



پژوهش‌نامه ریخته‌گری

مقاله پژوهشی:

بررسی و اصلاح اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک حین تغییر شکل داغ فشاری یک ترکیب بین فلزی آلومیناید تیتانیوم ریختگی

حسین رضایی^۱، مریم مرکباتی^{۲*}، امیر مومنی^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مواد، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲- دانشیار، مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۳- دانشیار، دانشکده متالورژی و مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی همدان

* نویسنده مکاتبه کننده: Email: m_morakabati@mut.ac.ir

چکیده:

هدف از پژوهش حاضر، مطالعه تاثیر اصطکاک و گرمای آدیباتیک حین تغییر شکل داغ فشاری ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb و اصلاح تاثیر این عوامل بر منحنی‌های سیلان داغ آن است. به همین منظور آزمون فشار داغ ترکیب فوق در دماهای ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ و نرخ‌های کرنش ۰/۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ بر ثانیه انجام شد. سپس منحنی‌های سیلان داغ به دست آمده، با در نظر گرفتن تاثیر اصطکاک و گرمای آدیباتیک اصلاح شد. نوع اصطکاک از نوع لغزنده بوده و مقادیر ضریب اصطکاک در شرایط مختلف تغییر شکل داغ بین ۰/۱۴ تا ۰/۴۶ محاسبه شد. مقدار ضریب اصطکاک با افزایش دمای تغییر شکل و کاهش نرخ کرنش، افزایش یافت. این ضریب با اندازه‌گیری شعاع و ارتفاع نمونه‌ها قبل و بعد از تغییر شکل اندازه گیری می‌شود، اما مقدار آن به هدایت حرارتی قالب و قطعه کار بستگی دارد. در نرخ‌های کرنش اندک، اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک یکسان بوده و تقریباً یکدیگر را خنثی می‌کنند، اما در نرخ‌های کرنش بالاتر اثر گرمای آدیباتیک به حدی افزایش می‌یابد که منحنی اثر اصلاح شده گرمای آدیباتیک تا ۳۰ مگاپاسکال بیشتر از مقدار تنش اولیه می‌باشد. در نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه به دلیل زمان طولانی آزمون، اختلاف دمایی ایجاد شده در سطح قطعه ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است. همچنین وجود اختلاف دمایی موقعیت تنش حداکثر را در نمودار تغییر نمی‌دهد. مقدار قدر مطلق خطای ناشی از اصطکاک و گرمای آدیباتیک با افزایش کرنش، افزایش می‌یابد، در حالیکه علامت جبری این پارامترها متفاوت بوده و تاثیر یکدیگر را خنثی می‌کنند.

تاریخ دریافت: ۲۹ آبان ۱۴۰۲

تاریخ بازنگری: ۱۹ تیر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۱ تیر ۱۴۰۳

واژه‌های کلیدی:

ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb، ساختار دوگانه، تغییر شکل داغ فشاری، اصطکاک، گرمای آدیباتیک

ارجاع به این مقاله:

حسین رضایی، مریم مرکباتی، امیر مومنی، بررسی و اصلاح اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک حین تغییر شکل داغ فشاری یک ترکیب بین فلزی آلومیناید تیتانیوم ریختگی، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، پاییز و زمستان ۱۴۰۳، جلد ۸، شماره ۲، صفحات ۸۱-۸۸. شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2024.426238.1189

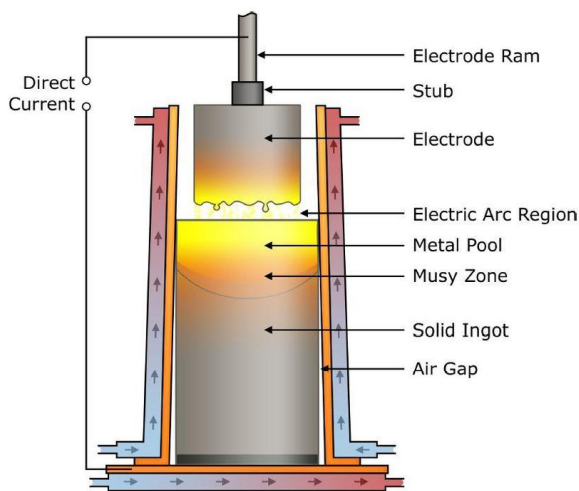
۱- مقدمه

۲۰۰۶ برای ساخت پره‌های توربین فشار پایین موتورهای GENx™ مورد استفاده قرار گرفت [۴]. ریزساختارهای متفاوت قابل دستیابی در ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb شامل ساختارهای هم‌محور، لایه‌ای، شبه لایه‌ای و دوگانه هستند که تشکیل آن‌ها به عملیات حرارتی و نرخ سرد کردن بستگی دارد [۵]. ساختار دوگانه ترکیبی از دانه‌های هم‌محور γ و کولونی‌های لایه‌ای است که با هدف بهبود استحکام و انعطاف‌پذیری این ترکیبات مورد استفاده قرار می‌گیرد [۶].

ترکیبات آلومیناید تیتانیوم نسبت استحکام به وزن مناسبی در مقایسه با آلیاژهای رایج تیتانیوم، فولادها و سوپرآلیاژهای پایه نیکل در محدوده دمایی ۵۰۰ تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد دارند [۱]. چگالی این ترکیبات در مقایسه با آلیاژهای مرسوم تیتانیوم، پایین‌تر بوده و به دلیل میزان بالای آلومینیوم، مقاومت به خوردگی آنها بهبود یافته است [۲، ۳]. آلیاژ Ti-48Al-2Cr-2Nb یکی از ترکیبات نسل دوم این خانواده است که اولین بار در سال

فرآیند ذوب مجدد قوسی تحت خلاء قرار گرفت. تصویری شماتیک از فرایند VAR در شکل ۱ ارائه شده است. ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد استفاده بر اساس نتایج آنالیز EDS² در جدول ۱ نمایش داده شده است. شمش تولید شده در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت در محیط خلاء همگن سازی شد.

