

بررسی آزمون اصطکاکی تی شکل برای آلیاژ تیتانیوم در دمای بالا

فرزان براتی^۱، یاسر نعمتی^۲

* نویسنده مسئول: baratifarzan@gmail.com

چکیده

متغیرهای متعددی بر فرایند شکل‌دهی فلزات تاثیر گذار می‌باشند که یکی از مهمترین آنها اصطکاک است. اصطکاک بر نحوه سیلان ماده و همچنین نیروی مورد نیاز برای شکل‌دهی اثر گذار می‌باشد. برای تعیین میزان و نحوه تاثیر آن داشتن مقدار دقیق ضریب اصطکاک ضروری است. این مقاله مربوط به مطالعه تجربی و عددی روی آلیاژ تیتانیوم با استفاده از آزمون اصطکاکی تی شکل در دمای بالا است. و با استفاده از شبیه سازی اجزا محدود و آزمایش‌های تجربی اثرات پارامترهای دما، سرعت، شعاع گوشه قالب، و شرایط اصطکاکی در آزمون تی شکل مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس نتایج تجربی و عددی مشخص شد حساسیت اصطکاک در آزمایشی شکلبا افزایش سرعت قالب یا کاهش شعاع لبه قالب و دمای آزمون، افزایش می‌یابد. همچنین همخوانی بین مقادیر ضریب اصطکاک به دست آمده به وسیله نرم افزار تحلیل اجزا محدود و منحنی کالیبراسیون اصطکاکی برای شرایط مختلف اصطکاک دیده شد.

واژه‌های کلیدی

آزمایش تی شکل، ضریب اصطکاک، شکل دهی، شبیه سازی اجزا محدود

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان پردیس تحصیلات تکمیلی علوم و تحقیقات

۱- مقدمه

در چهار دهه گذشته نیاز جدی صنایع هوا فضا به مواد جدیدی با نسبت استحکام به وزن زیاد در دماهای بالا، انگیزه ای برای توسعه آلیاژهای تیتانیوم شد. نقطه ذوب بالای تیتانیوم به عنوان مشخصه ای قوی برای مقاومت خوب این آلیاژها در برابر خزش در محدوده وسیعی از دما، مطرح گردید. با این حال هم اکنون آلیاژهای تیتانیوم جایگاهی مهم در فهرست مواد بکار رفته در صنایع هوا فضا یافته اند به طوری که حدود ۸۰٪ از تیتانیوم در این صنایع مصرف می گردد. اخیراً اهمیت این آلیاژها به عنوان مواد مقاوم در برابر خوردگی در صنایع شیمیایی مورد توجه واقع شده و در حرفه پزشکی نیز پروتزهایی از آلیاژهای تیتانیوم برای جای دادن در بدن انسان مورد استفاده قرار گرفته است. در جدول (۱) خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) آمده است [۱-۲].

جدول (۱) خواص مکانیکی آلیاژ تیتانیوم [۱]

تنش تسلیم (MPa)	استحکام کشش نهایی (MPa)	چقرمگی ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	حد خستگی (MPa) ^{۱۰۷}
۹۴۰	۹۷۸	۵۲	۴۹۴

هدف شکل دهی دقیق فلزات تولید قطعات نزدیک به ابعاد نهایی بدون عیب و با کمترین اتلاف مواد و هزینه ابزار می باشد. به منظور رسیدن به این هدف درک صحیحی از مشخصات ماده پارمترهای فرایند و رفتار بین قطعه و قالب مثل اصطکاک ضروری است. اصطکاک نقش اساسی در کل فرایند شکل دهی دارد و باید در حین طراحی فرایند نقش آن در نظر گرفته شود. الگوی جریان مواد و عیوب ایجاد شده در قطعات تولیدی شدیداً تحت اثر شرایط اصطکاک کنترول می شود. تعیین صحیح ضریب اصطکاک و انتخاب روش آزمایش مناسب برای درک پدیده اصطکاک و انتخاب روش آزمایش مناسب برای درک

پدیده اصطکاک در سطح تماس قطعه و قالب تحت شرایط

روانکاری مختلف مهم است. [۳-۴]

چندین آزمایش اصطکاک که هر کدام دارای مزایا و کاستی است وجود دارند. در میان آنها، آنها، آنهاییکه اکثراً برای فلزات به کار می روند آزمایش فشار حلقه، آزمایش فشار تی شکل، اکستروژن مستقیم، اکستروژن غیر مستقیم، اکستروژن فنجان- میله ای، اکستروژن دوفنجانی و آزمایش اسپایک هستند. آزمایش اصطکاک من اسب باید شرایط تا حد امکان شبیه به آزمایش عملی قابل مشاهده ارائه کند [۵].

