



## ارزیابی ریزساختار و خواص مکانیکی دمابالای آلیاژ آلومیناید تیتانیوم نسل دوم Ti-48Al-2Cr-2Nb

حمید رضا قربانی<sup>۱\*</sup>، احمد کرمانپور<sup>۲</sup>، احمد رضاییان<sup>۳</sup>

۱- کارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۲- استاد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

۳- استادیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

\* اصفهان، 8415683111، hr.ghorbani@chmail.ir

### چکیده

امروزه تلاش‌های گسترده‌ای در راستای توسعه‌ی آلیاژهای پر استحکام سبک جهت کاربرد در صنایع هوافضا در حال انجام می‌باشد. آلیاژهای آلومیناید تیتانیوم مواد پیشرفته‌ای هستند که با دارا بودن خواص ویژه‌ای همچون استحکام ویژه بالا و چگالی کم، توجه‌ها را به خود جلب کرده‌اند. در این زمینه آلیاژ نسل دوم Ti-48Al-2Cr-2Nb (درصد اتمی) معروف به 4822 پر استفاده‌ترین آلیاژ از این خانواده از آلیاژهاست. در پژوهش حاضر آلیاژ 4822 با استفاده از کوره ذوب قوسی خلأ ساخته شد. پس از اطمینان از مناسب بودن ترکیب شیمیایی، عملیات پرسکاری ایزواستاتیک داغ در 106 MPa، 1250°C و 6 ساعت و عملیات حرارتی همگن‌سازی در 1400°C به مدت یک ساعت انجام شد. خواص مکانیکی نمونه‌ها توسط آزمون پانچ کوچک دما بالا مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد علی‌رغم یکنواختی ریزساختار نمونه‌های آلیاژی 4822، خواص مکانیکی آن‌ها بر حسب حداکثر نیروی آزمون پانچ کوچک متفاوت می‌باشد. تصاویر شکست‌نگاری نشان داد که جدایش لایه‌ها و شکست درون لایه‌ای رخ برگی مکانیزم غالب در نمونه‌های با تحمل نیروی پایین بوده است. از طرف دیگر، در نمونه با تحمل نیروی بالا، جدایش و شکست درون لایه‌ای اتفاق نیفتاد که نشان از مستحکم بودن فصل مشترک لایه‌ای بود. تعداد و اندازه کلونی‌های لایه‌ای درگیر با پانچ در حین تست، جهت‌گیری لایه‌ها و استحکام فصل مشترک لایه‌ها، می‌تواند دلایل احتمالی اختلاف نیرو در آزمون پانچ کوچک نمونه‌های آلیاژ 4822 باشد.

### کلیدواژگان

آلومیناید تیتانیوم، Ti-48Al-2Cr-2Nb، خواص مکانیکی دما بالا، آزمون پانچ کوچک

## Evaluating microstructural and high temperature mechanical properties of 2<sup>nd</sup> generation titanium aluminide alloy (Ti-48Al-2Cr-2Nb)

Hamidreza Ghorbani<sup>1\*</sup>, Ahmad Kermanpur<sup>1</sup>, Ahmad Rezaeian<sup>1</sup>

1-Department of Materials Engineering, Isfahan University Of Technology, Isfahan.

\* P.O.B. 8415683111 Isfahan, Iran, hr.ghorbani@chmail.ir

### Abstract

Extensive researches have been conducted so far on development of lightweight high strength alloys for aerospace applications. Titanium aluminide alloys are among advanced materials which have attracted attention due to their special properties such as high specific strength and low density. In this alloy family, Ti-48Al-2Cr-2Nb (in at. %) known as 4822 is the most used alloy. In this research 4822 alloy was made by using vacuum arc re-melting furnace. Following achieving proper chemical composition, hot isostatic pressing (HIP) at 1250°C, 106 MPa and 6 h. and homogenization heat treatment at 1400°C/1h were done. High temperature mechanical properties of samples were evaluated by using small punch test. Despite of homogenized microstructure of 4822 alloy's samples, different mechanical properties were obtained based on maximum force during tests. Fractography images showed that lamellas' delamination and cleavage inter-lamellar fracture were predominant mechanisms in samples with low force value. On the other hand, lamellas' delamination and inter lamellar fracture weren't occurred in samples with high force value which indicating high strength of lamellas' interfaces in these samples. Size and number of lamellar colonies contacted with punch during test, lamellas' orientation and strength of lamellas' interfaces can be possible reasons for differences within 4822 alloy small punch tests.

### Keywords

Titanium aluminide, Ti-48Al-2Cr-2Nb, High temperature mechanical properties, Small punch test.