آزمون فشار داغ ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های کرنش ۰/۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ بر ثانیه تا کرنش حقیقی ۰/۷ توسط دستگاه سروهیدرولیک Instron 8502 مجهز به کوره مقاومتی با استفاده از نمونه‌هایی با طول ۱۵ و قطر ۱۰ میلی‌متر انجام شد. سپس نمونه‌های آزمون در هوا تا دمای محیط سرد شدند. نمونه‌ها قبل از اعمال فشار به مدت ۵ دقیقه در دمای آزمون تحت پیشگرم قرار گرفتند. به منظور کاهش اثر اصطکاک از گرافیت به عنوان روانکار استفاده شد. سپس با بررسی منحنی‌های سیلان داغ ترکیب و اندازه گیری مقادیر شعاع و ارتفاع نمونه‌ها قبل و بعد از آزمایش، تاثیر اصطکاک و گرمای آدیباتیک بر مقدار تنش حقیقی بر اساس روابط توسعه یافته موجود محاسبه شد.



شکل ۱- تصویر نمادین از فرایند VAR [۱۱].

جدول ۱- ترکیب شیمیایی آلیاژ مورد بررسی بر حسب درصد اتمی.

Ti	Al	Cr	Nb
باقیمانده	۴۷/۸	۱/۹	۲

یکی از روش‌های مرسوم برای مطالعه رفتار تغییر شکل داغ فلزات و آلیاژها، آنالیز منحنی‌های سیلان داغ آنان بر اساس معادلات بنیادی تغییر شکل است، اما عواملی وجود دارند که سبب بروز خطا در محاسبه مقادیر واقعی این پارامترها می‌گردند. یکی از این عوامل، اصطکاک بین ماده و ابزار حین فرایند تغییر شکل است که باعث افزایش تنش سیلان واقعی آلیاژها می‌شود. با این وجود در شبیه سازی و مطالعه فرایند تغییر شکل داغ، مقدار دقیق و واقعی تنش سیلان مورد نیاز است. بنابراین تاثیر اصطکاک، اولین مانع برای استفاده صحیح از نتایج آزمون فشار داغ در مدل سازی رفتار سیلان ترکیبات و آلیاژها است [۷]. از سوی دیگر گرمای تغییر شکل یا گرمای آدیباتیک که تابعی از نرخ کرنش و دمای تغییر شکل است، سبب افزایش دمای نمونه حین تغییر شکل می‌شود. در نتیجه تنش سیلان حاصل از آزمایش فشار داغ کمتر از تنش سیلان واقعی ترکیب در شرایط تغییر شکل همدم است. لذا اثر گرمای تغییر شکل در تنش سیلان حاصل از آزمایش فشار داغ در نرخ‌های کرنش بزرگتر از ۰/۰۰۱ بر ثانیه باید اصلاح شود [۸].

تاکنون پژوهش‌های متعددی با هدف اصلاح اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک بر رفتار سیلان داغ آلیاژهای مختلف گزارش شده است. جیانگ و همکاران [۷] با مدلسازی تاثیر اصطکاک بر رفتار سیلان داغ فشاری آلیاژهای آلومینیم معتقدند این مدل در مطالعه رفتار سایر ترکیبات نیز موثر و قابل کاربرد است. لی و همکاران [۹] با بررسی اصلاح اثرات گرمای آدیباتیک معتقدند پارامتر ضریب تصحیح آدیباتیک با افزایش کرنش و کاهش نرخ کرنش، کاهش می‌یابد، اما حساسیتی به تغییرات دما ندارد. مقدار این ضریب به هدایت حرارتی قالب و قطعه کار بستگی دارد [۸]. لی و همکاران [۱۰] معتقدند عوامل دیگری مانند سرعت حرکت فک‌ها هم ممکن است باعث بروز خطا در محاسبه مقادیر تنش شوند، هر چند این تاثیر به نسبت اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک ناچیز است.

هدف از پژوهش حاضر، بررسی و اصلاح اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک بر منحنی‌های سیلان داغ فشاری ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ریزساختار اولیه دوگانه است.

۲- مواد و روش آزمایش

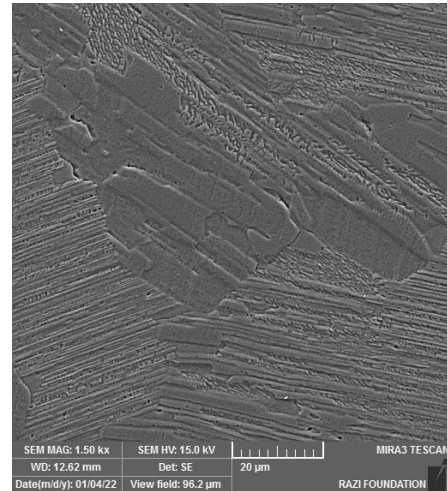
ذوب اولیه و ریخته‌گری شمش ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb مورد استفاده در این پژوهش با فرآیند ذوب قوسی تحت خلاء (VAR¹) با قطر ۱۰ و طول ۳۰ سانتی‌متر انجام شده و سپس به منظور کاهش جدایش‌ها و ناخالصی‌ها، این شمش تحت