آزمایش تی شکل، یک روش جدید برای تعیین ضریب اصطکاک شکل دهی فلزات است. قالب در این آزمایش، از یک قالب تخت در بالا و یک قالب با شیار V شکل تشکیل شده است. آزمایش فشار T شکل اولین بار در سال ۲۰۰۹ توسط ژانگ و همکارانش ارائه شد. آن ها از این آزمایش برای سنجش اصطکاک در فرآیند شکل دهی سرد استفاده کردند. همچنین به کمک نرم افزارهای اجزاء محدود تأثیر اصطکاک را بر نیروی شکل دهی و شکل قطعه تغییر شکل یافته و همچنین تأثیر هندسه ابزار را بررسی کردند. [۶]

یان چون زوهو و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقاتی در رابطه با تعیین ضریب اصطکاک آلیاژ تیتانیوم (Ti-6Al-4V) در شکل دهی گرم به وسیله آزمایش فشار حلقه و با استفاده از شبیه سازی المان محدود انجام دادند. و متوجه شدند ضریب انتقال حرارت تأثیر مهمی روی منحنی سیلان فلز و کالیراسیون دارد. بنابراین ضریب اصطکاک تحت تأثیر قرار می گیرد. [۷]

همچنین فرشته صنیعی و همکاران (۲۰۱۱) تحقیقاتی در رابطه با استفاده از آزمون تی شکل برای آلیاژهای منیزیم AZ30، AZ31 در دمای بالا انجام دادند. [۸]

در آزمایش اکستروژن دو فنجان یک نمونه استوانه‌ای شکل که در یک قالب با قطر اسمی یکسان قرار گرفته است. سپس آنرا بیند و پانچ مشابه فشرده و دو فنجان با یک پایه تشکیل شده است، زمانیکه پانچ بالایی رو به پایین در حرکت است. نسبت ارتفاع بالایی به ارتفاع پایین تر ($h1/h2$) حساسیت اصطکاک در این آزمایش است. مقدار $h1/h2$ بسیار نزدیک به ۱ برای شرایط اصطکاک صفر است. اما برای اصطکاکهای بالا، این نسبت بسیار بیشتر از واحد است. برای انجام این آزمایش، با ابعاد مختلف نمونه و ابزار بر اساس توصیه ICFG عمل می‌کنیم [۱۲].

آزمون اکستروژن فنجان- میله‌ای یکی دیگر از آزمایش اصطکاک برای فرآیندهای شکل‌دهی حجیم است. در این آزمایش، یک نمونه استوانه‌ای شکل در یک قالب مخصوص قرار گرفته و با حرکت پانچ به جلو مواد به سمت انتهای باز قالب و فاصله بین پانچ و قالب جریان می‌یابد. نسبت ارتفاع فنجان / طول پانچ (HC/HR) به عنوان یک پارامتر حساس به اصطکاک انتخاب شده است. هر چه اصطکاک زیاد، این نسبت بزرگتر است [۱۳].

ژانگ و همکاران پیشنهاد آزمایش فشار تی شکل، که بطور شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده را دادند. وقتی نمونه بین قالب فشرده، مواد بین دو قالب و شیار، اکستروژن شده و نیرو فورمینگ و ارتفاع در قسمت مرکزی اکستروژن اصطکاک حساس هستند. در این آزمایش، بزرگ شدن سطح نیز می‌تواند تا ۵۰ درصد باشد و فشار تماس ممکن است به چهار برابر تنش سیلان برسد. نمونه با قطرهای مختلف را می‌توان با همان مجموع‌های از قالب‌ها آزمایش شده و هزینه‌های پایین‌تر در مقایسه با آزمون اکستروژن دیگر ذکر شده در این بخش برای بررسی اصطکاک به کار برد [۵، ۶]. در سال ۲۰۱۱ صنیعی و همکارانش به بررسی

تارضا و همکاران (۲۰۱۰) تحقیقاتی در رابطه با بهبود حساسیت شرایط اصطکاک آزمون تی شکل برای ارزیابی رفتار اصطکاک در میکروفورمینگ انجام دادند [۹].

در این مقاله با توجه به اینکه آزمون اصطکاک تی شکل یک روش نوین بوده و تحقیقات زیادی در این باره انجام نشده و پارامترهای حساس در این آزمون به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته به بررسی پارامترهایی همچون دما، شعاع لبه قالب، سرعت رم و شرایط اصطکاک پرداخته شده است و با توجه به استفاده فراوان از آلیاژهای تیتانیوم در صنایع مختلف همچون هوافضا، خودرو سازی، صنایع دریایی، نفت-گاز و پزشکی که تولید قطعات در این صنایع اکثرا با فرایندهای شکل‌دهی انجام می‌شود. در این پژوهش به بررسی عوامل موثر در آزمون تی شکل با آلیاژ تیتانیوم پرداخته شده و نتایج جالبی را به همراه داشته است.

۲-آزمایش اصطکاک

اصطکاک در شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود نقش مهمی دارد. روش‌های مختلفی برای تعیین اصطکاک در فرآیندهای شکل‌دهی وجود دارد. از جمله آزمایش‌هایی که برای سنجش اصطکاک استفاده می‌شود می‌توان به آزمایش فشار حلقه، آزمایش فشار تی شکل، اکستروژن مستقیم، اکستروژن غیر مستقیم، اکستروژن فنجان- میله‌ای، اکستروژن دوفنجان و آزمایش اسپایک اشاره کرد.

