلقه، ب) آزمون اکستروژن معکوس قالب باز و ج) آزمون اکستروژن معکوس قالب باز با استفاده از معیار تنش ون مایسز در ناحیه کانال اکستروژن.



شکل ۹- منحنی‌های کالیبراسیون ضریب اصطکاک در سطح تماس قسمت کف قالب و قطعه کار با استفاده از آزمون فشار حلقه

شده است. پس از بررسی استقلال نتایج از اندازه‌ی المان‌ها، ۳۴۰۰ المان مربعی از نوع CAX4RT برای شبکه‌بندی قطعه‌کار اولیه استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها تا زمانی ادامه یافته‌اند که میزان پیشروی قالب بالا به ۶۰ درصد ارتفاع اولیه قطعه‌کار برسد. شکل‌های ۱۱ (الف) و (ب) به ترتیب منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک را برای شبیه‌سازی آزمون اکستروژن معکوس قالب باز در دو شرایط روانکاری قالب با مولیکوت و بدون روانکاری قالب نشان می‌دهند. شبیه‌سازی برای این دو شرایط به ترتیب در ضرایب اصطکاک ۰/۱۱ و ۰/۱۵ در ناحیه مسطح قالب انجام شده است. به منظور مقایسه روش ترکیبی ODBET و آزمون فشار حلقه با روش ODBET به تنهایی، شبیه‌سازی‌های ODBET با ضرایب اصطکاک مختلف انجام شد و ضریب اصطکاک با استفاده از این آزمون هم به دست آمد. شکل ۱۲ منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک را در آزمون ODBET (که در آن ضریب اصطکاک در کف و کانال قالب یکسان فرض شده) نشان می‌دهد.

آزمون تجربی اکستروژن معکوس قالب باز

آزمون اکستروژن معکوس قالب باز در شرایط مشابه با آزمون فشار حلقه انجام شده است. روانکاری قطعه کارهای استوانه‌ای با استفاده از روانکار شیشه انجام شده و قطعه‌کار به مدت ۶ دقیقه در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. با اندازه‌گیری تغییرات ابعادی قطعه‌کار تغییر شکل یافته و مقایسه آن با منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک که از شبیه‌سازی‌ها به دست آمده‌اند، ضریب اصطکاک در این آزمون قابل اندازه‌گیری است.

شکل ۱۳ (الف) چیدمان آزمون تجربی و شکل ۱۳ (ب) چیدمان آزمون فشار حلقه را نشان می‌دهد.

۵- نتایج و بحث

شکل ۱۴ (الف) و (ب)، به ترتیب حلقه‌ها را پس از تغییر شکل در شرایط روانکاری قالب با استفاده از روانکار مولیکوت و بدون استفاده از روانکار نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در شرایط روانکاری قالب با استفاده از مولیکوت، قطر داخلی حلقه بیشتر از قطر داخلی حلقه در شرایط بدون روانکاری قالب است، یعنی ضریب اصطکاک در این شرایط پایین‌تر است. جدول ۲ نتایج اندازه‌گیری‌های ابعاد حلقه را پس از تغییر شکل در آزمون فشار حلقه نشان می‌دهد.

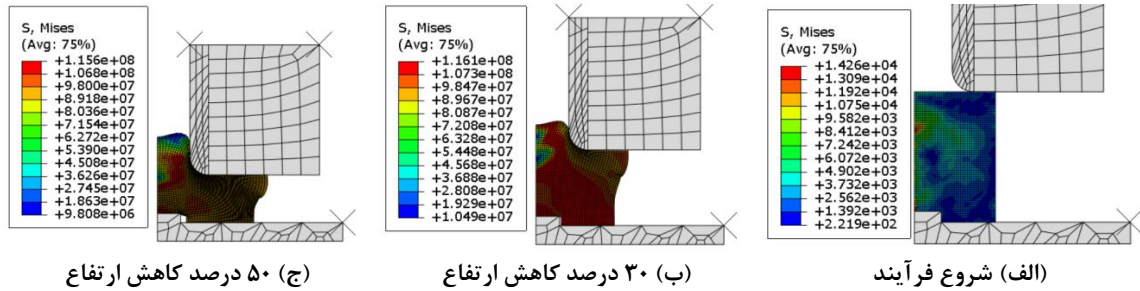
۸۱۶ - ۹۸۲ درجه سانتی‌گراد به کار می‌رود. همه قطعات کار با روانکار شیشه با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر روانکاری شدند. آزمون‌های تجربی در شرایط روانکاری قالب با استفاده از روانکار مولیکوت و بدون روانکاری انجام شده‌اند تا اثر روانکاری قالب هم روی اندازه ضریب اصطکاک بررسی گردد. پیش از انجام آزمون تجربی، هر قطعه درون کوره حرارتی در دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته و به مدت ۶ دقیقه در این دما نگهداری شده تا توزیع دمای آن یکنواخت گردد. در این فرآیند هیچ لایه اکسیدی روی جنس ماده مشاهده نشد. قالب نیز با استفاده از مشعل حرارتی تا دمای ۳۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد گرم شد.