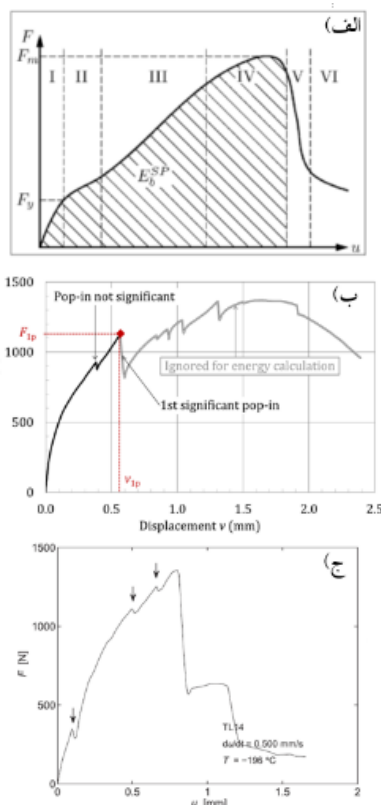
### ۱- مقدمه

خودروسازی بسیار اهمیت دارد. از جمله سرمایه‌گذاری‌های دولتی بسیار موفق در این زمینه می‌توان به کار پژوهشی چن وهمکاران [3] اشاره کرد که قرار است ظرف چند سال آینده به تولید انبوه برسد. آلیاژهای آلومیناید تیتانیوم مشکلاتی دارند از جمله انعطاف‌پذیری کم در دمای محیط [4]. راه کارهای مختلفی پیشنهاد شده است از قبیل [3]، افزودن عناصر آلیاژی و ساخت

ویژگی‌های جذاب و منحصر به فرد آلومیناید‌های تیتانیوم همچون استحکام ویژه بالا، چگالی کم، نقطه ذوب بالا، مقاومت اکسیداسیون خوب [1,2] موجب شده است تا این آلیاژها مورد استقبال ویژه پژوهشگران، صنایع، شرکت‌ها و حتی دولت‌ها باشد. وزن پایین و استحکام بالای قطعات در صنایع هوایی و



شکل ۱- شماتیکی از اجزا تجهیز آزمون پنچ کوچک [9].



شکل ۲- نمودارهای نیرو-جابجایی آزمون پنچ کوچک (الف) متداول برای مواد نرم [10]، (ب) نمونه‌ای از مواد ترد [9] و (ج) نمونه‌ای از مواد ترد [12].

در پژوهش حاضر آلیاژ ۴۸۲۲ با روش ذوب قوسی تحت خلا تولید شده، سپس عملیات پرسکاری ایزواستاتیک داغ و عملیات رسیدن به ریزساختار بر روی آن انجام شد، خواص مکانیکی آلیاژ از طریق آزمون پنچ کوچک در دمای بالا بررسی شد. هدف از پژوهش حاضر بررسی خواص مکانیکی دمای بالای آلیاژ ۴۸۲۲ از طریق آزمون پنچ کوچک است. با توجه به آینده این آلیاژها، دستیابی به آلیاژ مناسب از این خانواده آلیاژها در داخل کشور، برای کشور بسیار مفید و ضروری است.

کامپوزیت‌ها [4,5]، عملیات ترمومکانیکی [6]، عملیات پرسکاری ایزواستاتیک داغ و تلفیق آن با عملیات حرارتی [7,8].

آلیاژ ۴۸۲۲ (Ti-۴۸Al-۲Cr-۲Nb) یکی از پرکاربردترین آلیاژهای خانواده آلومیناید تیتانیوم است که در موتور هواپیمای GENx- و GENx-1B استفاده می‌شود [3]، البته نسل سوم این آلیاژها هم در حال استفاده در هواپیما می‌باشد. از جمله پژوهش‌های انجام شده بر روی آلیاژ ۴۸۲۲ می‌توان به کار پژوهشی چن و همکاران [7]، اشاره کرد که تلفیقی از عملیات پرسکاری ایزواستاتیک داغ و عملیات حرارتی را مورد بررسی قرار دادند و بیان کردند که استحکام تسلیم و انعطاف‌پذیری نمونه‌ها نسبت به روند متداول پرسکاری ایزواستاتیک داغ و عملیات حرارتی افزایش یافت و حذف میکروتورها در روش جدید را علت افزایش خواص مکانیکی عنوان کردند. [7,8] ساخت افزایشی آلیاژ ۴۸۲۲ اثر عملیات پرسکاری ایزواستاتیک داغ و جهت‌دهی به لایه‌ها را مورد پژوهش قرار دادند. در این میان خواص مکانیکی این آلیاژ از جمله خواص کششی و خزشی آن با استفاده از آزمون پنچ کوچک بررسی نشده است. آزمون پنچ کوچک برای ارزیابی خواص مکانیکی آلیاژها طراحی شده است، با توجه به مقدار بسیار کم نمونه مورد نیاز برای انجام تست‌های مکانیکی از طریق این آزمون، می‌توان این آزمون را برای بسیاری از موارد که امکان بدست آوردن یا تهیه نمونه متداول نیست استفاده کرد. شکل ۱ شماتیک اجزا آزمون پنچ کوچک شامل یک پنچ با انتهای نیم‌کره، قالب و نمونه دیسکی شکل را به نمایش می‌گذارد. در این آزمون نیروی عمودی پنچ با انتهای نیم‌کره بر یک نمونه دیسکی شکل وارد می‌شود.