آزمایش حلقه یکی از متداول‌ترین و ساده‌ترین آزمایش اصطکاک است، که در تحقیقات مختلف تجربی استفاده می‌شود. در این آزمایش، یک نمونه حلقه با قطر بیرونی اولیه مشخص (DO)، قطر داخلی (DI)، ارتفاع (HO) که بعد از اعمال فشار قطر داخلی حلقه رینگ تغییر یافته و برای اصطکاک کم کاهش و برای اصطکاک زیاد افزایش می‌یابد [۱۰، ۱۱].

هر منحنی حداقل ۸ نمونه استوانه‌ای یکسان تراشکاری گردید و سپس هر استوانه به صورت یک مرحله‌ای و تا یک مقدار مشخص فشرده و نتایج مربوط به نیرو و تغییرات هندسی نمونه اندازه گیری و ثبت شده است. به منظور بررسی اثر نرخ کرنش در آزمایش‌ها، تمامی آزمایش‌ها در نرخ کرنش متوسط یکسان انجام گرفته است.

۵- روش ارزیابی اصطکاک

واضح است که یک آزمایش اصطکاک نسبت به شرایط اصطکاکی سطحی حساس است. ژانگو و همکاران [۶] نشان دادند که شیب منحنی جابه‌جایی- بار با هر گونه تغییر در ضریب اصطکاک برشی (m) تغییر کرده است. به همین دلیل، از شیب منحنی برای ارزیابی فاکتور اصطکاک برشی استفاده می‌شود. علاوه بر این، حساسیت شیب منحنی بار λ_k به عنوان یک شاخص حساسیت به سطح اصطکاک انتخاب شد. این شاخص به شرح زیر تعریف شده است [۱۵].

$$\lambda_k = \frac{K_m - K_{m=0}}{K_{m=0}} \quad (1)$$

که K_m شیب منحنی نیرو با فاکتور اصطکاک m و $K_{m=0}$ شیب منحنی نیرو در شرایطی است که $m=0$ باشد (شرایط بدون اصطکاک). از آنجا که در یک منحنی جابه‌جایی- بار، شیب‌های مختلف وجود دارد، بر اساس شیب قسمت خطی منحنی برای این هدف مقایسه انتخاب شد. همانطور که در پیش اشاره شد، ارتفاع بخش اکستروژن نمونه از اصطکاک تحت تاثیر قرار می‌گیرد. به عبارت دیگر، برای اصطکاک بالاتر، این ارتفاع کوچکتر می‌شود. از این رو، شاخص حساسیت به ارتفاع (K_H) که به شرح زیر تعریف شده است [۱۵].

کاربرد آزمون اصطکاک تی شکل برای آلیاژهای منیزیم AZ31 و AZ80 در دماهای بالا پرداخته اند [۸].

در سال ۲۰۱۰ تاورضا و همکارانش به بررسی بهبود شرایط حساسیت به آزمایش اصطکاک تی شکل برای محاسبه‌ی رفتار اصطکاک در تغییر شکل میکرو پرداختند [۹].

در این مقاله حساسیت آزمایشی شکل به شرایط اصطکاک با بررسی منحنی‌های بار-جابه‌جایی عمودی اکستروژن سنجیده شده است. همچنین با استفاده از نرم افزار اجزا محدود Deform2d و با فرض کرنش صفحه‌ای، اثرات تغییر در هندسه‌ی قالب به نتایج آزمایشی شکل مورد بررسی قرار گرفته است [۹].

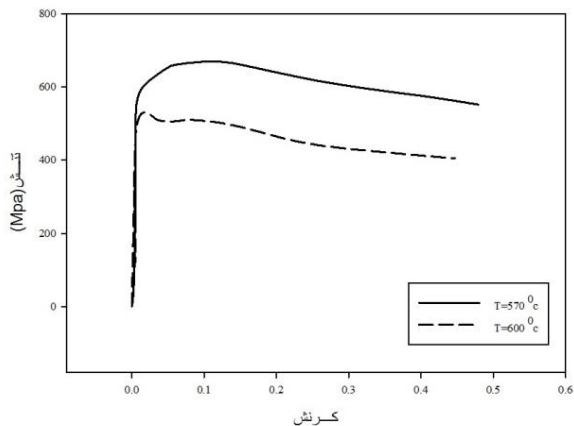
علاوه بر این، سرعت رم بیشتر، ضریب اصطکاک کمتر است. این پدیده برای آلیاژ تیتانیوم در دمای بالا نیز توسط لیو همکاران انجام شد [۱۴].

۳- نمونه مواد و ابزار

آلیاژهای تیتانیوم (Ti-6Al-4V) برای نمونه‌های آزمایش انتخاب شدند. تمامی نمونه‌ها دارای قطر اسمی 8mm و ارتفاع اسمی 12mm و نمونه‌ها به روش ماشین‌کاری تهیه شده‌اند. قالب از فولاد AISI-H-13 ساخته شده است. به منظور بررسی تجربی اثر شعاع لبه قالب، دو قالب با شعاع لبه ۱ و ۲ میلی‌متر در ورودی شیار مرکزی ساخته شد. شیار مرکزی همراه با شعاع لبه مجاور در هر قالب بالایی توسط ماشین وایر کات ایجاد شده است.