۴- آزمون اکستروژن معکوس قالب باز

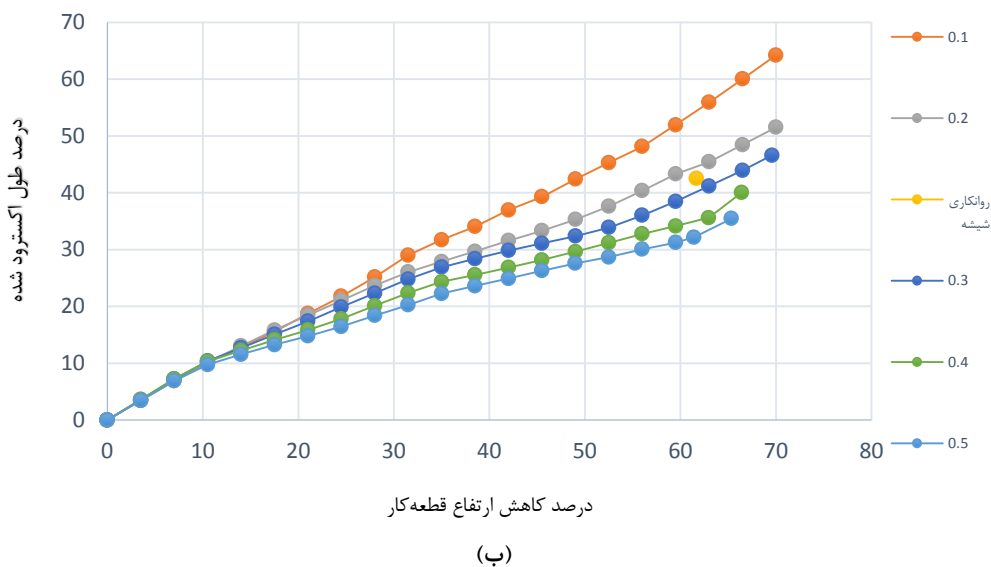
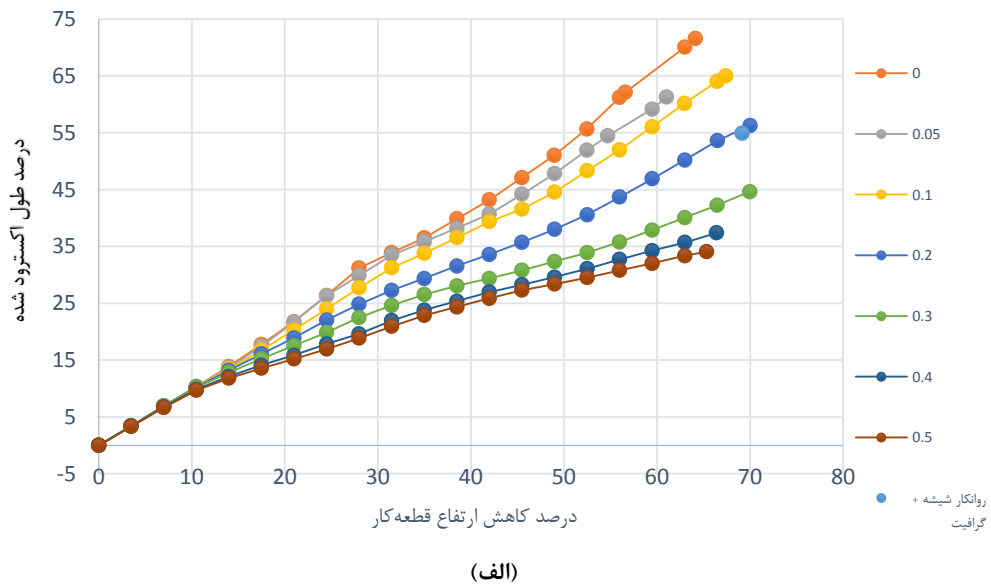
شبیه‌سازی آزمون اکستروژن معکوس قالب باز

شکل ۴ (ب) طرحواره فرآیند آزمون اکستروژن معکوس قالب باز (ODBET) را نشان می‌دهد. شبیه‌سازی‌ها به صورت متقارن محوری انجام شده‌اند. در هر شبیه‌سازی قطعه‌کار استوانه‌ای از جنس آلیاژ Ti-6Al-4V بین دو قالب صلب تحت فشار قرار می‌گیرد. قالب بالا با سرعت 0.1 m/s به سمت پایین حرکت کرده و بخشی از قطعه‌کار در اثر فشار دچار تغییر شکل محیطی شده و بخش دیگر از آن وارد کانال اکستروژن می‌گردد.