² Energy Dispersive Spectroscopy

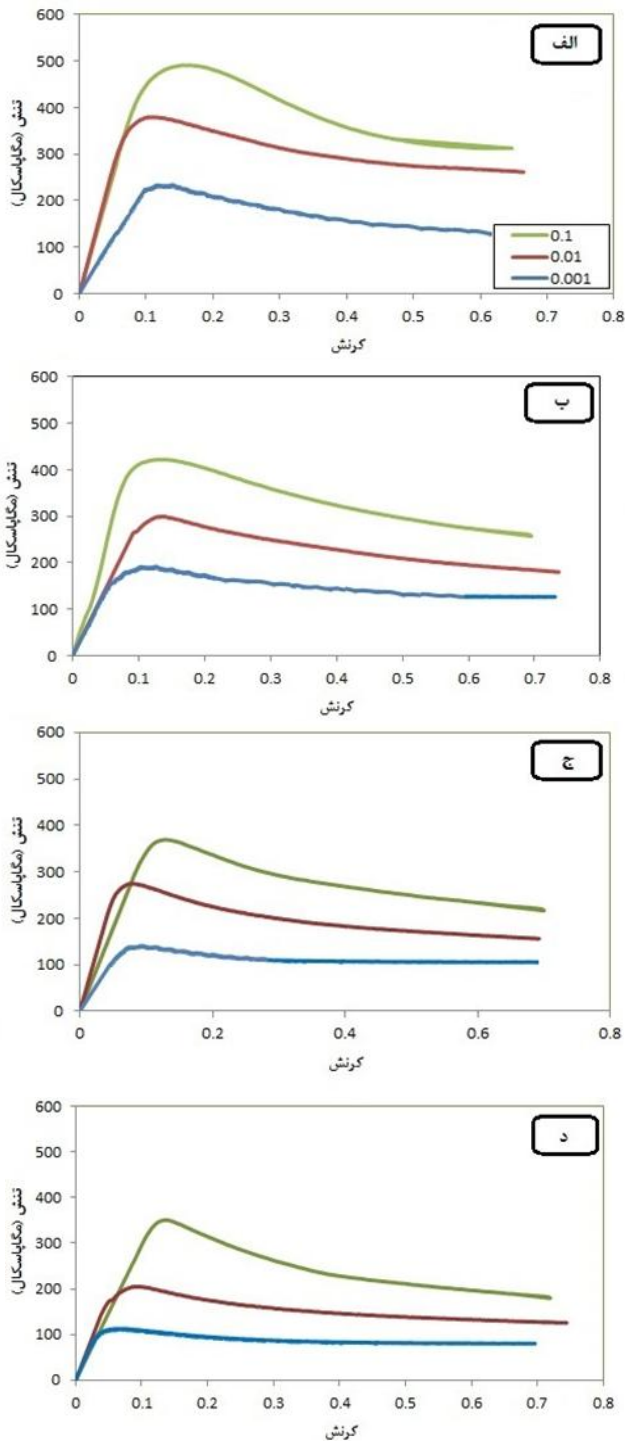
¹ Vacuum Arc Remelting

۳- نتایج و بحث

شکل ۲، ریزساختار اولیه پس از همگن‌سازی ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که ریزساختار از نوع دوگانه شامل دانه‌های γ به همراه کولونی‌های لایه‌ای از فازهای α_2 و γ است. دانه‌های γ با رنگ تیره‌تر متمایز هستند. وجود این فازها پس از همگن‌سازی در نمودارهای فازی دوتایی تیتانیوم-آلمومینیوم (شکل ۳) قابل پیش‌بینی است [۱۲].

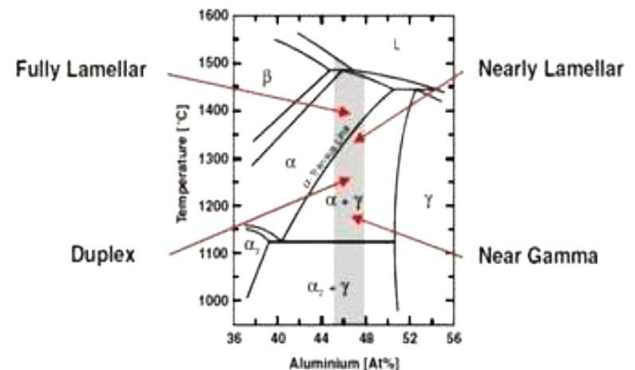


شکل ۲- ریزساختار ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb پس از همگن‌سازی در دمای ۱۱۷۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت.



شکل ۴- منحنی‌های سیلان ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ساختار اولیه دوگانه پس از تغییر شکل داغ فشاری در دمای الف) ۱۰۰۰، ب) ۱۰۵۰، ج) ۱۱۰۰ و د) ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های کرنش مختلف.