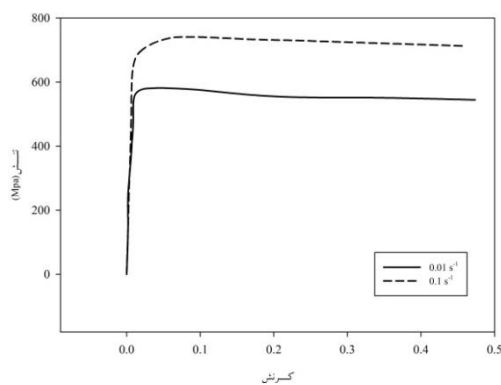
۴- طرح و تجهیزات آزمایش

برای آزمایش شرایط اصطکاکی مختلف در نظر گرفته شد. این شرایط خشک و روان‌کار بودند. سرعت فک بالا 0.58 و 0.058 میلی‌متر بر ثانیه انتخاب شد. آزمایش‌ها نیز در دما 570 و 600 درجه سانتی‌گراد انجام شدند و آزمایش‌ها توسط دستگاه سن‌تامانجام شده در این دستگاه سرعت حرکت فک بالایی قابل تنظیم می‌باشد. برای انجام آزمایش فشار، برای



شکل (۱) منحنی سیلان آلیاژ تیتانیوم در درجه حرارت ۵۷۰ و ۶۰۰ درجه

سانتیگراد



شکل (۲) منحنی سیلان آلیاژ تیتانیوم در نرخ کرنش ۰/۰۱ و ۰/۱



شکل (۳) قالب و نمونه تغییر شکل یافته در آزمایش تی شکل

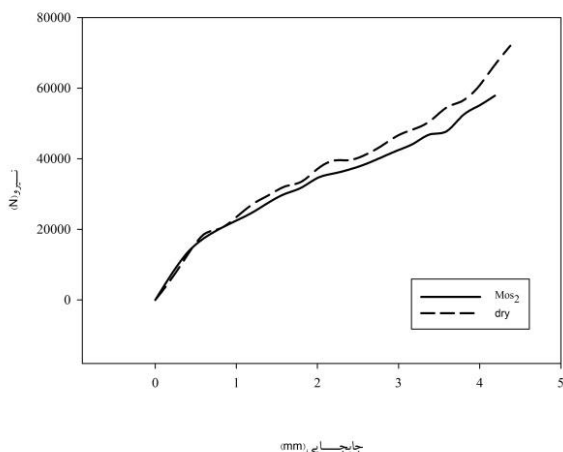
$$\lambda_H = \frac{H_m - H_{m=MoS2}}{H_{m=MoS2}} \quad (2)$$

که در آن H_m ارتفاع متوسط اکستروژد شده با ضریب اصطکاک m و $H_{m=MoS2}$ ارتفاع متوسط اکستروژد شده در شرایطی است که از روانکار MoS2 استفاده شده است. لازم به ذکر است که طول بخش اکستروژد شده از بخش تخت نمونه تغییر شکل داده تا بخش میانی قسمت اکستروژد شده و در یک سمت نمونه است.

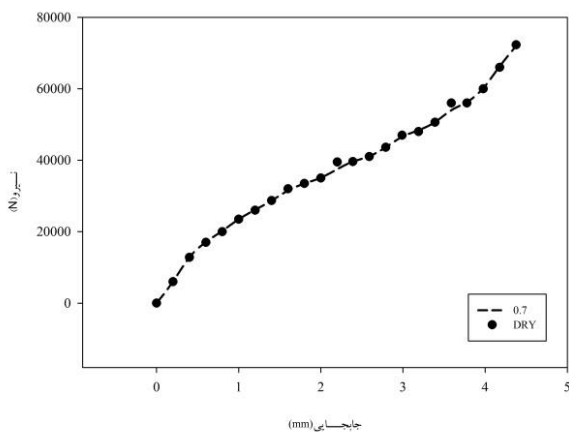
۶- نتایج و بحث

شکل (۱) و (۲) منحنی سیلان آلیاژ تیتانیوم به ترتیب در درجه حرارت ۵۷۰ و ۶۰۰ درجه سانتیگراد و در نرخ کرنش های ۰/۱ و ۰/۰۱ نشان می‌دهد. بعد از پیک پدیده تبلور مجدد دینامیکی اتفاق می‌افتد. میزان جابجایی برای هر نمونه، ۴mm در نظر گرفته شده است. با استفاده از طول اکستروژد شده و نیروی متناظر در هر نمونه، یک نقطه در منحنی‌های کالیبراسیون به دست آمده از شبیه سازی اجزاء محدود، مشخص می‌شود. این نقطه ضریب برشی اصطکاک مربوط به نمونه را نتیجه می‌دهد. منحنی‌های کالیبراسیون، بر حسب نسبت ارتفاع بخش اکستروژد شده به قطر قطعه و نیروی شکل دهی، به دست می‌آید. شکل ۳ قالب و نمونه تغییر شکل یافته را نشان می‌دهد. شکل‌های (۴) و (۵) منحنی-های کالیبراسیون برای آلیاژ Ti-6Al-4V در دما ۶۰۰ و ۵۷۰ درجه سانتیگراد برای قالبی با شعاع لبه ۱mm و سرعت ۰/۰۵۸ mm/s و شرایط اصطکاک مختلف را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج تجربی، ضریب اصطکاک برای شرایط مختلف روانکاری و دما متفاوت، در جدول (۲) آورده شده است. همواره کم‌ترین اصطکاک مربوط به روانکار MoS2 و بیشترین مقدار در حالت بدون روانکاری بوده است.