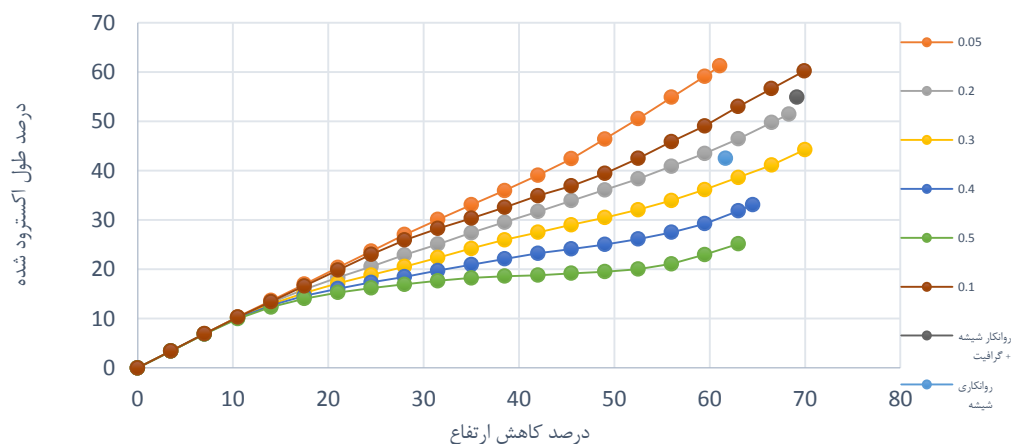
شکل ۱۰ روند پیشرفت آزمون ODBET را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، در شبیه‌سازی‌های آزمون ODBET فرض شده است که به دلیل تفاوت ماهیت تغییر شکل در ناحیه مسطح قالب و ناحیه کانال اکستروژن، اصطکاک در این دو ناحیه با هم متفاوت است. به همین دلیل، قالب به دو قسمت پارتیشن‌بندی شده تا امکان اعمال ضریب اصطکاک‌های مختلف در ناحیه مسطح قالب و ناحیه کانال اکستروژن وجود داشته باشد. دو سری شبیه‌سازی انجام شده است. در هر سری، ضریب اصطکاک در ناحیه مسطح قالب به صورت ثابت تعریف شده که از آزمون فشار حلقه برای این ناحیه به دست آمده است. هدف از شبیه‌سازی‌ها، به دست آوردن منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک در ناحیه کانال اکستروژن بوده است. به همین دلیل، هر مجموعه شبیه‌سازی با ضرایب اصطکاک ۰، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ در ناحیه کانال اکستروژن انجام



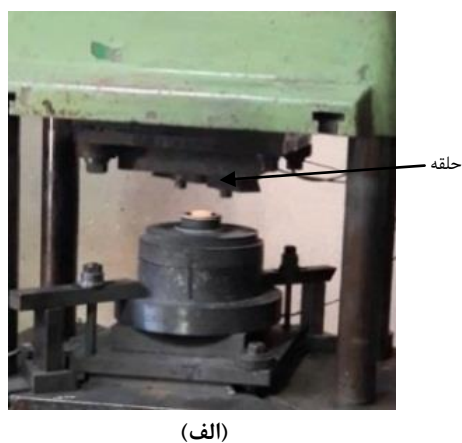
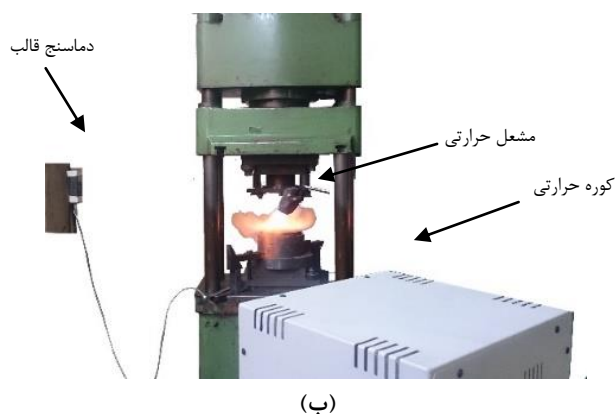
شکل ۱۰- مدل متقارن محوری استفاده شده در شبیه‌سازی آزمون اکستروژن معکوس قالب باز در نرم افزار آباکوس