منحنی نیرو-جابجایی متداول برای آزمون پنچ کوچک برای مواد نرم مطابق شکل ۲-الف) می‌باشد [10]. برای مواد ترد در این نمودار افت تنش‌های ناگهانی رخ می‌دهد که ناشی از ترک خوردن است. مثالی از نمودار در شکل ۲-ب) و ج) آمده است [9]. این منحنی‌ها شامل ۵ یا ۶ قسمت است. قسمت اول مربوط به وارد آمدن فشار به سطح نمونه و خواص الاستیک ماده است که عمدتاً توسط مدول الاستیک و تنش تسلیم کنترل می‌شود. قسمت دوم، مربوط به حالت گذار از رفتار الاستیک به پلاستیک است. قسمت سوم، مربوط به رفتار سخت‌شوندگی و کشیده شدن پوسته می‌باشد. در قسمت چهارم گلوپی شدن، تخریب و ترک شروع شده و نرم شدن هندسی اتفاق می‌افتد. در قسمت پنجم شکست نهایی شکل می‌گیرد. برخی نیز شکست نهایی را در قسمت ۶ اعلام می‌کنند. برخی قسمت ۶ را مربوط به نیروی لازم برای ورود پنچ به نمونه ترک خورده می‌دانند [9-13].

در روش پنچ کوچک برای بدست آوردن استحکام و سایر مقادیری که از تست‌های متداول به دست می‌آید لازم است تا از فرمول‌هایی برای این کار استفاده کرد و برای این منظور باید ثوابت موجود در این فرمول‌ها را با انجام چند تست متداول مثلاً تست کشش متداول بدست آورد و پس از آن می‌توان با استفاده از روابط نسبت به تبدیل نیرو به استحکام و سایر تبدیلات استفاده کرد.

<sup>1</sup> Small punch test

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش نسل دوم آلیاژهای آلومیناید تیتانیوم یعنی  $48Al-2Cr-2Nb$ -Ti (از این به بعد به اسم ۴۸۲۲ آورده می‌شود) با روش ذوب قوسی تحت خلاء و با مواد اولیه ورق تیتانیم (% ۹۹/۲۸wt)، شمش آلومینیم (% ۹۹/۷۷wt)، پودر کروم (% ۹۹wt) و پودر نیوبیم (% ۹۹/۰۷wt) ساخته شد. محاسبات لازم برای رسیدن ترکیب شیمیایی آلیاژ انجام شد، مواد اولیه غیر پودری سنگ زده، سمباده زده و شست‌شوی مافوق صوت با استون شدند تا اکسیدها و آلودگی‌های احتمالی از بین برود. سپس مواد اولیه به گونه‌ای که قوس به طور مستقیم به آلومینیم برخورد نکند در کوره چیده شده و آلیاژسازی انجام شد. برای ذوب، کوره پس از خلاء شدن و چند بار شست‌شوی آرگون، تا حدود  $3 \times 10^{-3}$  mbar خلاء شده و سپس مجدداً گاز آرگون دمیده شد. در ابتدای ذوب یک تکه تیتانیوم خالص برای دریافت اکسیژن احتمالی در محفظه ذوب شد و سپس نمونه‌ها ذوب شدند. نمونه‌ها چندین بار ذوب مجدد شدند و سطح مقطع بررسی شد تا از انحلال عناصر آلیاژ اطمینان حاصل شود. آنالیز ICP دستگاه CP-OES 730-ES Varian انجام شد که نشان‌داد ترکیب شیمیایی مناسب است و تنها برخی اصلاحات جزئی برای اتلاف عناصر در محاسبات انجام گرفت. برای بدست آوردن دمای عملیات حرارتی، آنالیز گرماسنجی تفاضلی (DTA) با دستگاه شرکت Bahr مدل STA504 انجام شد. عملیات پرس ایزواستاتیک داغ در شرایط  $106$  MPa،  $6$  ساعت و  $1250^\circ C$  تحت اتمسفر آرگون و پس از آن عملیات حرارتی هر دو عملیات همگن‌سازی و دستیابی به ریزساختار در یک سیکل ادغام و در دمای  $1400^\circ C$  به مدت یک ساعت و سرد شدن در کوره انجام گرفت.