شده است. برای بررسی صحت نتایج به دست آمده، مقایسه نتایج شبیه سازی، که شامل منحنی نیرو-جابجایی به دست آمده در آزمایش و شبیه سازی اجزاء محدود است، در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد با نتایج تجربی در شکل (۷) برای آلیاژ Ti-6Al-4V را نشان می دهد که نشان دهنده دقت بالای نتایج به دست آمده در شبیه سازی ها است.



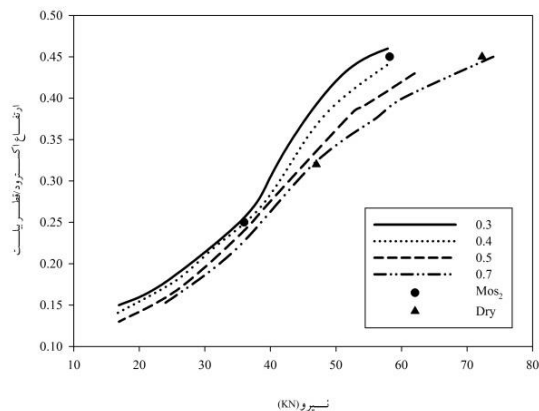
شکل (۶) منحنی تجربی نیرو-جابجایی در دمایی ۵۷۰ درجه سانتیگراد



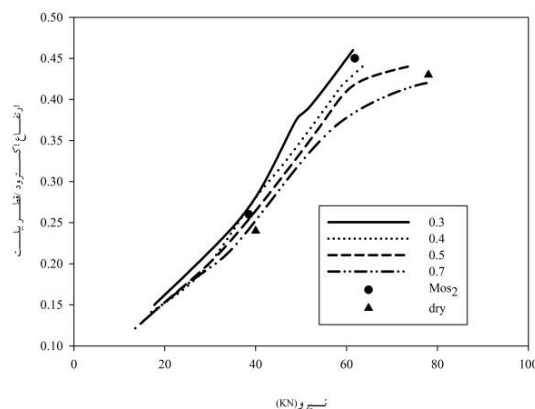
شکل (۷) مقایسه منحنی تجربی و شبیه سازی شده نیرو-جابجایی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

شکل (۸ و ۹) اثر تغییر شعاع گوشه بر ارتفاع بخش اکستروود شده را در شبیه سازی ها نشان می دهد.

برای یک مقدار مشخص ضریب اصطکاک، ارتفاع بخش اکستروود شده با افزایش شعاع گوشه، افزایش یافته و حساسیت آن به اصطکاک کاهش یافته است. در واقع با



شکل (۴) منحنی کالیبراسیون و نتایج تجربی در دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد

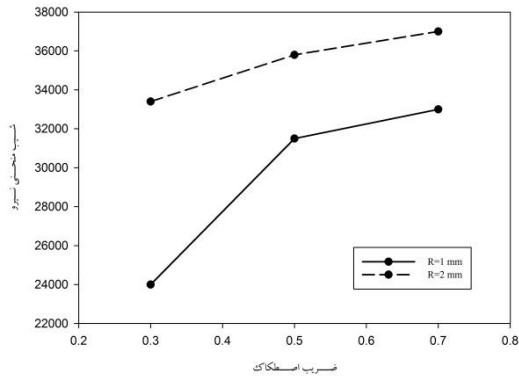


شکل (۵) منحنی کالیبراسیون و نتایج تجربی در دمای ۵۷۰ درجه سانتیگراد

جدول (۲) نتایج آزمایش های تی شکل

M	روانکار	شعاع لبه (mm)	سرعت (mm/min)	دما (°C)	ماده
۰/۳۵	MoS ₂	۱	۰/۰۵۸	۵۷۰	Ti-6Al-4V
۰/۶۸	Dry				
۰/۴	MoS ₂	۱	۰/۰۵۸	۵۷۰	
۰/۷۲	Dry				
۰/۴	MoS ₂	۱	۰/۰۵۸	۶۰۰	
۰/۶۹	Dry				
۰/۳۵	MoS ₂	۱	۰/۰۵۸	۶۰۰	
۰/۷۱	Dry				