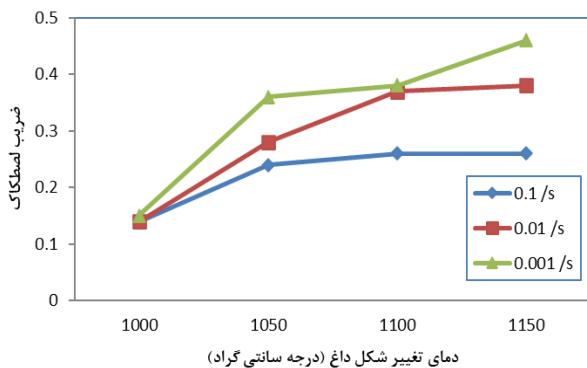
اثر اصطکاک: در فرایندهای شکل‌دهی فلزات، اصطکاک نقش مهمی در تعیین عمر ابزار، شکل‌پذیری ماده و کیفیت سطح محصول نهایی ایفا می‌کند. روان‌سازهای مختلفی به منظور کاهش اثر اصطکاک مورد استفاده قرار می‌گیرند. اما با این وجود، اصطکاک بین دو سطح همواره وجود دارد و برابر صفر نخواهد



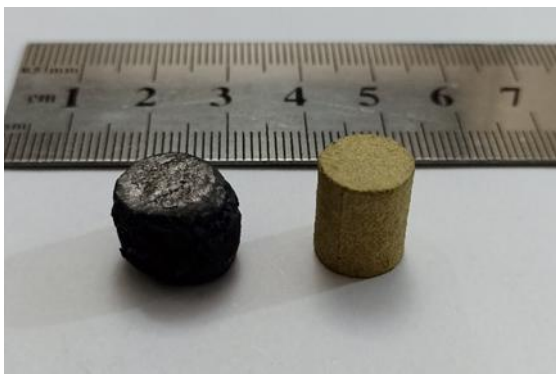
شکل ۳- ساختارهای منتج از عملیات حرارتی در دماهای مختلف آلیاژ Ti-48Al-2Cr-2Nb [۱۲].

منحنی‌های تنش-کرنش حقیقی ترکیب بین‌فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ساختار اولیه دوفازی پس از تغییر شکل فشاری داغ در دماهای ۱۰۰۰، ۱۰۵۰، ۱۱۰۰ و ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ‌های کرنش ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ بر ثانیه در شکل ۴ نشان داده شده است. تمامی منحنی‌های سیلان دارای یک نقطه تنش بیشینه هستند. به عبارت دیگر هر دو پدیده کارسختی و نرم‌شدگی دینامیک حین تغییر شکل داغ این ترکیب بین‌فلزی رخ می‌دهند. در ابتدای تمامی منحنی‌ها، افزایش شدیدی در تنش مشاهده می‌شود که نمایانگر وقوع هم‌زمان کارسختی با تغییر شکل است.

چسبنده) میل می کند. با توجه به اینکه مقدار ضریب اصطکاک در تمامی حالات تغییر شکل کمتر از ۰/۴۶ است، نوع اصطکاک در سطح تماس، عمدتاً لغزنده می باشد [۱۵]. با استفاده از روانساز مناسب می توان اصطکاک را کاهش داد، اما هرگز نمی توان آن را حذف نمود [۱۶]. افزایش ضریب اصطکاک با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش در نتایج سایر پژوهشگران نیز گزارش شده است [۱۷]. وجود اصطکاک سطحی سبب تغییر شکل غیر همگن شده و باعث بشکته ای شدن نمونه های آزمون می گردد [۱۸]. نمونه ای از وقوع پدیده بشکته ای شدن پس از تغییر شکل داغ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه در شکل ۶ نشان داده شده است. علیرغم اینکه مقدار این پدیده با استفاده از ضریب اصطکاک محاسبه می شود، اما الزاماً ارتباط منطقی بین این دو مقدار برقرار نیست. زیرا مقدار بشکته ای شدن علاوه بر ضریب اصطکاک به پارامترهای دیگری مانند دما و نرخ کرنش تغییر شکل، نوع روانساز، ترکیب شیمیایی، ناهمگنی ریزساختار و وقوع سیلان موضعی حین تغییر شکل داغ نیز بستگی دارد [۱۶].



شکل ۵- مقادیر ضریب اصطکاک حین تغییر شکل داغ ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ساختار اولیه دوگانه در دماها و نرخ های کرنش مختلف.



شکل ۶- نمونه ترکیب Ti-48Al-2Cr-2Nb قبل و پس از تغییر شکل داغ در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه.

بود [۷]. در اثر وجود اصطکاک، تنش سیلان ترکیب افزایش می یابد. میزان این افزایش در تنش سیلان به ضریب اصطکاک سطحی^۱ ماده بستگی دارد که با m_f نشان داده شده و مقدار آن برابر حاصل تقسیم تنش برشی (τ) بر تنش تسلیم برشی (k) است. با توجه به اینکه با افزایش کرنش، سطح نمونه و فک های دستگاه بیشتر در تماس هستند، میزان اصطکاک نیز بیشتر خواهد شد [۱۳].

رابطه ۱ توسط جیانگ و همکاران [۷] بر اساس نتایج پژوهش های ابراهیمی و همکاران [۱۴] برای محاسبه ضریب اصطکاک توسعه یافته اند:

$$m_f = \frac{\left(\frac{R}{H}\right)b}{\frac{4}{\sqrt{3}} - \left(\frac{2b}{3\sqrt{3}}\right)} \quad (1)$$