شکل ۱۱- منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک در ناحیه‌ی کانال اکستروژن در آزمون اکستروژن معکوس قالب باز در شرایط روانکاری قالب با مولیکوت و بدون روانکاری قالب



شکل ۱۲- منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک در آزمون ODBET به تنهایی



شکل ۱۳- چیدمان و تجهیزات مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

جدول ۲- اندازه‌های تجربی قطر داخلی حلقه در شرایط روانکاری قالب با مولیکوت و بدون روانکاری قالب

شرایط روانکاری	کاهش ارتفاع قطعه کار (mm)	درصد کاهش ارتفاع	قطر داخلی ثانویه حلقه (mm)	درصد کاهش قطر داخلی حلقه	ضریب اصطکاک
روانکاری قالب با مولیکوت	۲/۶۲	۳۶/۱۳	۱۳/۵۵	۶/۸۲	۰/۱۱
بدون روانکاری قالب	۲/۵۶	۳۵/۳۱	۱۲/۲۵	۱۶/۰۵	۰/۱۵

فشار حلقه که در شبیه‌سازی‌ها به دست آمده است، ضریب اصطکاک در شرایط روانکاری قالب با مولیکوت برابر ۰/۱۱ و در شرایط بدون استفاده از روانکار برابر ۰/۱۵ به دست آمده است.

در شرایط روانکاری قالب با استفاده از روانکار مولیکوت، تغییر شکل حلقه به صورت یکنواخت‌تر انجام شده است و سطح صاف‌تری نسبت به شرایطی حاصل شده که در آن قالب روانکاری نشده است. با مقایسه ابعاد نهایی قطر داخلی حلقه و کاهش ارتفاع آن با منحنی‌های کالیبراسیون آزمون



(الف)



(الف)



(ب)

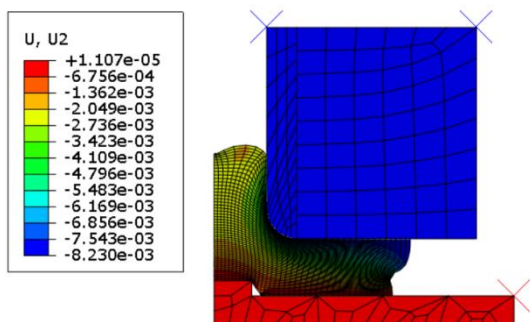


(ب)

شکل ۱۴- نمونه‌ی حلقه از جنس Ti-6Al-4V پس از تغییر شکل: (الف) در شرایط روانکاری قالب با مولیکوت و (ب) در شرایط بدون روانکاری قالب

آزمون تجربی فشار حلقه برای آلیاژ Ti-6Al-4V در مرجع [۲۶] نیز در دمای 950° انجام شده و ضریب اصطکاک برابر 0.12 به دست آمده است.

شکل ۱۵ قطعه‌کار را پس از تغییر شکل در آزمون‌های اکستروژن معکوس قالب باز و پس از انجام شبیه‌سازی نشان می‌دهد. جدول ۳ ضریب اصطکاک و تغییرات ابعادی قطعه‌کار را پس از تغییر شکل نشان می‌دهد. در شکل ۱۵ (ج) میزان کاهش ارتفاع قطعه‌کار و اندازه‌ی طول اکستروژد شده درون کانال اکستروژن قابل اندازه‌گیری است. در این تحلیل، مطابق با شرایط آزمون تجربی، ضریب اصطکاک در سطح آزاد قالب برابر 0.11 و در کانال اکستروژن برابر 0.20 در نظر گرفته شده است (شرایط روانکاری قالب با مولیکوت و پوشش‌دهی قطعه با روانکار شیشه). میزان پیشروی قالب که با کاهش ارتفاع قطعه‌کار برابر است، با رنگ آبی در کانتور



(ج)

شکل ۱۵- نمونه‌ی استوانه‌ای از جنس Ti-6Al-4V پس از تغییر شکل: (الف) در شرایط روانکاری قالب با مولیکوت، (ب) در شرایط بدون روانکاری قالب و (ج) پس از شبیه‌سازی در ضریب اصطکاک 0.2 در کانال اکستروژن

در حالت ضریب اصطکاک یکنواخت با نتایج تجربی مغایرت دارد. اثر تغییر ضریب اصطکاک در تغییر شکل کلی نمونه (بخصوص در ناحیه کانال) نیز در میزان ضریب اصطکاک تأثیر دارد و این تأثیر در نتایج جدول ۴ قابل مشاهده است. جدول ۴ به مقایسه اندازه ضرایب اصطکاک می‌پردازد که در شرایط اصطکاک مختلف و با استفاده از سه روش آزمون فشار حلقه، روش تلفیقی فشار حلقه با ODBET و ODBET به تنهایی به دست آمده‌اند.