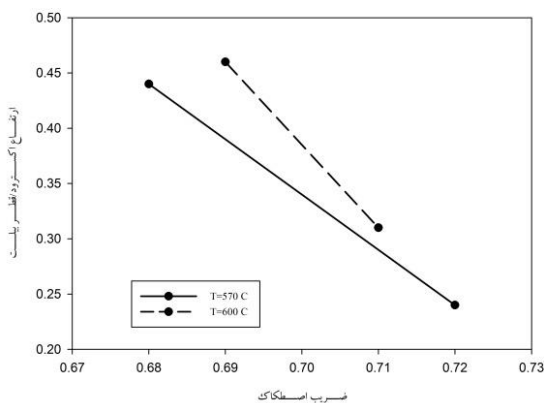
در شکل (۶) منحنی تجربی نیرو-جابجایی در دمایی ۵۷۰ درجه سانتیگراد در دو شرایط اصطکاکی مختلف نشان داده



شکل (۱۰) تاثیر تغییرات شعاع بر روی منحنی شیب k در

$$T=570^{\circ}C, V=0.58mm/s$$

برای بررسی اثر دما، آزمایش‌هایی در دو دمای ۵۷۰ و ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد انجام شد. تغییر دما در حالتی که شعاع گوشه ۱ میلی‌متر است، صورت گرفته است. شکل (۱۱) اثر تجربی تغییر دما بر ارتفاع بخش اکستروژن شده را نشان می‌دهد. با افزایش دما، شکل پذیری بیشتر شده و ارتفاع بخش اکستروژن شده نیز افزایش یافته است. همچنین در شکل (۱۲) نتایج شبیه‌سازی تأثیر دما بر شاخص حساسیت به ارتفاع رادر آلیاژ Ti-6Al-4V نشان می‌دهد و حساسیت به اصطکاک نیز افزایش یافته است. افزایش حساسیت در دمای بالاتر ناشی از اثر دما بر روانکار است. در شرایط اصطکاکی یکسان، اصطکاک با افزایش دما، بیشتر شده است.

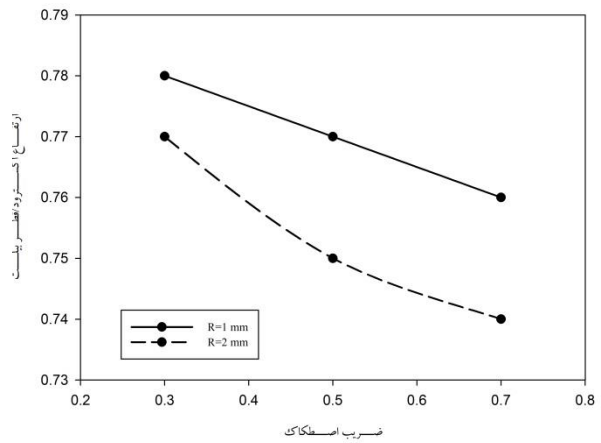


شکل (۱۱) نتایج تجربی تأثیر دما در آلیاژ تیتانیوم بر حسب ارتفاع بخش

اکستروژن شده به ضرب اصطکاک

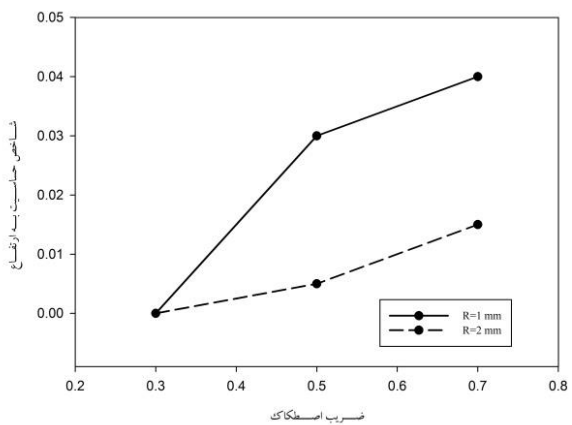
افزایش شعاع گوشه، روند اکستروژن شدن ماده به درون شیار V- شکل آسان شده و ارتفاع بخش اکستروژن شده افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر بدون تغییر شرایط اصطکاکی میزان اکستروژن شدن افزایش یافته است و این امر حساسیت به اصطکاک را کاهش می‌دهد.

شکل (۱۰) اثر تغییر شعاع گوشه بر شیب منحنی نیرو - جابجایی برای آلیاژ تیتانیوم در شبیه‌سازی ها را نشان می‌دهد. با هر گونه افزایش در شعاع لبه، شیب منحنی نیرو را افزایش می‌دهد، در حالیکه ΔK کاهش می‌یابد.