پارامترهای R و H در این رابطه به ترتیب نمایانگر شعاع تئوری و ارتفاع نهایی نمونه هستند. شعاع تئوری از رابطه زیر محاسبه می شود که پارامترهای R_0 و H_0 در این رابطه به ترتیب نمایانگر شعاع و ارتفاع اولیه نمونه فشار داغ می باشند:

$$R = R_0 \sqrt{\frac{H_0}{H}} \quad (2)$$

همچنین b نیز ضریب بشکته ای شدن^۲ است که از فرمول زیر محاسبه می گردد:

$$b = 4 \frac{\Delta R}{R} \frac{H}{\Delta H} \quad (3)$$

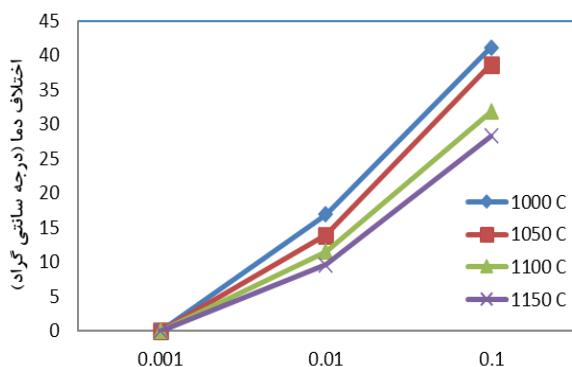
پارامتر ΔH بیانگر اختلاف ارتفاع ایجاد شده بر اثر آزمون فشار داغ و ΔR تفاوت بین شعاع بیشینه (R_m) و شعاع بالایی (R_t) نمونه است. شعاع بالایی نمونه از رابطه ۴ محاسبه می شود:

$$R_t = \sqrt{\left(3\frac{H_0}{H}R_0^2 - 2R_m^2\right)} \quad (4)$$

که R_m شعاع بیشینه اندازه گیری شده از نمونه فشار داغ است. پس از اندازه گیری مقادیر R_0 و H_0 نمونه ها قبل از آزمون و مقادیر H و R_m پس از آزمون، مقدار R_t با استفاده از رابطه ۴، مقدار b با استفاده از رابطه ۳، مقدار R با استفاده از رابطه ۲ و مقدار m_f با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شد. مقادیر ضریب اصطکاک برای تغییر شکل داغ در دماها و نرخ های کرنش مختلف در شکل ۵ نمایش داده شده است. مقدار ضریب اصطکاک با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، افزایش می یابد. با افزایش دما ضریب اصطکاک از صفر (اصطکاک لغزنده) به یک (اصطکاک

² Barreling Factor

¹ Interface Friction Factor



شکل ۷- مقادیر اختلاف دمای ایجاد شده در سطح نمونه آزمون بر اثر گرمای آدیاباتیک در شرایط مختلف دما و نرخ کرنش حین تغییر شکل داغ ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ساختار اولیه دوگانه.

گرمای ایجاد شده انتقال یافته و به همین دلیل اختلاف دمایی ایجاد شده در سطح قطعه ناچیز بوده و قابل نظر کردن است.

بر اساس مدل ژائو و همکاران [۲۲]، اختلاف تنش ایجاد شده ناشی از گرمای آدیاباتیک را می‌توان از رابطه ۷ محاسبه نمود:

$$\Delta\sigma = \frac{Q}{n\alpha R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T+\Delta T} \right) \quad (7)$$

که در این رابطه Q انرژی فعالسازی تغییر شکل داغ، R ثابت جهانی گازها و n و α ثوابتی وابسته به ماده هستند. برای محاسبه این پارامترها می‌توان از روابط ۸ تا ۱۰ استفاده نمود [۲۳، ۲۴]:

$$n = \frac{\partial \ln Z}{\partial \ln \alpha \sigma} \quad (8)$$

$$\alpha = \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \sigma} \right) / \left(\frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sigma} \right) \quad (9)$$

$$Q = R \left\{ \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial \ln \sinh(\alpha \sigma)} \right\} * \left\{ \frac{\partial \ln \sinh(\alpha \sigma)}{\partial \ln T} \right\} \quad (10)$$

با استفاده از روابط فوق مقادیر n، α و Q به ترتیب برابر ۳/۴۲، ۰/۰۰۳۹ و ۱۸۰ کیلوژول بر مول محاسبه شد.

شکل ۸ نمودارهای تنش اولیه (اصلاح نشده)، اصلاحات ناشی از اصطکاک، اصلاحات ناشی از گرمای آدیاباتیک و همچنین مجموع اصلاحات اعمالی بر روی داده‌های سیلان داغ فشاری ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۱ بر ثانیه و شکل ۹ همین نمودارها را برای تغییر شکل داغ ترکیب فوق در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه نمایش می‌دهد. وجود

ایوانز و شارنینگ [۱۹] با در نظر گرفتن میزان کرنش حقیقی (ε)، رابطه ۵ را به منظور حذف اثر اصطکاک از تنش سیلان ماده پیشنهاد داده‌اند:

$$\sigma = P / \left(1 + \frac{2mf}{3\sqrt{3}} \times \frac{R_0}{H_0} \exp\left(\frac{3}{2}\epsilon\right) \right) \quad (5)$$

که در این رابطه R₀ و H₀ به ترتیب شعاع و ارتفاع اولیه نمونه فشار، P تنش نرمال و σ تنش سیلان اصلاح شده است.

اثر گرمای آدیاباتیک: افت تنش سیلان یا نرم‌شدگی یک ویژگی متداول در منحنی‌های تنش-کرنش داغ ترکیبات بین فلزی آلومیناید تیتانیوم است. این نرم‌شدگی ممکن است ناشی از تغییرات ساختاری (تبلور مجدد دینامیکی، کروی شدن دانه‌ها یا تغییرات بافت) و یا بر اثر گرمای آدیاباتیک باشد. این گرما سبب افزایش دمای نمونه شده و در نتیجه تنش سیلان حاصل از آزمایش فشار داغ کمتر از تنش سیلان واقعی آلیاژ تحت شرایط همدما خواهد بود [۸].