با توجه به شکل ۱۰ (الف) و (ب)، وقتی ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین سطح تخت قالب و قطعه کار کمتر باشد، منحنی‌های کالیبراسیون اصطکاک از هم فاصله بیشتری داشته و اصطلاحاً قابلیت تمایز بهتری دارند، یعنی با کاهش ضریب اصطکاک در این ناحیه، حساسیت طول اکستروژن افزایش به تغییرات ضریب اصطکاک در کانال اکستروژن افزایش می‌یابد. با توجه به جدول ۴، مطابق با انتظار، در شرایط روانکاری قالب ضرایب اصطکاک در هر سه آزمون کمتر از حالتی به دست می‌آید که در آن قالب روانکاری نشده است. در آزمون فشار حلقه، ضریب اصطکاک در کل ناحیه تماسی برابر ۰/۱۱ به دست آمده و کمترین مقدار ضریب اصطکاک بین روش‌های مورد بررسی است؛ همچنین وقتی این ضریب اصطکاک در ناحیه تماس بین سطح تخت قالب و قطعه کار

جابجایی مشخص شده و اندازه آن برابر ۸/۲۳ میلی‌متر است. طول قسمت اکستروژن شده هم با محاسبه تفاضل جابجایی عمودی پیشانی قسمت اکستروژن شده و کاهش ارتفاع قطعه کار محاسبه می‌شود که در اینجا برابر ۶/۴۰ میلی‌متر به دست آمده است. مقایسه ابعاد نمونه تجربی در شرایط روانکاری قالب با مولیکوت و با ابعاد نمونه پس از تغییر شکل در شبیه‌سازی که در جدول ۳ هم ارائه شده نشان می‌دهد که ابعاد نمونه تجربی و شبیه‌سازی پس از تغییر شکل به هم نزدیک هستند و اختلاف نتایج عددی و تجربی در حدود ۳٪ است. بیشترین قطر خارجی قطعه کار هم در شبیه‌سازی با ضریب اصطکاک متغیر و ثابت پس از تغییر شکل به ترتیب برابر ۲۶/۱۶ میلی‌متر و ۲۳/۵۴ به دست آمده است؛ در حالی که قطر خارجی میانگین در قطعه کار در آزمایش تجربی برابر ۲۶/۶۶ میلی‌متر به دست آمده است. در شکل ۱۶ نیز نتایج توزیع جابجایی و تنش ون‌مایسز حاصل از دو شبیه‌سازی که در یکی از آنها ضریب اصطکاک یکنواخت و برابر ۰/۲ است و در دیگری ضریب اصطکاک در کف قالب ۰/۱۱ و در کانال آن ۰/۲ است، نمایش داده شده‌اند.