شکل (۸) نسبت ارتفاع اکستروژن شده به پیلت برای ضرب اصطکاک

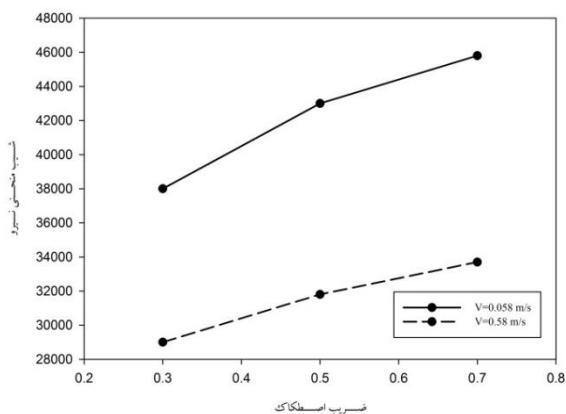
$$T=5700C, V=0.58mm/s$$



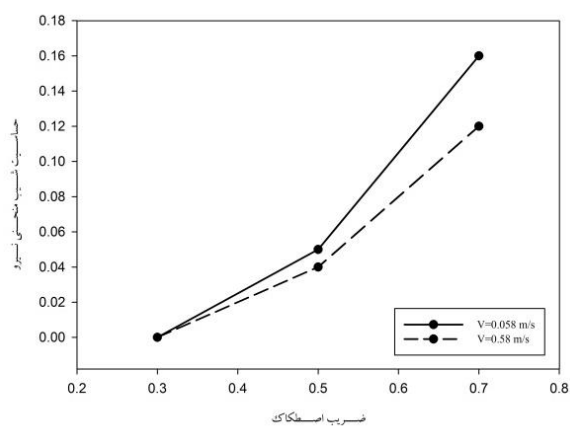
شکل (۹) نمودار شاخص حساسیت ارتفاع به ضرب اصطکاک برای

$$T=570^{\circ}C, V=0.58mm/s$$

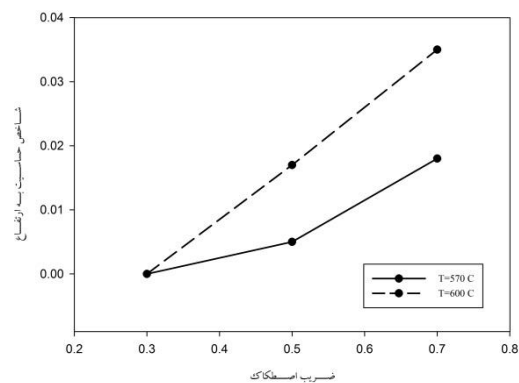
در نهایت اثر سرعت بارگذاری در آزمایش فشار تی شکل بررسی شده است. شکل‌های (۱۵ و ۱۶) نحوه اثرگذاری سرعت بارگذاری را در شیب منحنی نیرو و حساسیت متناظر با آن را نشان می‌دهد. مشخص است که با افزایش سرعت، نیروها بزرگ‌تر شده‌اند، اما شیب بخش خطی منحنی و ضریب اصطکاک کاهش یافته است. شیب منحنی نیرو با ضریب اصطکاک رابطه مستقیم دارد و با افزایش ضریب اصطکاک، شیب نیز افزایش می‌یابد. و حساسیت به اصطکاک در سرعت‌های بالاتر، بیشتر می‌باشد. در واقع میزان تغییرات ضریب اصطکاک در سرعت بالاتر، بیشتر بوده که ناشی از افزایش اثر سرعت بر ویسکوزیته روانکار و شرایط بین سطوح تماس است.



شکل (۱۵) تاثیر تغییرات سرعت بر روی منحنی شیب k در $T=570^{\circ}\text{C}$, $R=1\text{mm}$

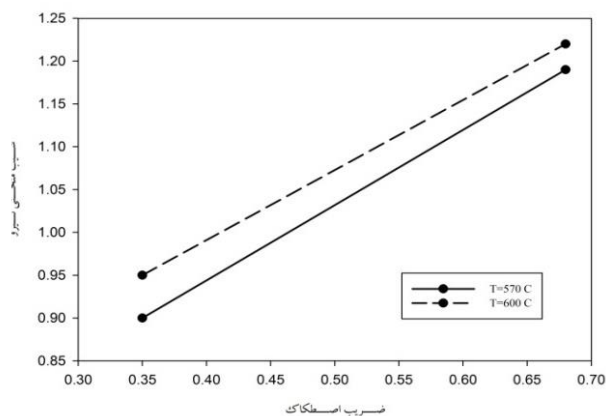


شکل (۱۶) تاثیر تغییرات سرعت بر روی منحنی حساسیت شیب منحنی بار در $R=1\text{mm}$, $T=570^{\circ}\text{C}$

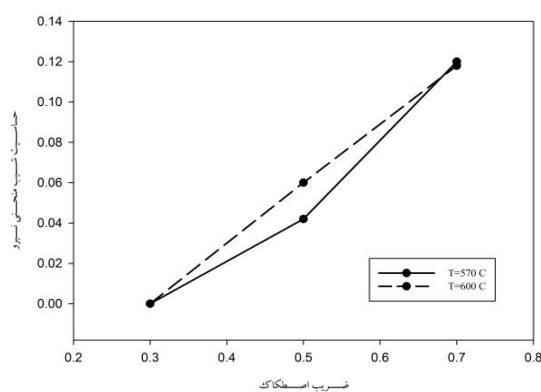


شکل (۱۲) نتایج شبیه سازی تأثیر دما در آلیاژ Ti-6Al-4V

در شکل (۱۳) تأثیر تجربی دما بر شیب منحنی نیرو - جابجایی و در شکل (۱۴) حساسیت آن آورده شده است. با افزایش دما، شیب منحنی نیرو کاهش یافته است. حساسیت به اصطکاک آن تغییر چندانی نکرده و در کل در دمای بالا حساسیت بیشتر می‌باشد.