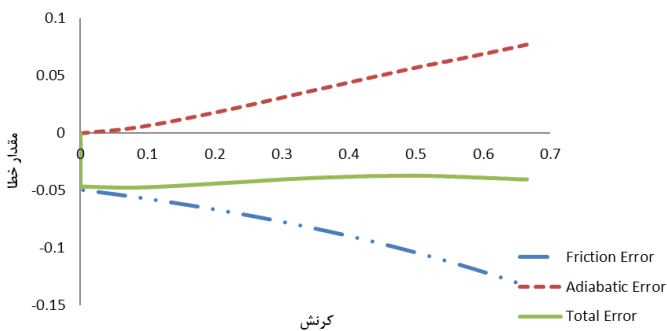
حدود ۹۵٪ کار مکانیکی حین تغییر شکل پلاستیک به گرما تبدیل شده و فقط ۵٪ آن صرف تحولات ریزساختاری می‌شود [۲۰]. بنابراین تغییرات دمای ناشی از گرمای آدیاباتیک حین تغییر شکل با استفاده از رابطه ۶ به دست می‌آید [۸]:

$$\Delta T = \frac{0.95\eta \int \sigma d\epsilon}{\rho_{cp}} \quad (6)$$

که در این رابطه ρ چگالی و C_p گرمای ویژه آلیاژ هستند که برای ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb به ترتیب ۳/۹۵۳ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۰/۷ J/g⁰C گزارش شده اند [۲۱]. همچنین ∫σdε سطح زیر نمودار تنش-کرنش اصلاح نشده و پارامتر η فاکتور اصلاح آدیاباتیک^۱ معادل کسر گرمای باقیمانده در قطعه در مقایسه با شرایط آدیاباتیک بوده که مقادیر آن در نرخ‌های کرنش ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ به ترتیب معادل صفر، ۰/۲۵ و ۰/۵ است [۸]. مقادیر ΔT برای تغییر شکل داغ در دماها و نرخ‌های کرنش مختلف در شکل ۷ نمایش داده شده است. حین آزمایش فشار داغ، مقدار زیادی گرما تولید می‌شود که زمان کافی برای پراکندگی آن وجود ندارد، بنابراین دمای داخلی نمونه به سرعت افزایش می‌یابد [۸]. مقدار اختلاف دمای ایجاد شده در نمونه آزمایش بر اثر گرمایش آدیاباتیک با کاهش دما و افزایش نرخ کرنش، افزایش می‌یابد. هر چند روند تغییرات دمایی ایجاد شده بر اثر تغییرات نرخ کرنش شدیدتر از تغییرات دمای آزمون است. در نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه به دلیل زمان طولانی آزمون،

¹ Adiabatic Correction Factor

نمودار میانگین خطای ایجاد شده بر اثر اصطکاک، خطای ایجاد شده بر اثر گرمای آدیباتیک و همچنین خطای مجموع با تغییرات کرنش حین تغییرشکل داغ در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مقدار قدر مطلق خطای ناشی از اصطکاک و گرمای آدیباتیک با افزایش کرنش، افزایش می‌یابد. بیشتر شدن تماس سطح نمونه و فک‌های دستگاه [۱۳] و شکست روانسازها در کرنش‌های بالا [۷] دلیل افزایش خطای ناشی از اصطکاک و اختلاف دمای ایجاد شده و نبود زمان کافی برای پراکندگی گرما [۸] دلیل افزایش خطای ناشی از گرمای آدیباتیک با افزایش کرنش هستند. مقدار خطای ناشی از اصطکاک، مثبت بوده و سبب افزایش مقدار تنش سیلان اندازه‌گیری شده می‌گردد، در حالیکه مقدار خطای ناشی از گرمای آدیباتیک، منفی بوده و مقدار اندازه‌گیری شده تنش سیلان، کمتر از مقدار واقعی است. این تفاوت در علامت تنش باعث می‌شود خطاهای ناشی از اصطکاک و گرمای آدیباتیک تا حد زیادی یکدیگر را خنثی نموده و مقدار خطای مجموع با افزایش کرنش تقریباً ثابت بماند.

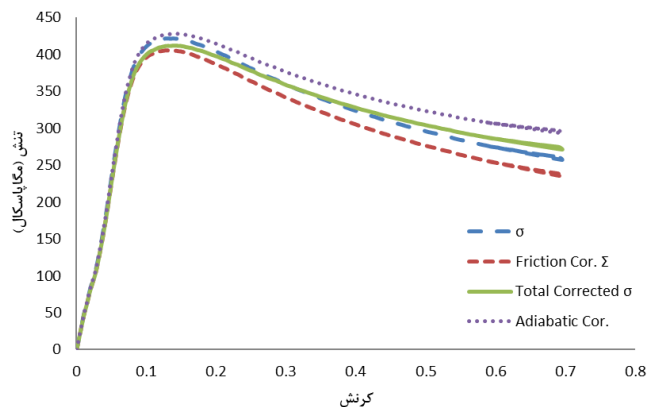


شکل ۱۰- بررسی تغییرات مقدار خطای میانگین عوامل مختلف با میزان کرنش حین تغییر شکل داغ ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ساختار اولیه دوگانه در دمای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه.