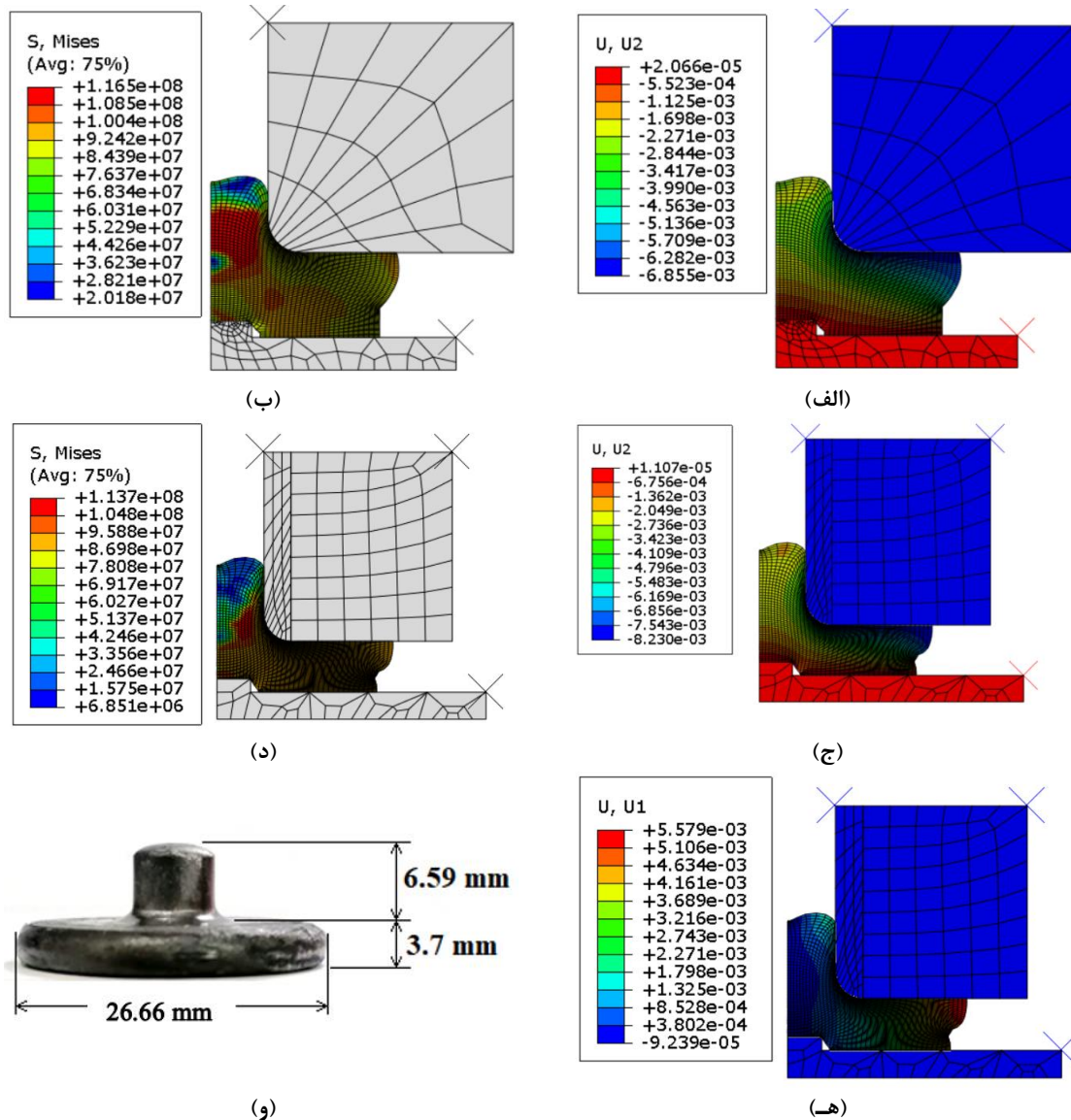
شکل ۱۶ نشان می‌دهد که با تغییر ضریب اصطکاک، کیفیت توزیع تنش ون‌مایسز به وضوح تحت تأثیر قرار گرفته و تغییر شکل موضعی در مجاورت پله موجود در کف قالب نیز

جدول ۳- اندازه‌های تجربی قطعه کار استوانه‌ای پس از آزمون ODBET در شرایط روانکاری قالب با مولیکوت و بدون روانکاری قالب

پیشروی قالب (mm)	پیشروی قالب (%)	طول اکستروژن (mm)	طول اکستروژن (%)	ضریب اصطکاک
۸/۳۰	۶۹/۱۶	۶/۵۹	۵۴/۹۱	۰/۲
۷/۴۰	۶۱/۶۷	۵/۱۰	۴۲/۵	۰/۲۵
۸/۲۳	۶۸/۵۸	۶/۴۰	۵۳/۳۳	

جدول ۴- مقایسه ضریب اصطکاک در سه آزمون فشار حلقه، تلفیقی فشار حلقه با ODBET و ODBET به تنهایی

روانکاری قالب با مولیکوت	بدون روانکاری قالب
۰/۲	۰/۲۵
۰/۱۱	۰/۱۵
۰/۱۵	۰/۲۲



شکل ۱۶- (الف، ب) توزیع جابجایی و تنش ون مایسز با ضریب اصطکاک یکنواخت ۰/۲ در کف و کانال قالب، (ج، د) توزیع جابجایی و تنش ون مایسز با ضریب اصطکاک ۰/۲ در کانال و در کف قالب، (ه) جابجایی المان‌ها در راستای شعاعی و (و) نمونه تجربی

۱ ثانیه بوده است. تغییرات دمای قالب، به دلیل استمرار حرارت‌دهی توسط مشعل، در حین فرآیند بسیار ناچیز و قابل صرف‌نظر بوده است. دمای قطعه‌کار نیز در انتهای تغییر شکل بین 700°C تا 760°C اندازه‌گیری شده است.