برای بررسی‌های ریزساختاری نمونه از میکروسکوپ نوری Nikon- EPIPHOT 300 و میکروسکوپ الکترونی روبشی Philips XI30 استفاده شد. محلول اچ مورد استفاده محلول  $600 H_2O + 25 HNO_3 + 10 HF$  بود. به منظور ارزیابی خواص مکانیکی از آزمون پانچ کوچک در دمای حدود  $80^\circ C$  استفاده شد. در این آزمون یک پانچ با انتهای نیم کره با قطر  $2/5$  mm بر روی یک دیسک با قطر  $9$  mm و ضخامت  $5 \pm 0.5$  mm نیرو وارد کرده و نیرو و جابه‌جایی پانچ اندازه گرفته می‌شود. این آزمون برای ارزیابی نمونه‌های کوچک مورد استفاده قرار می‌گیرد و سعی شد این آزمون‌ها و نمونه‌سازی‌ها براساس یک شبه استاندارد [14] و مقاله [9] مربوط به تغییرات آن شبه استاندارد در استاندارد جدید که منتشر نشده انجام گیرد. آزمون با سرعت حرکت پانچ  $0.5$  mm/min دقیقه صورت گرفت. برای تهیه نمونه‌های آزمون پانچ کوچک، استوانه‌ای به قطر  $9$  mm عمود بر کف دکمه بریده شده و سپس دیسک‌ها در ضخامت حدود  $700 \mu m$  تا  $600 \mu m$  با استفاده از وایرکات بریده شدند در ادامه با توجه به [9,14] نمونه‌ها از دو طرف دیسک از سمباده  $320$  تا  $1200$ ، سمباده زده شده و به ضخامت  $5 \pm 0.5$  mm رسیدند.

## ۳- نتایج و بحث

آلیاژ ۴۸۲۲ پس از عملیات همگن‌سازی ریزساختار کاملاً لایه‌ای فوق‌العاده درشت تشکیل می‌دهد به حدی که در شکل ۳ الف) مشاهده می‌شود که در یک قاب عکس تنها قسمتی از یک کلونی جا گرفته است، به این ترتیب آلیاژ

۴۸۲۲ کلونی‌های با بیش از  $1800 \mu m$  دارد. این کلونی‌ها از لایه‌های  $(Ti_3Al)$  و  $\alpha$  ( $TiAl$ ) تشکیل شده‌اند. در شکل ۳ ب) مرز سه کلونی لایه‌ای نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است کلونی بزرگ‌تر به دلیل زاویه جهت‌گیری لایه‌ها در کلونی همسایه، با یک کلونی مرز صاف و با دیگری به علت تلاقی لایه‌هایش با لایه‌های کلونی همسایه مرز ناهموار تشکیل داده است. (شکل ۳ ج) و د) نیز تصاویر با بزرگ‌نمایی بالاتر را نشان می‌دهند. بررسی‌های ریزساختاری با میکروسکوپ نوری و میکروسکوپ الکترونی روبشی حاکی از بدست آمدن ریزساختار همگن پس از عملیات حرارتی در  $1400^\circ C$  بود.

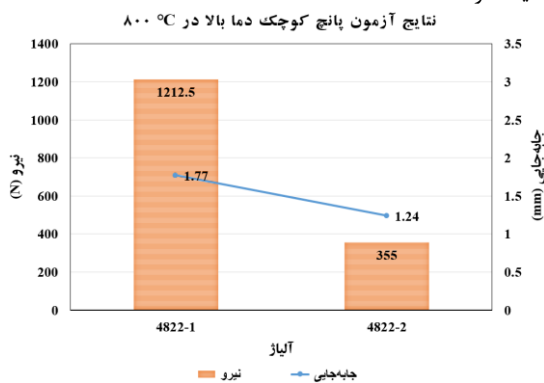
تست مکانیکی نمونه‌ها با استفاده از پانچ کوچک دمای بالا ( $800^\circ C$ ) انجام شد. شکل ۴ منحنی‌های نیرو - جابه‌جایی برای این دو تست انجام شده را نشان می‌دهد شایان ذکر است که این دو تست با وجود این که از یک نمونه بوده‌اند شکست نسبتاً نرم و نمونه ۲-۴۸۲۲ به شکست ترد تمایل دارند.