شکل (۱۳) اثر تجربی دما بر شیب منحنی نیرو



شکل (۱۴) نتایج شبیه سازی تأثیر دما در حساسیت شیب بر حسب ضریب اصطکاک

۷- نتیجه گیری

براساس مشاهدات گزارش شده در این مقاله، نتیجه-گیری به شرح زیر را می توان خلاصه کرد:

۱- روش تجربی تشریح شده در این کار پژوهشی تکرار خوبی از آزمونها و نتایج متناظر را نشان داد.

۲- با استفاده از منحنی های کالیبراسیون بدست آمده از شبیه سازی و ضریب اصطکاک به دست آمده از آزمایش های تی شکل، در دو دما مختلف منجر به یک توافق بسیار خوب ۸۴ درصدی بین نتایج تجربی و عددی شد.

۳- بر اساس شبیه سازی آزمایش تی شکل نتایج نشان می دهد که با افزایش شعاع گوشه حساسیت آن به اصطکاک کاهش یافته است. که این نتیجه با پژوهش صناعی و همکاران ۲۰۱۱ مطابقت دارد.

۴- بر اساس آزمایش های تی شکل انجام شده، نتایج نشان می دهد که با افزایش دما ضریب اصطکاک در آزمایش تی شکل افزایش یافته است. که دلیل آن با افزایش دما سطح نمونه و قالب دچار جوش موضعی شده و این امر موجب افزایش ضریب اصطکاک می شود.

۵- افزایش سرعت موجب افزایش نرخ کرنش می شود که نرخ کرنش تاثیر به سزایی در منحنی های سیلان دارد در نتیجه حساسیت اصطکاک در آزمایش تی شکل بیشتر در سرعت های زیاد بود.

مراجع

- [3] Robinson T., Armstrong C.G., Study on Ring Compression Test Using Physical Modeling and FE Simulation, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 154, 2004, pp. 54-59.
- [4] Barooghi B., Amiri A., Sadeghi M.H., Study on hot ring compression test of Al6082 alloy using experimental observations and FEM simulation *Journal of Modares Mechanical Engineering*, vol.13, 2013, pp75-68.
- [5] Zhang Q., Arentoft M., Bruschi S., Dubar L., Felder E., Measurement of friction in a cold extrusion operation: study by numerical simulation of four friction tests, *International Journal of Material Forming*, vol. 1, 2008, pp. 1267-1270.
- [6] Zhang Q., Felder E., Bruschi S., Evaluation of friction condition in coldforging by using T-shape compression test. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 209, 2009, pp. 5720-5729.
- [7] Zhu Y., Zeng W., Ma X., Determination of the friction factor of Ti-6Al-4V titanium alloy in hot forging by means of ring-compression test used FEM, *Tribology international*, vol. 44, 2011, pp. 2074-2080.
- [8] Fereshteh-Saniee F., Badnava H., Pezeshki-Najafabadi S.M., Application of T-shape friction test for AZ31 and AZ80 magnesium alloys at elevated temperatures, *Materials and Design*, vol. 32, 2011, pp. 3221-3230.
- [9] Taureza M., Castagne B.S., Aueulan Y., Improving the Sensitivity of T-Shape Test to Friction Conditions for the Evaluation of Friction Behaviour in Microforming, *Engineering Materials, Journal of Key Engineering Materials*, vols. 447-448, 2010, pp. 386-390.
- [10] Fereshteh Saniee F., Pillinger I., Hartley P., Friction modeling for the physical simulation of the bulk metal forming processes. *Journal of Materials Technology*, vols. 153-154, 2004, pp. 151.
- [11] Sahin M., Cetinarslan C., Erol Akata H., Effect of surface roughness on friction coefficients during upsetting processes for different materials, *Journal of Materials & Design*, vols. 28, 2007, pp. 633-640.
- [12] Fereshteh Saniee F., Bayateefar H., Experimental comparison of different friction tests in bulk metal forming, *Proceedings of the 7th ICTP*, vol. 1, Yokohama, 2002, pp. 91.
- [1] Rodrigues Henriquesa V.A., Paulo de Camposa P., Alves Cairoa C.A., Carlos Bressianib J., Production of Titanium Alloys for Advanced Aerospace Systems by Powder Metallurgy, *Journal Materials Research*, vol. 19, 2005, pp. 443-446.
- [2] Polmear I.J., Light Alloys Metallurgy of the Light Metals, Third Edition, Translated by M.R. Aboutalebi, M. Adeli, pp. 245-308.

[13] Bay N., Hunding J., Kuzman K., Pfeifer E., Testing of friction in cold forging by combined forward rod/backward cup extrusion, Proceedings *ICTP Ohio*, vol. 1; 1996, pp. 318–26.

[14] L.X. Li, D.S. Peng, J.A. Liu, Z.Q. Liu, An experiment study of the lubrication behavior of graphite in hot compression of Ti–6Al–4V Alloy, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 112, 2001.

[15] بادنواح، تعیین منحنی های سیلان آلیاژهای منیزیم با

استفاده از آزمایش فشار، پایان نامه کارشناسی

ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه بوعلی سینا،

۱۳۹۰.