۶- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از این مطالعه را می‌توان به صورت زیر جمع‌بندی کرد:

اعمال شد، ضریب اصطکاک در کانال اکستروژن برابر ۰/۲ به دست آمده است؛ ولی وقتی ضریب اصطکاک در این دو ناحیه‌ی تماسی با هم برابر در نظر گرفته شده‌اند، ضریب اصطکاک در ناحیه تماسی برابر ۰/۱۵ است؛ همچنین مشاهده می‌شود که ضریب اصطکاک در کانال اکستروژن بیشتر از سطح آزاد قالب است.

در آزمون‌های تجربی، مدت زمان فرآیند از لحظه قرارگیری قطعه‌کار روی قالب تا انتهای تغییرشکل در حدود

است و مقادیر ضریب اصطکاک در هر دو ناحیه کاهش پیدا کرده‌اند، اما اختلاف بین ضریب اصطکاک این دو ناحیه تقریباً ثابت مانده است. همانطور که قبلاً اشاره شد، این اختلاف به شکل هندسی سطوح تماس، الگوی جریان مواد و توزیع فشار عمودی مربوط می‌شود. روانکار از ورودی قالب (به دلیل افزایش موضعی فشار) خارج می‌شود، اما در ناحیه کف قالب (به علت وجود سطح تماس تخت) تا حدودی حبس می‌شود.

۷- علائم و اختصارات

بار محوری	P_x
فشار شعاعی	P_r
فشار موردنیاز در ورودی قالب	P_{ent}
فشار عمود بر دیواره محفظه	P_{con}
میانگین تنش جریان	\bar{Y}
نصف زاویه‌ی قالب	A
ضریب اصطکاک	M

۸- مراجع

- [1] Zhang Q, Felder E, Bruschi S (2009) Evaluation of friction condition in cold forging by using T-shape compression test. J Mater Process Tech 209: 5720-5729.
- [2] Wang L, Zhou J, Duszczyc J, Katgerman L (2012) Friction in aluminium extrusion—Part 1: A review of friction testing techniques for aluminium extrusion. Tribol Int 56: 89-98.
- [3] Kunogi M (1956) A new method of cold extrusion. J Sci Res Ins 50: 215-245.
- [4] Male A (1964) A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation. J Ins Metals 65: 38-43.
- [5] Shen G, Vedhanayagam A, Kropp E, Altan T (1992) A method for evaluating friction using a backward extrusion-type forging. J Mater Process Tech 33:109-123.
- [6] Buschhausen WK, Lee A, Altan T. (1992) Evaluation of lubrication and friction in cold

- در روش اکستروژن معکوس قالب باز، نسبت به آزمون فشار حلقه، ضریب اصطکاک بیشتر شده است. دلیل این امر، افزایش فشار موضعی در ورودی کانال اکستروژن است که موجب فرار روانکار از آن ناحیه و باقی ماندن مقدار بسیار کمی روانکار در آنجا می‌شود. با توجه به شباهت بیشتر بین نواحی تماسی این آزمون و فرآیند اکستروژن، می‌توان نتیجه گرفت که نتایج آزمون فشار حلقه برای شبیه‌سازی اکستروژن دقت مناسبی ندارند و استفاده از نتایج این آزمون، به جای آزمون حلقه، توصیه می‌شود.
- با کاهش ضریب اصطکاک بین قالب و قطعه‌کار (یا افزایش کیفیت روانکاری) سطح قطعه‌کار پس از تغییرشکل یکنواخت‌تر خواهد شد.
- ضریب اصطکاک در آزمون ترکیبی فشار حلقه و اکستروژن معکوس قالب باز بیشتر از آزمون اکستروژن معکوس قالب باز به تنهایی و آزمون فشار حلقه است. در بخش ۲ مقاله به افزایش فشار موضعی در مجاورت ورودی حفره قالب اکستروژن پرداخته شد. این نتایج نشان می‌دهند که همانطور که فشار عمود بر سطح قالب در مجاورت ورودی حفره قالب بیشتر از سایر نواحی است (در بخش ۲ مقاله به این موضوع پرداخته شد)، ضریب اصطکاک نیز در مجاورت ورودی حفره قالب بیشتر از نواحی دیگر است؛ لذا برای افزایش دقت نتایج شبیه‌سازی فرآیند اکستروژن، بهتر است از آزمون ترکیبی فشار حلقه و اکستروژن معکوس قالب باز به جای آزمون اکستروژن معکوس قالب باز به تنهایی استفاده شود.
- نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که چنانچه فقط قطعه‌کار با روانکار پوشش داده شود (قالب بدون روانکار باشد)، ضریب اصطکاک در ورودی قالب ۰/۱ بالاتر از کف قالب است (۰/۱=۰/۱۵- و ۰/۲۵) و در صورتی که هم قالب و هم قطعه‌کار با روانکار پوشش داده شوند، این اختلاف به ۰/۰۹ می‌رسد (۰/۰۹=۰/۱۱-۰/۲)؛ یعنی علیرغم اینکه حجم کل روانکار در حالت دوم بیشتر از حالت اول