برای تحلیل نمودارهای حاصل از آزمون پانچ کوچک مواد نرم و ترد معیارهای متنوعی پیشنهاد شده است که از جمله آن‌ها برای مواد ترد می‌توان به معیار قراردادن نخستین افت مؤثر نیرو بیش از  $10\%$  حداکثر نیرو در حین آزمون [9]، حداکثر نیرو در حین آزمون [12]، افت نیرو به اندازه  $20\%$  پس از حداکثر نیرو حین آزمون [14] و تجمیع افت نیروها تا رسیدن به اندازه  $20\%$  حداکثر نیرو [12] اشاره کرد. برای تحلیل نمودارها از ترکیب معیارهای حداکثر نیرو و اولین افت نیروی حدود  $10\%$  استفاده شد با این شرط که این افت نیروی  $10\%$  درصدی قبل از حداکثر نیرو رخ داده باشد. زیرا نتایج آن نسبت به معیارهای دیگر واقعی‌تر بود. در شکل ۴ برای منحنی مربوط به نمونه ۱-۴۸۲۲ افت تقریباً ناگهانی نیرو مشاهده نمی‌شود اما در نمونه ۲-۴۸۲۲ افت‌های نیرو مشاهده می‌گردد که یکی قبل از حداکثر نیرو و دیگری نزدیک حداکثر نیرو رخ می‌دهد. تقریباً منطقه الاستیک هر دو نمونه یکسان است ولی در حین تغییر شکل پلاستیک رفتار متفاوت مشاهده می‌شود. تقریباً منطقه الاستیک هر دو نمونه یکسان است ولی در حین تغییر شکل پلاستیک رفتار متفاوت مشاهده می‌شود. در نمونه ۱-۴۸۲۲ تغییر شکل قابل ملاحظه مشاهده می‌شود این درحالی است در نمونه ۲-۴۸۲۲ افت نیرو مشاهده می‌شود که این افت‌های نیرو را به تشکیل ترک نسبت داده‌اند.

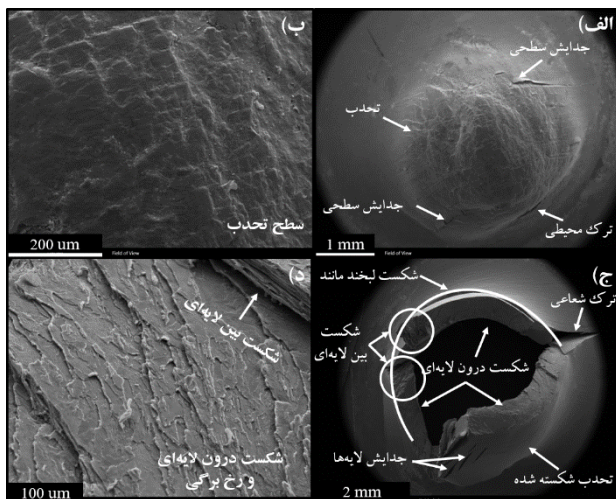


شکل ۳ - ریزساختار آلیاژ ۴۸۲۲ پس از همگن‌سازی الف) قسمتی از یک کلونی لایه‌ای، ب) مرز کلونی‌ها و ج) و د) بزرگ‌نمایی بالاتر.

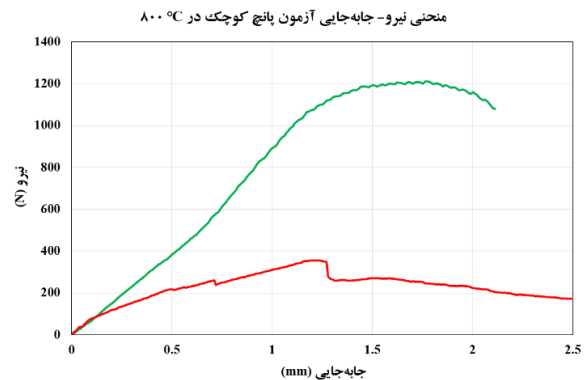
رخ برگی می‌شود. در برخی مناطق نیز شکست بین لایه‌های اتفاق می‌افتد به این ترتیب که ترک عمود بر لایه‌ها پیشروی کرده و لایه‌ها را می‌برد، ممکن است این برش با گلوبی شدن لایه‌ها همراه باشد که اگر اتفاق بیفتد به وضوح در سطح شکست مشخص می‌شود و ممکن است هم این برش مانند برش یک بیسکویت ویفر، بدون گلوبی شدن لایه‌ها روی دهد. در شکل ۶-ب) هم سطوح شکست رخ برگی درون لایه‌ای قابل مشاهده است که مکانیزم غالب شکست این نمونه است و هم می‌توان سطح شکست بین لایه‌ای بدون گلوبی شدن لایه‌ها را مشاهده کرد. در کل به طور مشخص نمونه ۲-۴۸۲۲ تردتر از نمونه ۱-۴۸۲۲ دچار شکست شده که با توجه به مکانیزم غالب شکست رخ برگی درون لایه‌ای می‌توان گفت که در نمونه ۲-۴۸۲۲ فصل مشترک لایه‌ها به هر ترتیب استحکام مورد نیاز را نداشته و لایه‌ها ابتدا جدایش یافته و سپس ترک پیشروی کرده است. اما در نمونه ۱-۴۸۲۲ شکست نرم‌تر بوده است و احتمالاً فصل مشترک لایه‌ها استحکام بالاتری داشته که جدایش رخ نداده است. جهت‌گیری لایه‌ها نیز اهمیت دارد.