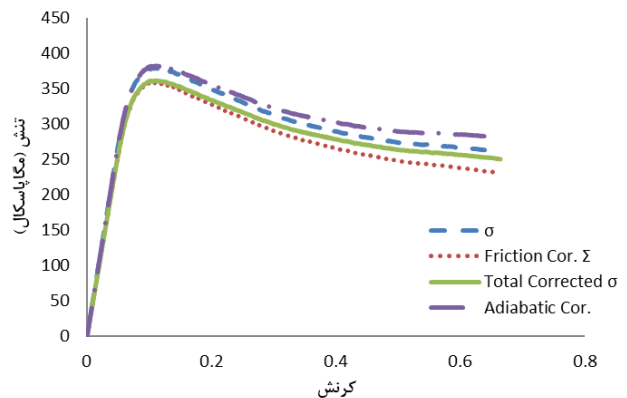
۴- نتیجه‌گیری

- مقدار ضریب اصطکاک حین تغییرشکل داغ در شرایط مختلف دما و نرخ کرنش بین ۰/۱۴ تا ۰/۴۶ است. این ضریب با افزایش دما و کاهش نرخ کرنش، افزایش می‌یابد. با توجه به ضرایب محاسبه‌شده، اصطکاک در تمامی حالات از نوع لغزنده است.
- در نرخ‌های کرنش اندک، اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک یکسان بوده و تقریباً یکدیگر را خنثی می‌کنند، اما در نرخ‌های کرنش بالاتر اثر گرمای آدیباتیک به حدی افزایش می‌یابد که منحنی اثر اصلاح شده گرمای آدیباتیک تا ۳۰ مگاپاسکال بیشتر از مقدار تنش اولیه است.

اختلاف دمایی باعث افزایش مقاومت به تغییرشکل به ویژه در دماهای پایین‌تر می‌شود، اما موقعیت تنش حداکثر را در نمودار تغییر نمی‌دهد [۷]. در کرنش‌های اندک، اختلاف نمودارها اندک است، اما پس از تنش حداکثر اثرات اصلاحات نمودارها بیشتر می‌شوند. در نرخ‌های کرنش اندک (شکل ۹) اثر اصطکاک و گرمای آدیباتیک یکسان بوده و تقریباً یکدیگر را خنثی می‌کنند. بنابراین مقادیر تنش اصلاح شده به مقادیر تنش خام (اصلاح نشده) نزدیک است، اما در نرخ‌های کرنش زیاد (شکل ۸) اثر گرمای آدیباتیک به حدی افزایش می‌یابد که منحنی اثر اصلاح شده گرمای آدیباتیک تا ۳۰ مگاپاسکال بیشتر از مقدار تنش اولیه می‌باشد. این موضوع از افزایش مقاومت به تغییرشکل آلیاژها با افزایش نرخ کرنش ناشی می‌شود [۲۴]. هنگامیکه نرخ کرنش افزایش یابد، زمان صرف‌شده برای اعمال همان مقدار کرنش اندک است، لذا گرمای تغییرشکل زمانی برای خروج ندارد به همین دلیل دما افزایش یافته و خطای داده‌ها بیشتر می‌شود.



شکل ۸- نمودارهای تنش اصلاح نشده، اصلاح تنش ناشی از اصطکاک، گرمای آدیباتیک و همچنین مجموع اصلاحات حین تغییرشکل داغ ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ساختار اولیه دوگانه در دمای ۱۰۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه.



شکل ۹- نمودارهای تنش اصلاح نشده، اصلاح تنش ناشی از اصطکاک، گرمای آدیباتیک و همچنین مجموع اصلاحات حین تغییرشکل داغ ترکیب بین فلزی Ti-48Al-2Cr-2Nb با ساختار اولیه دوگانه در دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد و نرخ کرنش ۰/۰۱ بر ثانیه.

- strain rates, *Journal of Materials Research*, 2019, 34(2) 309-320.
10. Li Y.P., Matsumoto H., Chiba A., Correcting the stress-strain curve in the stroke-rate controlling forging process, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2009, 40, 1203-1209.
 11. Brenk J., Hassan-Pour S., Spiess P., Friedrich B., Examination of an alternative method for the pyrometallurgical production of copper-chromium alloys, *IOP Conf. Ser. Materials Science and Engineering*, 2016, 143, 012016.
 12. Franzén S.F., Karlsson J., Titanium Aluminide manufactured by electron beam melting, Master Thesis, in Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology: Gothenburg, Sweden, 2010.
 13. Monajati H., et al., Deformation characteristics of isothermally forged UDIMET 720 nickel-base superalloy, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2005, 36, 895-906.
 14. Ebrahimi R., Najafzadeh A., A new method for evaluation of friction in bulk metal forming, *Journal of Materials Processing Technology*, 2004, 152(2) 136-143.
 15. Tan X., Comparisons of friction models in bulk metal forming, *Tribology International*, 2002, 35, 385-393.
 16. Shahriari D., et al., Effects of lubricant and temperature on friction coefficient during hot forging of Nimonic 115 superalloy, *Kovove Materialy*, 2011, 49(5) 375-383.
 17. Rudkins N.T., et al., Friction modelling and experimental observations in hot ring compression tests. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 60, 349-353.
 18. Obiko J., Friction correction of flow stress-strain curve in the upsetting process. *IOP SciNotes*, 2021, 2(1).
 19. Evans R.W., Scharming P.J., Axisymmetric compression test and hot working properties of alloys. *Materials Science and Technology*, 2001, 17, 995-1004.
 20. Dieter G.E., Kuhn H.A., Semiatin S.L., *Handbook of workability and process design*, USA: ASM International, 2003.
 21. Doubenskaia M., et al., Study of selective laser melting of intermetallic TiAl powder using integral analysis, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, 129, 1-14.
 22. Xiao G., Yang Q.W., Li L.X., Modeling constitutive relationship of 6013 aluminum alloy during hot plane strain compression based on Kriging method. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26(4) 1096-1104.
 23. Chen X., et al., Dynamic recrystallization behavior of the Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy during isothermal hot deformation, *Progress in Natural Science: Materials International*, 2019, 29, 587-594.
 24. Ma Y., et al., Correction of flow stress for hot compression of IN718 alloy, in *International Conference on Manufacturing Science and Engineering*, Atlantis Press, 2015, 1431-1436.
- ۳) با افزایش نرخ کرنش، زمان صرف‌شده برای اعمال همان مقدار کرنش اندک است، لذا گرمای تغییرشکل زمانی برای خروج ندارد، به همین دلیل دما افزایش یافته و خطای داده‌ها بیشتر می‌شود.
- ۴) در کرنش‌های اندک، اختلاف نمودارهای اصلاح شده و اصلاح نشده اندک است، اما پس از تنش حداکثر اثرات اصلاحات نمودارها بیشتر می‌شوند.
- ۵) در نرخ کرنش ۰/۰۰۱ بر ثانیه به دلیل زمان طولانی آزمون، اختلاف دمایی ایجاد شده در سطح قطعه ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن است.
- ۶) وجود اختلاف دمایی موقعیت تنش حداکثر را در نمودار تغییر نمی‌دهد.
- ۷) مقدار قدر مطلق خطای ناشی از اصطکاک و گرمای آدیاباتیک با افزایش کرنش، افزایش می‌یابد، در حالی که علامت جبری این پارامترها متفاوت بوده و تاثیر یکدیگر را خنثی می‌کنند.