- [17] Sulaiman MH, Farahana RN, Bienk K, Nielsen CV, Bay N (2019) Effects of DLC/TiAlN-coated die on friction and wear in sheet-metal forming under dry and oil-lubricated conditions: Experimental and numerical studies. *Wear* 438-439(203040).
- [18] Sigvant M, Pilthammar J, Hol J, Wiebenga JH, Chezan T, Carleer B, Boogaard TVD (2019) Friction in sheet metal forming: influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results. *Procedia Manuf* 29: 512-519.
- [19] Xu Z, Huang J, Mao M, Peng L, Lai X (2020) An investigation on the friction in a micro sheet roll forming processes considering adhesion and ploughing. *J Mater Process Tech* 285(116790).
- [20] Shisode MP, Hazrati J, Mishra T, Rooij MD, Boogaard TVD (2020) Modeling mixed lubrication friction for sheet metal forming. *Procedia Manuf* 47: 586-590.
- [21] Vahdati AR, Vahdati M (2018) Experimental analysis the effect of lubricant and ultrasonic excitation of hemispherical-head tool on the vertical component of forming force in SPIF. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8(2): 107-123. (In Persian)
- [22] Bauser M, Sauer G, Siegert K (2006) *Extrusion*. 2nd edn. ASM, New York.
- [23] Slater RAC (1977) *Engineering plasticity, Theory and application to metal forming processes*. MACMILLAN Press LTD.
- [24] Mori T, Takatsuji N, Matsuki K, Aida T, Murotani K, Uetoko K (2002) Measurement of pressure distribution on die surface and deformation of extrusion die in hot extrusion of 1050 aluminum rod. *J Mater Process Tech* 130-131: 421-425.
- [25] Guo NSZ, Schillé JP, Miodownik AP (2008) Modelling high temperature flow stress curves of titanium alloys. *MRS international Materials Research Conference*, 9-12 june.
- [26] Li KPRLX, Lou Y, Peng DS (2002) A study on hot extrusion of Ti-6Al-4V using simulations and experiments. *Int J Mech Sci* 44: 2415-2425.
- forging using a double backward-extrusion process. *J Mater Process Tech* 33(1-2): 95-108.
- [7] Wang YHL, Zhang Y, Cai J, Zhou J, Duszczyc J, Katgerman L (2010) Modeling of double action extrusion — A novel extrusion process for friction characterization at the billet – die bearing interface. *Tribol Int* 43: 2084-2091.
- [8] Kang SH, Lee KS, Lee YS (2011) Evaluation of interfacial friction condition by boss and rib test based on backward extrusion. *Int J Mech Sci* 53: 59-64.
- [9] Sofuoglu HGH (2002) Determination of friction coefficient encountered in large deformation processes. *Tribol Int* 35: 27-34.
- [10] Khandaei M, Arabi H, Beig Mohammadi M (2020) A new method for investigating friction effects in forging processes using open die compression test of a cylindrical rod. *J Mech Eng* 50(2): 77-82. (In Persian)
- [11] Wang L, Zhou J, Duszczyc J, Katgerman L (2012) Identification of a friction model for the bearing channel of hot aluminium extrusion dies by using ball-on-disc tests. *Tribol Int* 50: 66-75.
- [12] Taureza SCM, Aue-u-lan Y, Lim SCV (2012) The influence of die geometry and workpiece mechanical properties in T-Shape friction test. *J Mater Process Tech* 212: 2413-2423.
- [13] Zheng Y, Wang Z, Yoshikawa Y, Dong W (2017) Experimental investigation on friction law under starved lubrication in metal forming. *Procedia Engineer* 207: 2269-2273.
- [14] Wang Z, Suzuki T, (2018) Friction law in dry metal forming of materials with work hardening. *Procedia Manuf* 15: 475-480.
- [15] Seshacharyulu K, Bandhavi C, Naik BB, Rao SS, Singh SK (2018) Understanding friction in sheet metal forming-Areview. *Mater Today* 5: 18238-18244.
- [16] Trzepiecinski T, Lemu HG (2020) Recent developments and trends in the friction testing for conventional sheet metal forming and incremental sheet forming. *Metals* 10(1): 47.