شکل ۵ - مقادیر نیرو و جابه‌جایی در برخی آزمون‌های پانچ کوچک انجام شده.



شکل ۶ - تصاویر شکست‌نگاری از (الف) سطح کلی شکست دیسک در آلیاژ ۱-۴۸۲۲، (ب) سطح شکست آلیاژ ۱-۴۸۲۲، (ج) سطح کلی شکست دیسک در آلیاژ ۲-۴۸۲۲ و (د) سطح شکست آلیاژ ۲-۴۸۲۲.



شکل ۴ - منحنی‌های نیرو-جابجایی آزمون پانچ کوچک در دمای ۸۰۰°C

نتایج عددی آزمون پانچ کوچک در شکل ۵ نشان داده شده است مشاهده می‌شود که برای نمونه ۱-۴۸۲۲ نیرو از حدود ۱۲۰۰ N به حدود ۳۵۰ N برای نمونه ۲-۴۸۲۲ رسیده است. هم‌چنین میزان جابه‌جایی نیز افت کرده است، قابل ذکر است که این نتایج و نیز حدود میانگین این دو نتیجه در تکرارهای آزمون پانچ کوچک باز هم تکرار شدند که نشان از خطا و یا سایر احتمالی مرتبط با روند آزمون نیست. احتمال می‌رود که در تست‌های مختلف که اختلاف نتیجه زیاد وجود دارد با توجه به ابعاد دیسک‌ها به ویژه ضخامت کم آن‌ها و نیز ابعاد بزرگ کلونی‌ها، اختلاف در تعداد کلونی‌های درگیر در تست، اندازه کلونی‌های درگیر، جهت‌گیری لایه‌ها و فصل مشترک لایه‌ها در تست‌های مختلف منجر به تولید خواص بسیار متفاوت شده باشد.

شکل ۶ تصاویر شکست‌نگاری دو آزمون پانچ کوچک انجام شده را نشان می‌دهد. در تصاویر شکل ۶-الف) تصویر کلی سطح نمونه ۱-۴۸۲۲ مشاهده می‌شود، در این نمونه با وجود کاهش نیرو پس از حداکثر نیرو در شکل ۳، اثری از شکست و جدایش منجر به شکست دیده نمی‌شود و تنها سطح دیسک به مقدار قابل توجهی تحدب پیدا کرده است که از جمله نشانه‌های شکست نرم می‌باشد. این نمونه در صورت ادامه روند فشار پانچ احتمالاً از طریق یک شکست محیطی (لبخند مانند) از یک سمت تحدب جدا می‌گشت مقدمه این نوع جدایش که یک ترک محیطی می‌باشد در شکل ۶-الف) نشان داده شده است، شکست لبخند مانند دارای دو مؤلفه‌ی تحدب و جدایش لبخند مانند است. در برخی مناطق جدایش سطحی اتفاق افتاده که منجر به شکست نگر دیده است. هم در شکل ۶-الف) و هم در شکل ۶-ب) می‌توان تغییر شکل شدیدی را در سطح تحدب (محل درگیری مستقیم با پانچ در سمت مقابل دیسک) مشاهده کرد.

شکل ۶-ج) مربوط به نمونه ۲-۴۸۲۲ است که نیروی حدود ۳۵۰ نیوتن را تحمل کرده است در این شکل سطح شکست کلی لبخند مانند شامل یک تحدب شکسته شده و یک جدایش لبخند مانند مشاهده می‌شود. در شکل ۶-الف) جدایش لایه‌ها و هم‌چنین ترک شعاعی مشاهده می‌شود مکانیزم عمده شکست همین جدایش لایه‌ها و ادامه آن تا رسیدن به شکست درون لایه‌ای است، شکست درون لایه‌ای در فصل مشترک دو لایه اتفاق افتاده و در ادامه آن دو لایه را به طور کامل از هم جدا می‌کند که موجب ایجاد سطوح شکست