مراجع

1. Leyens C., Peters M., *Titanium and Titanium Alloys - Fundamentals and Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2003.
2. Appel F., Paul J.D.H., Oehring M., *Gamma Titanium Aluminide Alloys*, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2011.
3. Sauthoff G., *Intermetallics*, ed. 1st. 1995, Weinheim: NY: Wiley-VCH.
4. Bewlay B.P., et al., TiAl alloys in commercial aircraft engines. *Materials at High Temperatures*, 2016. 33: p. 549-559.
5. Stollof N.S., Shikka V.K., *Physical Metallurgy and Processing of Intermetallic Compounds*. 1996, New York: Chapman & Hall.
6. Rezaei H., Morakabati M., Momeni A., Evaluation of the effect of heat treatment on structural changes and mechanical properties of Ti-48Al-2Cr-2Nb intermetallic. *Founding Research Journal*, 2022, 6(2) 125-132.
7. Jiang F., et al., A Correction to the stress-strain curve during multistage hot deformation of 7150 aluminum alloy using instantaneous friction factors, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2018, 27(6) 3083-3090.
8. Goetz R.L., Semiatin S.L., The adiabatic correction factor for deformation heating during the uniaxial compression test, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2001, 10(6) 710-717.
9. Li S., Li L., Influence of the deformation heating on the flow behavior of 6063 alloy during compression at medium



IRANIAN FOUNDRYMEN'S
SOCIETY

Founding Research Journal

Research Paper:

Investigation and Correction of the Effect of Friction and Adiabatic Heating during Compressive Hot Deformation of a Cast Titanium Aluminide Intermetallic

Hossein Rezaei ¹, Maryam Morakabati ^{2*}, Amir Momeni ³

1. M.Sc. Student, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
2. Associate Professor, Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Faculty of Materials Engineering, Hamedan University of Technology, Iran.

* Corresponding author: Email: m_morakabati@mut.ac.ir

Paper history:

Receive: 20 November 2023
Revise: 09 July 2024
Accept: 11 July 2024

Abstract:

The Purpose of this research is to study the effect of friction and adiabatic heating during compressive hot deformation of Ti-48Al-2Cr-2Al intermetallic and correction of the effect of these factors on flow curves. Hot compression test was performed at temperatures of 1000, 1050, 1100 and 1150 C and strain rates of 0.001, 0.01 and 0.1 S⁻¹. obtained flow curves were corrected by considering the effect of friction and adiabatic heating. The type of friction was sliding and friction coefficient was calculated between 0.14 and 0.46 in different conditions. The value of friction coefficient increased with increasing deformation temperature and decreasing strain rate. This coefficient determined by measuring the radius and height of the samples before and after deformation, but its value depend on the thermal conductivity of the mold and workpiece. At low strain rates, the effect of friction and adiabatic heating were similar and almost neutralize each other, but at higher strain rates, the effect of adiabatic heating increases to such an extent that the corrected adiabatic heating effect curve is up to 30 MPa higher. Because of the long test time at the strain rate of 0.001 s⁻¹, the temperature difference created on the surface of the workpiece is insignificant and can be neglected. the presence of temperature difference does not change the position of the peak stress in the curves. The absolute value of the error caused by friction and adiabatic heating, increases with increasing strain, while signs of this parameter are opposite and neutralize each other.

Keywords:

Ti-48Al-2Cr-2Nb
Intermetallic,
Duplex Microstructure,
Compressive Hot
Deformation,
Friction,
Adiabatic Heating.

[Please cite this article using:](#)

Hossein Rezaei, Maryam Morakabati, Amir Momeni, Investigation and correction of the effect of friction and adiabatic heating during compressive hot deformation of a cast titanium aluminide intermetallic, in Persian, Founding Research Journal, 2024, 8(2) 81-88.

DOI: 10.22034/frj.2024.426238.1189

Journal homepage: www.foundingjournal.ir