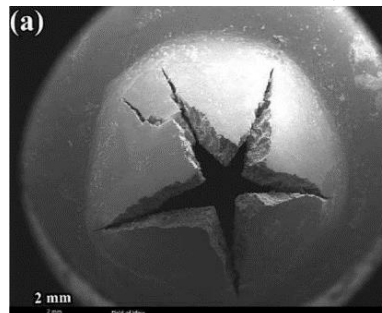


- (۲) با وجود همگن بودن ریزساختار، خواص مکانیکی کاملاً متفاوتی در آزمون پانچ کوچک این آلیاژ بدست آمد.
- (۳) سطح شکست آلیاژ کم‌استحکام (با تحمل نیروی حدود  $350\text{ N}$ ) به صورت لیخند مانند بوده و مکانیزم شکست غالب جدایش لایه‌ها و شکست درون لایه‌ای بود. در مقابل، در آلیاژ استحکام بالا، با وجود نیروی بالا (حدود  $1200\text{ N}$ ) و تحدد و تغییر شکل شدید، شکست رخ نداد و حفره‌ای در قسمت تحدد دیسک ایجاد نشد.
- (۴) تعداد و اندازه کلونی‌های درگیر با پانچ، جهت‌گیری لایه‌ها و استحکام فصل مشترک لایه‌ها، دلایل احتمالی اختلاف نیروی زیاد در آزمون پانچ کوچک نمونه‌های آلیاژ  $4822$  می‌باشند.

#### ۵- مراجع

- [1] F. Appel, J.D.H. Paul, M.Oehring, *Gamma Titanium Aluminide Alloys: Science and Technology*, John Wiley & Sons, 2011.
- [2] G.E. Fuchs, The effect of processing on the hot workability of Ti-48Al-2Nb-2Cr alloys, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 28, No. 12, pp. 2543–2553, 1997.
- [3] G. Chen, Y. Peng, G. Zheng, Z. Qi, M. Wang, H. Yu, C. Dong, C.T. Liu, Polysynthetic twinned TiAl single crystals for high-temperature applications, *Nature Materials*, Vol. 15, No. 8, pp. 876–881, 2016.
- [4] Y. Liu, R. Hu, J. Yang, J. Li, Tensile properties and fracture behavior of in-situ synthesized  $\text{Ti}_2\text{AlN}/\text{Ti}_{48}\text{Al}_{2}\text{Cr}_{2}\text{Nb}$  composites at room and elevated temperatures, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 679, pp. 7–13, 2017.
- [5] D. Sun, T. Sun, Q. Wang, X. Han, Q. Guo, G. Wu, Fabrication of in situ  $\text{Ti}_2\text{AlN}/\text{TiAl}$  composites by reaction hot pressing and their properties, *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, Vol. 29, No. 1, pp. 126–130, 2014.
- [6] N.N. Lavasani, H.R. Jafarian, H. Arabi, N. Park, Texture analysis and development of ultrafine grained structure during thermo-mechanical treatment in a gamma-TiAl intermetallic, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 711, pp. 259–267, 2018.
- [7] L. Chen, L. Zhu, Y. Guan, B. Zhang, J. Li, Tougher TiAl alloy via integration of hot isostatic pressing and heat treatment, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 688, pp. 371–377, 2017.
- [8] M. Seifi, A.A. Salem, D.P. Satko, U. Ackelid, S.L. Semiatin, J.J. Lewandowski, Effects of HIP on microstructural heterogeneity, defect distribution and mechanical properties of additively manufactured EBM Ti-48Al-2Cr-2Nb, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 729, pp. 1118–1135, 2017.
- [9] M. Bruchhausen, E. Altstadt, T. Austin, P. Dymacek, S. Holmström, S. Jeffs, R. Lacalle, R. Lancaster, et al., European standard on small punch testing of metallic materials, *Ubiquity Proceedings*, Vol. 1, No. S1, pp. 11, 2018.
- [10] Li, Y., Matocha, K., Hurst, R., Čížek, P., Turba, K., Stevens, P., "Experimental verification to determine fracture toughness from the small punch test using "Local approach"", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 102, pp. 16–29, 2019.

از جمله کارهای مشابه می‌توان به کار سعیدی پور و همکاران [15] اشاره کرد نیتروژن به آلیاژ آلومیناید تیتانیم نسل چهارم یعنی Ti-۴۶Al-۸Ta در مقادیر تا ۲ درصد اتمی اضافه کرد و از آزمون پانچ کوچک برای ارزیابی خواص مکانیکی دمای بالا ( $850^\circ\text{C}$ ) آلیاژها استفاده نمود. شکل ۷ تصویر شکست نمونه پایه آلیاژ (Ti-۴۶Al-۸Ta) این تحقیق را نشان می‌دهد. افزودن نیتروژن تا ۱ درصد اتمی منجر به افزایش مقدار حداکثر نیرو و استحکام در حین آزمون پانچ کوچک شده است و بعد از آن برای ۲ درصد اتمی نیتروژن این مقادیر کاهش داشته‌اند ولی هنوز بالاتر از مقادیر آلیاژ پایه بوده است. میزان جابه‌جایی در آلیاژهای نیتروژن دار کاهش داشته است. اگر بخواهیم بین مقادیر نیرو و جابه‌جایی بدست آمده در آزمون پانچ کوچک آلیاژ نسل چهارم Ti-۴۶Al-۸Ta و آلیاژ نسل دوم Ti-۴۸Al-۲Cr-۲Nb مقایسه‌ای انجام دهیم، این طور می‌شود که آلیاژ نسل چهارم حداکثر نیروی  $401\text{ N}$  و جابه‌جایی شکست  $0.8$  داشته است ولی نمونه ۲-۴۸۲۲، دارای حداکثر نیرو و جابه‌جایی به ترتیب  $355\text{ N}$  و  $1.24\text{ mm}$  بوده است و مقادیر نیرو و جابه‌جایی برای نمونه ۱-۴۸۲۲ به ترتیب برابر با  $1212\text{ N}$  و  $1.77\text{ mm}$  بوده است. در نتیجه میزان جابه‌جایی شکست در آلیاژ نسل چهارم به طور قابل ملاحظه‌ای کمتر از هر دو نمونه ۱-۴۸۲۲ و ۲-۴۸۲۲ می‌باشد و در مورد نیرو، آلیاژ نسل چهارم بالاتر از نمونه ۲-۴۸۲۲ و بسیار پایین‌تر از نمونه ۱-۴۸۲۲ است، علاوه بر این سطح کلی شکست دیسک آلیاژ نسل چهارم [15] به صورت شکست ستاره‌ای شکل است، در صورتی که شکست آلیاژ ۴۸۲۲ به صورت لیخند مانند است، شکست ستاره‌ای شکل نشان‌گر شکست ترد است. به نظر می‌رسد آلیاژ نسل دوم ۴۸۲۲ از نظر خواص مکانیکی بهتر از آلیاژ نسل چهارم باشد و همچنین آلیاژ نسل چهارم تردتر از آلیاژ نسل دوم (۴۸۲۲) است.



شکل ۷- سطح کلی شکست دیسک آلیاژ Ti-۴۶Al-۸Ta پس از آزمون پانچ کوچک دما بالا در  $850^\circ\text{C}$  [15].

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر آلیاژ Ti-48Al-2Cr-2Nb با استفاده از روش ذوب قوسی تحت خلأ ساخته شد. عملیات پرسکاری ایزواستاتیک داغ و متعاقب آن همگن‌سازی برای رسیدن به ریزساختار مورد نظر انجام گردید. نتایج حاصل از بررسی‌های ساختاری و مکانیکی نمونه‌ها به شرح زیر می‌باشد:

(۱) ریزساختارهای ریختگی و عملیات پرسکاری ایزواستاتیک داغ شده بسیار غیر یکنواخت و ناهمگن بود؛ لیکن پس از عملیات حرارتی در  $1400^\circ\text{C}$ ، ریزساختاری همگن و کاملاً لایه‌ای با کلونی‌های بسیار درشت ایجاد شد.



- [11] M. Bruchhausen, S. Holmström, I. Simonovski, T. Austin, J.-M. Lapetite, S. Ripplinger, F. de Haan, Recent developments in small punch testing: Tensile properties and DBTT, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 86, pp. 2–10, 2016.
- [12] M. Bruchhausen, S. Holmström, J.-M. Lapetite, S. Ripplinger, On the determination of the ductile to brittle transition temperature from small punch tests on Grade 91 ferritic-martensitic steel, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 155, pp. 27–34, 2017.
- [13] K. Li, J. Peng, C. Zhou, Construction of whole stress-strain curve by small punch test and inverse finite element, *Results in Physics*, Vol. 11, pp. 440–448, 2018.
- [14] CEN Workshop Agreement, CWA 15627:2007 D/E/F. Small punch test method for metallic materials, Brussels, Belgium: CEN; December 2007
- [15] S. Saeedipour, A. Kermanpur, F. Sadeghi, Effect of N addition on microstructure refinement and high temperature mechanical properties of Ti–46Al–8Ta (at. %) intermetallic alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 817, pp. 152749, 2020.